

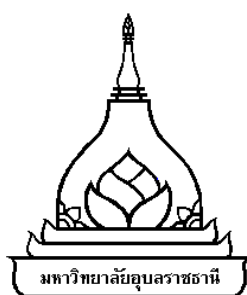
รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาตัวแปรและการดูดซับพลังงานของท่อทรงเรียวผนังบางโดยใช้
วัสดุประกอบเสริมแรงภายใต้แรงกระทำตามแนวแกน

โดย

ดร.รัชดา โสภาคะยัง และคณะ

มกราคม 2558



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาตัวแปรและการดูดซับพลังงานของท่อทรงเรียวผนังบางโดยใช้วัสดุ
ประกอบเสริมแรงภายใต้แรงกระทำตามแนวแกน

(Parametric Study and Crush Energy Absorption of Tapered Thin-
Walled Composite Tubes Subjected to Axially Quasi-Static Loading)

คณะผู้วิจัย

สังกัด

1. ดร.รัชดา โสภาคะยัง

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

2. ผศ.ดร.ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

3. ผศ.รท.ดร.สมญา ภูณะยา

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

โครงการนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ประจำปีงบประมาณ 2554-2555

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยการให้ความร่วมมือ การสนับสนุน และความอนุเคราะห์จากบุคลากรหลายฝ่าย ซึ่งคณะผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้ดังนี้

ขอขอบคุณ อาจารย์ ที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ที่อำนวยความสะดวกในการทดสอบ Universal Testing Machine และขอขอบคุณบุคลากรของภาควิชาภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้การสนับสนุนการทำงานตลอดการวิจัย และนายวิศิษฐ์ จันทร์ชื่น ผู้ช่วยวิจัยที่ได้ทุ่มเททำงานวิจัยชิ้นนี้อย่างแข็งขัน

ขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์การทดลอง

คณะผู้วิจัย

มกราคม 2558

บทคัดย่อ

ปัจจุบันการพัฒนาวัสดุได้เป็นไปอย่างต่อเนื่องซึ่งวัสดุประกอบเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายทั้งในอุตสาหกรรมการบิน อวกาศ และรถยนต์ เนื่องจากคุณสมบัติทางกลของวัสดุประกอบมีค่าอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง (high strength weight ratio) สามารถปรับความแข็งแรงตามทิศทางที่รับภาระได้ จึงทำให้วัสดุประกอบถูกนำมาประยุกต์เป็นโครงสร้างร่วมส่วนหน้าของรถยนต์ งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาตัวแปรและการดูดซับพลังงานของท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมทรงรีและท่อทรงกระบอก ที่ทำด้วยวัสดุประกอบเสริมแรง โดยชิ้นงานทดลองคือท่อทรงกรวยหน้าตัดสี่เหลี่ยม ทำด้วยวัสดุประกอบเสริมแรง FRP ประเภท เส้นใยแก้ว (Fiber glass) ผสมเรซิน โพลีเอสเตอร์ ซึ่งเป็นวัสดุประกอบที่นิยมใช้ในทางวิศวกรรมการขึ้นรูปของท่อที่ทำด้วยวัสดุประกอบเสริมแรง จะทำโดยใช้มือ (Hand lay-up technique) ท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมมีขนาด ความกว้างคือ 50 มิลลิเมตร ความยาวคือ 100 มิลลิเมตร ความสูงคือ 300 มิลลิเมตร ความหนา คือ 1.5, 2.0 และ 2.5 มิลลิเมตร และมุมเอียงของชิ้นงานคือ 5, 10 และ 15 องศา

ชิ้นงานท่อทรงกระบอกมีการเรียงทับซ้อนและมุมไขว้ที่แตกต่างกัน 3 ชิ้นงานคือ ชิ้นงาน A มีมุมไขว้ [(0/90)/(0/90)/(0/90)] ชิ้นงาน B มีมุมไขว้ [(45/-45)/(45/-45)/(45/-45)] และ ชิ้นงาน C มีมุมไขว้ [(45/-45)/(0/90)/(45/-45)] ขึ้นรูปจาก E-glass/polyester ขนาดของท่อมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกคือ 50 มิลลิเมตร ความหนา คือ 2 มิลลิเมตร และความยาวคือ 100 มิลลิเมตร

ผลจากการศึกษาตัวแปรและการดูดซับพลังงานของท่อทรงรีวงหนึ่งบางโดยใช้วัสดุประกอบเสริมแรงภายใต้แรงกระทำตามแนวแกน กรณีทดสอบชิ้นงานภายใต้แรงกดแบบกึ่งคงที่ พบว่ามีลักษณะการเสียหายอยู่ 3 แบบคือ (1) การเสียหายแบบแตกและบานออก ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของความหนา 1.5 มิลลิเมตร (2) การเสียหายแบบแตกเปราะ ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของความหนา 2.0 มิลลิเมตร และ (3) การเสียหายแบบแตกเป็นชิ้นเล็กตลอดแนวแกนของชิ้นงาน ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของความหนา 2.5 มิลลิเมตร สำหรับความสามารถในการดูดซับพลังงานจำเพาะ พบว่าชิ้นงาน A5 หรือมุมเอียง 5 องศา สามารถดูดซับพลังงานจำเพาะได้มากกว่าชิ้นงานอื่นๆ ในทุกกรณี ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของมุมเอียงของชิ้นงานที่สามารถรับภาระในแนวแกนได้ดีกว่ามุมเอียงอื่นๆ กรณีแรงกระทำแบบกึ่งคงที่ พบว่าลักษณะการเสียหายของชิ้นงานมี 1 แบบ คือ การเสียหายแบบยุบตัวแตกเป็นชิ้นเล็กตลอดแนวแกนของชิ้นงาน ในด้านความสามารถในการดูดซับพลังงานจำเพาะ พบว่าชิ้นงานที่มีมุมเอียง 5 องศา หรือ A5 สามารถในการดูดซับพลังงานจำเพาะได้มากกว่าชิ้นงานอื่นๆ ในทุกกรณี

ผลทดลองและแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของชิ้นงานท่อทรงกระบอก ภายใต้ภาระกระทำแบบกึ่งคงที่ พบว่าชิ้นงานมีลักษณะการเสียหายอยู่สามรูปแบบคือ (1) การเสียหายแบบแตก

และบานแยกออกเป็นแฉก ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของเส้นใยในแนวตั้ง ที่สามารถรับภาระในแนวแกนโดยตรง และอิทธิพลเส้นใยในแนวขวางทำหน้าที่ประคองให้เส้นใยในแนวตั้งให้รับภาระแนวแกน (2) การเสียหายแบบยุบตัวตามแนวเฉียงของเส้นใย ซึ่งเกิดจากการเรียงตัวของเส้นใยในแนวเฉียง เมื่อรับภาระในแนวแกนทำให้เส้นใยเกิดการแตกหักตลอด จนสิ้นสุดการยุบตัว และ (3) การเสียหายแบบแตกและบานออกเป็นพุ่ม ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของเส้นใยในแนวตั้ง 0 องศา ทำให้รับภาระในแนวแกนโดยตรง และอิทธิพลของเส้นใยในแนวเฉียง ทำหน้าที่ประคองเส้นใยในแนวตั้งและรับภาระในแนวแกน สำหรับผลทดลองและแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ภายใต้แรงกระทำ พบว่าชิ้นงานมีลักษณะการเสียหายอยู่สามรูปแบบคือ การเสียหายแบบแตกและบานแยกออกเป็นแฉก การเสียหายแบบยุบตัวตามแนวเฉียงของเส้นใย และ การเสียหายแบบแตกและบานเช่นกัน

ในด้านความสามารถในการดูดซับพลังงานภายใต้ภาระกระทำแบบกึ่งคงและภายใต้แรงกระทำ พบว่าชิ้นงาน A ที่มีมุมของเส้นใย คือ $[(0/90)/(0/90)/(0/90)]$ สามารถดูดซับพลังงานจำเพาะได้มากกว่าชิ้นงานอื่นๆ ซึ่งเป็นผลมาจากการเรียงเส้นใยของมุม 0 องศา มีทิศทางในการรับแรงในแนวแกนโดยตรง และมุม 90 องศา ทำหน้าที่ประคองให้เส้นใยมุม 0 องศา ไม่ให้แยกออกจากกันกรณีรับแรงในแนวแกน

Abstract

Composite material is widely used in many engineering applications especially in aerospace and automobile. This is due to its property that offers high strength to weight ratio. In addition, the property can be adjusted to resist impact from specific direction. Therefore, composite is mainly used in frontal element of automotive. This research is aimed to study the parameter and energy absorption capacity of reinforced composite material under impact. The specimens are cylindrical and square-tapered tubes. They are made from Fiber Reinforced Plastics (FRP) which composed of fiberglass and polyester resin. The specimens are formed by hand lay-up. The square tube is 50 mm width, 100 mm length and 1.5, 2.0 and 2.5 mm thick. Their incline angles are 5, 10 and 15 degree.

The cylindrical tubes are made from 3 layers of fiber glass mat. Each layer is placed in different angle to provide 3 types of specimens. Specimen A is $[(0/90)/(0/90)/(0/90)]$, specimen B is $[(45/-45)/(45/-45)/(45/-45)]$ and specimen C is $[(45/-45)/(0/90)/(45/-45)]$. They are fabricated from E-glass/polyester with outer diameter of 50 mm, 2 mm thick and 100 mm long.

The study on tapered squared tubes revealed that there are 3 types of failure modes for quasi-static loading. They are (1) brittle crack and expansion which is found in 1.5 mm thick specimens, (2) brittle mode which is found in 2.0 mm thick specimens, (3) axial brittle through-out which is found in 2.5 mm specimens. In case of impact loading, only axial brittle through-out was found. Considering the energy absorption, both for quasi-static and impact loading, it was found that specimens A5 (5 degree apex angle) is able to absorb highest impact energy. This is due to the its small apex angle which allow the specimen to resist axial load more efficiency.

Considering the cylindrical tubes, it was found that there are 3 collapse modes. They are (1) spray mode which is formed by the vertical fiber that can react to axial impact lode and assisted by circumferential fiber, (2) spiral mode which is collapsed diagonally along with the direction of fiber, and (3) brittle and expansion mode which is formed by the collapse of vertical fiber while the diagonal fiber help supporting the whole column. In the view of energy absorption, it was found that the cylinder with $[(0/90)/(0/90)/(0/90)]$ angle can absorb highest energy. This is because the vertical fiber can effectively resist the impact load while the horizontal fiber supports them in hoop direction.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ต
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.3.1 กรณิแรงที่กระทำแบบคงที่	3
1.3.2 กรณิแรงกระแทก	3
1.3.3 ชิ้นงานทดลอง	3
1.4 ผลสำเร็จและความคุ้มค่าของการวิจัยที่ว่าจะได้รับ	4
2 ข้อมูลพื้นฐาน ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 วัสดุประกอบ	5
2.2 เมทริกซ์และวัสดุเสริมแรง	5
2.2.1 เมทริกซ์	5
2.2.2 ส่วนเสริมแรง	7
2.3 การขึ้นรูปแบบทาดด้วยมือ	8
2.3.1 ขั้นตอนการขึ้นรูป	9
2.4 การจัดเรียงตัวของเส้นใย	9
2.5 กลศาสตร์ของวัสดุประกอบ	10
2.5.1 สัดส่วนน้ำหนักและสัดส่วนปริมาตร	10

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.2 กลศาสตร์จุลภาคของวัสดุประกอบ	13
2.6 มาตรฐานสากลในการทดสอบรถยนต์	19
2.6.1 มาตรฐานความปลอดภัยของสหพันธ์ยานยนต์	20
2.6.2 มาตรฐานการประเมินและการทดสอบรถยนต์ใหม่	20
2.7 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาการรับแรงกระแทก	21
2.7.1 ภาวะวิกฤติหรือภาวะเสียหาย	21
2.7.2 ภาวะสูงสุด	22
2.7.3 ภาวะเฉลี่ย	22
2.7.4 พลังงานดูดซับ	22
2.7.5 พลังงานดูดซับจำเพาะ	23
2.8 หลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	24
2.8.1 ขั้นตอนพื้นฐานของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	24
2.8.2 โปรแกรม FEA ที่ใช้ในการศึกษา (ABAQUS)	25
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	27
3 วิธีการศึกษาและการทดสอบ	
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา	31
3.1.1 เครื่องทดสอบการกด	31
3.1.2 เครื่องทดสอบการกระแทก	32
3.2 ชิ้นงานทดลองแบบทรงกรวย	33
3.2.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน	34
3.2.2 ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานแบบทรงกรวย	37
3.3 ชิ้นงานทดลองแบบทรงกระบอก	42
3.3.1 ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงาน	42
3.4 รายละเอียดแบบจำลอง FEA	46
3.4.1 การสร้างแบบจำลองทดสอบ	46
3.4.2 การกำหนดคุณสมบัติของท่อขึ้นงาน	47

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.3 การกำหนดแกนและลักษณะการเรียงตัวของเส้นใย	47
3.4.4 การกำหนดระยะเวลาในการทดสอบชิ้นงาน	48
3.4.5 การกำหนดการสัมผัสกันของชิ้นงาน	48
3.4.6 การกำหนดสภาวะเงื่อนไขขอบ	48
3.4.7 ชนิดของเอลิเมนต์	49
3.4.8 การกำหนดชื่อไฟล์ที่สร้างขึ้นเพื่อการทดสอบ	49
3.4.9 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์โปรแกรม ABQUS/Explicit	49
3.5 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ	50
3.5.1 วิธีการทดสอบชิ้นงานภายใต้แรงดึง	50
3.5.2 ผลการทดสอบแรงดึง	51
3.5.2.1 การทดสอบการต้านทานแรงดึงการเรียงตัวของเส้นใยในทิศทางต่างกันของชิ้นงาน A	51
3.5.2.2 การทดสอบการต้านทานแรงดึงการเรียงตัวของเส้นใยในทิศทางต่างกันชิ้นงาน B	52
3.5.2.3 การทดสอบการต้านทานแรงดึงการเรียงตัวของเส้นใยในทิศทางต่างกันชิ้นงาน C	53
3.5.2.4 การทดสอบการต้านทานแรงดึงตามแนวเส้นใยในทิศทางเดียว 0 องศา	54
3.5.2.5 การทดสอบการต้านทานแรงดึงตามแนวขวางเส้นใยในทิศทางเดียว 90 องศา	55
3.5.2.6 การทดสอบการต้านทานแรงดึงตามแนวเฉียงเส้นใยในทิศทางเดียว 45 องศา	56
3.5.2.7 การทดสอบการต้านทานแรงดึงของเส้นใยแบบสุ่มหลายทิศทางความหนา 1.5 mm	57
3.5.2.8 การทดสอบการต้านทานแรงดึงของเส้นใยแบบสุ่มหลายทิศทางความหนา 2.0 mm	58

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5.2.9 การทดสอบการต้านทานแรงดึงของเส้นใยแบบสุ่ม	
หลายทิศทางความหนา 2.5 mm	59
3.5.3 วิธีการทดสอบชิ้นงานภายใต้แรงกด	60
3.5.3.1 การทดสอบการต้านทานแรงกดตามแนวเส้นใย	
ในทิศทางเดียว 0 องศา	61
3.5.3.2 การทดสอบการต้านทานแรงกดตามแนวเส้นใย	
ในทิศทางเดียว 90 องศา	62
3.5.3.3 การทดสอบการต้านทานแรงกดตามแนวเส้นใย	
แบบสุ่มหลายทิศทาง	63
3.5.4 วิธีการทดสอบชิ้นงานภายใต้แรงเฉือน	64
3.5.4.1 การทดสอบแรงเฉือนนอกระนาบในทิศทางเดียว	
0 องศา	65
3.5.4.2 การทดสอบแรงเฉือนนอกระนาบของเส้นใยแก้ว	
แบบสุ่มหลายทิศทางความหนา 1.5 mm	66
3.5.4.3 การทดสอบแรงเฉือนนอกระนาบของเส้นใยแก้ว	
แบบสุ่มหลายทิศทางความหนา 2.0 mm	67
3.5.4.4 การทดสอบแรงเฉือนนอกระนาบของเส้นใยแก้ว	
แบบสุ่มหลายทิศทางความหนา 2.5 mm	68
3.6 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลองของเครื่องทดสอบแรงกระแทก	69
3.7 ขั้นตอนในการศึกษา	71
3.7.1 การทำการทดลอง	71
3.7.2 การทำแบบจำลองด้วย FEA	71
4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล	
4.1 ชิ้นงานทรงกระบอก	72
4.1.1 การตอบสนองของท่อต่อแรงกระทำแบบกึ่งคงที่	72
4.1.1.1 การเสียหายของชิ้นงาน A	72
4.1.1.2 การเสียหายของชิ้นงาน B	73

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.1.3 การเสียหายของชิ้นงาน C	74
4.1.1.4 การตอบสนองของชิ้นงาน A	76
4.1.1.5 การตอบสนองของชิ้นงาน B	77
4.1.1.6 การตอบสนองของชิ้นงาน C	78
4.1.2 การตอบสนองของท่อต่อแรงกระแทก	79
4.1.2.1 การเสียหายของชิ้นงาน A	79
4.1.2.2 การเสียหายของชิ้นงาน B	80
4.1.2.3 การเสียหายของชิ้นงาน C	81
4.1.2.4 การตอบสนองของชิ้นงาน A	83
4.1.2.5 การตอบสนองของชิ้นงาน B	83
4.1.2.6 การตอบสนองของชิ้นงาน C	84
4.1.3 ความสามารถในการดูดซับพลังงาน	85
4.1.3.1 ความสามารถในการดูดซับพลังงานภายใต้แรงกระทำแบบกึ่งคงที่	85
4.1.3.2 ความสามารถในการดูดซับพลังงานภายใต้แรงกระทำแบบกระแทก	86
4.2 ชิ้นงานทรงกรวย	88
4.2.1 การตอบสนองของชิ้นงานต่อแรงกระทำแบบกึ่งคงที่	88
4.2.1.1 การเสียหายของชิ้นงานความหนา 1.5 mm	88
4.2.1.2 การเสียหายของชิ้นงานความหนา 2.0 mm	91
4.2.1.3 การเสียหายของชิ้นงานความหนา 2.5 mm	93
4.2.2 การตอบสนองของชิ้นงานต่อแรงกระแทก	96
4.2.2.1 การเสียหายของชิ้นงานความหนา 1.5 mm	96
4.2.2.2 การเสียหายของชิ้นงานความหนา 2.0 mm	98
4.2.2.3 การเสียหายของชิ้นงานความหนา 2.5 mm	101
4.2.3 ความสามารถในการดูดซับพลังงาน	103

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการศึกษา	111
5.1.1 ชิ้นงานทรงกระบอก	111
5.1.2 ชิ้นงานทรงกรวย	111
5.2 ข้อเสนอแนะ	112
เอกสารอ้างอิง	113
ภาคผนวก	117

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	เปรียบเทียบช่วงของสมบัติระหว่างเทอร์โมเซตและเทอร์มอพลาสติก
2.2	เปรียบเทียบสมบัติของเทอร์มอเซตต่างๆ
3.1	ขนาดของชิ้นงานไฟเบอร์กลาสแบบทรงกรวยที่ใช้ในการทดลอง
3.2	น้ำหนักของเรซินและน้ำหนักของเส้นใยแก้ว
3.2	น้ำหนักของเรซินและน้ำหนักของเส้นใยแก้ว (ต่อ)
3.3	ขนาดของท่อไฟเบอร์กลาสที่ใช้ในการทดลอง
3.4	ผลทดสอบคุณสมบัติของชิ้นงาน
4.1	สรุปผลการทดลองและแบบจำลองการเสียหายของชิ้นงานภายใต้แรงแบบกึ่งคงที่
4.2	สรุปผลการทดลองและแบบจำลองการเสียหายของชิ้นงานภายใต้แรงกระแทก
4.3	ความสามารถในการดูดซับพลังงานภายใต้การกระทำในแนวแกน
4.4	ความสามารถในการดูดซับพลังงานภายใต้การกระทำแบบกึ่งคงที่
4.5	ความสามารถในการดูดซับพลังงานภายใต้แรงกระแทก

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 แสดงตัวดูดซับพลังงานทำหน้าที่ดูดซับพลังงานของโครงสร้างจากแรงกระแทก	1
2.1 เปรียบเทียบเส้นใยเสริมแรงชนิดต่างๆ	7
2.2 ความแข็งแรงและความแข็งแรงจำเพาะของวัสดุที่ทำจากเส้นใยชนิดต่างๆ	8
2.3 การขึ้นรูปแบบทาคด้วยมือและตัวอย่างชิ้นงาน	8
2.4 การเรียงตัวกันของเส้นใย	10
2.5 แบบจำลองการวิเคราะห์กลศาสตร์จุลภาคตามแนวแกนของเส้นใย	14
2.6 แบบจำลองการวิเคราะห์กลศาสตร์จุลภาคตามแนวขวางกับแกนของเส้นใย	16
2.7 แบบจำลองการวิเคราะห์กลศาสตร์จุลภาคสำหรับการเฉือน	18
2.8 แบบจำลองการวิเคราะห์กลศาสตร์จุลภาคสำหรับหาอัตราส่วนปัวซอง	18
2.9 ลักษณะการทดสอบการชนด้านหน้าตามมาตรฐานการทดสอบรถยนต์ใหม่	20
2.10 มาตรฐานการทดสอบการชนคนเดินเท้าของการทดสอบรถยนต์ใหม่	21
2.11 มาตรฐานการทดสอบการชนด้านข้างของการทดสอบรถยนต์ใหม่	21
2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาระและระยะยุบตัว	22
2.13 ลักษณะหน้าจอของโปรแกรม ABAQUS/CAE	26
3.1 เครื่องทดสอบการกด	31
3.2 เครื่องทดสอบการกระแทก	32
3.3 ขนาดของชิ้นงานทรงกรวย	33
3.4 (ก) เรซินและ (ข) Hardener (ตัวทำให้แข็ง) ที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน	35
3.5 เส้นใยแก้วแบบสุ่มหลายทิศทาง	35
3.6 อุปกรณ์ที่ใช้ขึ้นรูปชิ้นงาน	36
3.7 แม่แบบของชิ้นงาน	37
3.8 เส้นใยแก้วที่ตัดตามลักษณะของชิ้นงาน สำหรับใช้ในการขึ้นรูป	38
3.9 ตวงปริมาณเรซินสำหรับการขึ้นรูป	38
3.10 ขั้นตอนการเตรียมสารและผสมสาร Hardener	39
3.11 ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงาน โดยทาเรซินและวางเส้นใยแก้วบนแม่แบบ	40
3.12 ชิ้นงานเริ่มแข็งตัว	41
3.13 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ	41

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.14 (ก) เรซินและ (ข) ตัวทำให้แข็งที่ใช้ในการขึ้นรูปท่อไฟเบอร์	43
3.15 เส้นใยแก้วทอเป็นพื้นที่มีลักษณะมุมไขว้กัน 0/90 องศา	43
3.16 (ก) การทาเรซินลงบนเส้นใยแก้วที่พันแม่แบบ (ข) ลูกกลิ้งโลหะเกลียวเพื่อไล่อากาศออก	44
3.17 เครื่องหมุนแม่แบบ	45
3.18 ชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปในมุมไขว้ต่างๆ	45
3.19 แบบจำลองโครงสร้างของชิ้นงานและแผ่นวัตถุแข็งเกร็ง	46
3.20 (ก) การกำหนดใช้แกน coordinate system (ข) ลักษณะการเรียงตัวของเส้นใย	48
3.21 ลักษณะ Element ของ FEA Model ในการศึกษา	49
3.22 (ก) เครื่องทดสอบแรงดึง (ข) การจับยึดชิ้นงาน	50
3.23 ชิ้นงาน A ที่มีการเรียงตัวของเส้นใยคือ [0/90]/[0/90]/[0/90] สำหรับการทดลองแรงดึง	51
3.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะการยึดตัวภายใต้แรงดึงของ ชิ้นงาน A	51
3.25 ชิ้นงาน B ที่มีการเรียงตัวของเส้นใยคือ [(45/-45)/(45/-45)/(45/-45)] สำหรับการทดลองแรงดึง	52
3.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะการยึดตัวภายใต้แรงดึงของชิ้นงาน B	52
3.27 ชิ้นงาน C ที่มีการเรียงตัวของเส้นใยคือ [45/-45]/[0/90]/[45/-45] สำหรับการทดลองแรงดึง	53
3.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะการยึดตัวภายใต้แรงดึงของชิ้นงาน C	53
3.29 ชิ้นงานที่มีการเรียงตัวของเส้นใยทิศทางเดียว สำหรับการทดลองแรงดึง	54
3.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะการยึดตัวของชิ้นงานภายใต้แรงดึง ตามแนวเส้นใยในทิศทางเดียว 0 องศา	54
3.31 ชิ้นงานที่มีการเรียงตัวของเส้นใยทิศทางเดียว สำหรับการทดลองแรงดึง	55
3.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นกับระยะการยึดตัวของชิ้นงานภายใต้แรงดึง ตามแนวเส้นใยในทิศทางเดียว 90 องศา	55
3.33 ชิ้นงานที่มีการเรียงตัวของเส้นใยทิศทางเดียว สำหรับการทดลองแรงดึง	56

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงานภายใต้แรงดึงตามแนวเส้นใยในทิศทางเดียว 45 องศา	56
3.35 ชิ้นงานที่มีการเรียงตัวของเส้นใยแบบสุ่มหลายทิศทาง สำหรับการทดลองแรงดึง	57
3.36 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงานภายใต้แรงดึงเส้นใยแบบสุ่มหลายทิศทางความหนา 1.5 mm	57
3.37 ชิ้นงานที่มีการเรียงตัวของเส้นใยแบบสุ่มหลายทิศทาง สำหรับการทดลองแรงดึง	58
3.38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงานภายใต้แรงดึงเส้นใยแบบสุ่มหลายทิศทางความหนา 2.0 mm	58
3.39 ชิ้นงานที่มีการเรียงตัวของเส้นใยแบบสุ่มหลายทิศทาง สำหรับการทดลองแรงดึง	59
3.40 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงานภายใต้แรงดึงเส้นใยแบบสุ่มหลายทิศทางความหนา 2.5 mm	59
3.41 (ก) เครื่องทดสอบกด (ข) ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบแรงกด	60
3.42 ชิ้นงานที่มีการเรียงตัวของเส้นใยตามแนวยาวของชิ้นงาน สำหรับการทดสอบแรงกด	61
3.43 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงานภายใต้แรงกดตามแนวเส้นใยในทิศทางเดียว 0 องศา	61
3.44 ชิ้นงานที่มีการเรียงตัวของเส้นใยตามแนวขวางของชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงกด	62
3.45 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงานภายใต้แรงกดตามแนวเส้นใยในทิศทางเดียว 90 องศา	62
3.46 ชิ้นงานที่มีการเรียงตัวของเส้นใยตามแนวขวางของชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงกด	63
3.47 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงานภายใต้แรงกดเส้นใยแบบสุ่มหลายทิศทาง	63
3.48 อุปกรณ์การทดสอบแรงเฉือน	64
3.49 ชิ้นงานที่มีการเรียงตัวของเส้นใยตามแนวขวางของชิ้นงานสำหรับการทดลองแรงเฉือน	65
3.50 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงานตามแนวเส้นใยทิศทางเดียว 0 องศา	65

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.51 ชิ้นงานที่มีการเรียงตัวของเส้นใยแบบสุ่มหลายทิศทางของชิ้นงานสำหรับการทดลองแรงเฉือน	66
3.52 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงานภายใต้แรงเฉือนเส้นใยแก้วแบบสุ่มหลายทิศทางความหนา 1.5 mm	66
3.53 ชิ้นงานที่มีการเรียงตัวของเส้นใยแบบสุ่มหลายทิศทางของชิ้นงานสำหรับการทดลองแรงเฉือน	67
3.54 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงานเส้นใยแก้วแบบสุ่มหลายทิศทางความหนา 2.0 mm	67
3.55 ชิ้นงานที่มีการเรียงตัวของเส้นใยแบบสุ่มหลายทิศทางของชิ้นงานสำหรับการทดลองแรงเฉือน	68
3.56 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงานเส้นใยแก้วแบบสุ่มหลายทิศทางความหนา 2.5 mm	68
3.57 อุปกรณ์การทดลองของเครื่องทดสอบ	70
3.58 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลองของเครื่องทดสอบแรงกระแทก	71
4.1 การเสียหายภายใต้ภาระกระทำในแนวแกนแบบกึ่งคงที่ของชิ้นงาน A ที่ระยะยวบตัวต่างๆ (S)	72
4.2 แบบการเสียหายสุดท้ายของชิ้นงาน A	73
4.3 การเสียหายภายใต้ภาระกระทำในแนวแกนแบบกึ่งคงที่ของชิ้นงาน B ที่ระยะยวบตัวต่างๆ (S)	74
4.4 แบบการเสียหายสุดท้ายของชิ้นงาน B	74
4.5 การเสียหายภายใต้ภาระกระทำในแนวแกนแบบกึ่งคงที่ของชิ้นงาน C ที่ระยะยวบตัวต่างๆ (S)	75
4.6 แบบการเสียหายสุดท้ายของชิ้นงาน C	75
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระและระยะยวบตัวภายใต้แรงกระทำกึ่งคงที่ของชิ้นงาน A	77
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระและระยะยวบตัวภายใต้แรงกระทำกึ่งคงที่ของชิ้นงาน B	78

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระและระยะขยุบตัวภายใต้แรงกระทำกึ่งคงที่ ของชิ้นงาน C	79
4.10 การเสียหายของชิ้นงานภายใต้แรงกระแทกของชิ้นงาน A	79
4.11 แบบการเสียหายสุดท้ายของชิ้นงาน A	80
4.12 แบบการเสียหายของชิ้นงานภายใต้แรงกระแทกของชิ้นงาน B	81
4.13 แบบการเสียหายสุดท้ายของชิ้นงาน B	81
4.14 แบบการเสียหายของชิ้นงานภายใต้แรงกระแทกของชิ้นงาน C	82
4.15 แบบการเสียหายสุดท้ายของชิ้นงาน C	82
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระและระยะขยุบตัวภายใต้แรงกระแทก ของชิ้นงาน A	83
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระและระยะขยุบตัวภายใต้แรงกระแทก ของชิ้นงาน B	84
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระและระยะขยุบตัวภายใต้แรงกระแทก ของชิ้นงาน C	85
4.19 การเสียหายภายใต้ภาระกระทำในแนวแกนแบบกึ่งคงที่ของชิ้นงาน ที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนาคือ 1.5 mm	89
4.20 การเสียหายสุดท้ายของชิ้นงานภายใต้ภาระกระทำในแนวแกนแบบกึ่งคงที่ ที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนาคือ 1.5 mm	90
4.21 การเสียหายภายใต้ภาระกระทำในแนวแกนแบบกึ่งคงที่ของชิ้นงาน ที่มีมุมเอียงแตกต่างกัน ความหนาคือ 2.0 mm	91
4.22 การเสียหายสุดท้ายของชิ้นงานภายใต้ภาระกระทำในแนวแกนแบบกึ่งคงที่ ที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนาคือ 2.0 mm	92
4.23 การเสียหายภายใต้ภาระกระทำในแนวแกนแบบกึ่งคงที่ของชิ้นงาน ที่มีมุมเอียงแตกต่างกัน ความหนาคือ 2.5 mm	93
4.24 การเสียหายสุดท้ายของชิ้นงานภายใต้ภาระกระทำในแนวแกนแบบกึ่งคงที่ ที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนาคือ 2.5 mm	94

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.25 การเสียหายภายใต้แรงกระแทกในแนวแกนของชิ้นงานที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนาคือ 1.5 mm	96
4.26 การเสียหายสุดท้ายของชิ้นงานภายใต้แรงกระแทกในแนวแกนของชิ้นงานที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนาคือ 1.5 mm	98
4.27 การเสียหายภายใต้แรงกระแทกในแนวแกนของชิ้นงานที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนาคือ 2.0 mm	99
4.28 การเสียหายสุดท้ายของชิ้นงานภายใต้แรงกระแทกในแนวแกนของชิ้นงานที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนาคือ 2.0 mm	100
4.29 การเสียหายภายใต้แรงกระแทกในแนวแกนของชิ้นงานที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนาคือ 2.5 mm	101
4.30 การเสียหายสุดท้ายของชิ้นงานภายใต้แรงกระแทกในแนวแกนของชิ้นงานที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนาคือ 2.5 mm	102
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระและระยะยุบตัวภายใต้แรงกระทำกึ่งคงที่ของชิ้นงานที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนาคือ 1.5 mm	103
4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระและระยะยุบตัวภายใต้แรงกระทำกึ่งคงที่ของชิ้นงานที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนาคือ 2.0 mm	104
4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระและระยะยุบตัวภายใต้แรงกระทำกึ่งคงที่ของชิ้นงานที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนาคือ 2.5 mm	104
4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระและเวลา ภายใต้แรงกระแทกของชิ้นงานที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนาคือ 1.5 mm	105
4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระและเวลา ภายใต้แรงกระแทกของชิ้นงานที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนาคือ 2.0 mm	106
4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระและเวลา ภายใต้แรงกระแทกของชิ้นงานที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนาคือ 2.5 mm	106

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
E_1	ค่าโมดูลัสตามยาวระนาบ 1	[GPa]
E_2	ค่าโมดูลัสตามขวางระนาบ 2	[GPa]
E_3	ค่าโมดูลัสตามขวางระนาบ 3	[GPa]
G_{12}	ค่าโมดูลัสเฉือนในระนาบ 1-2	[GPa]
G_{23}	ค่าโมดูลัสเฉือนนอกระนาบ 2-3	[GPa]
G_{13}	ค่าโมดูลัสเฉือนในระนาบ 1-3	[GPa]
ν_{12}	ค่าอัตราปัวซอง ระนาบ 1-2	-
ν_{13}	ค่าอัตราปัวซอง ระนาบ 1-3	-
ν_{23}	ค่าอัตราปัวซอง ระนาบ 2-3	-
ρ	ค่าความหนาแน่น	[Kg/m ³]
X_t	ค่าความต้านทานแรงดึงตามแนวเส้นใย	[MPa]
X_c	ค่าความต้านทานแรงกดตามแนวเส้นใย	[MPa]
Y_t	ค่าความต้านทานแรงดึงตามขวางเส้นใย	[MPa]
Y_c	ค่าความต้านทานแรงกดตามขวางเส้นใย	[MPa]
S_{12}	ค่าความต้านทานแรงเฉือน ระนาบ 1-2	[MPa]
S_{23}	ค่าความต้านทานแรงเฉือนนอกระนาบ 2-3	[MPa]
P_{min}	ภาระน้อยที่สุด (Minimum Load)	[N]
P_{max}	ภาระสูงสุด (Maximum Load)	[N]
P_{mean}	ภาระเฉลี่ย (Mean Crushing Load)	[N]
E_{max}	พลังงานสูงสุด (Maximum Energy)	[N.m]
E_a	พลังงานดูดซับเฉลี่ย (Average Energy Absorption)	[N.m]
E_s	พลังงานดูดซับจำเพาะ (Specific Energy Absorption)	[N.m/kg]
S	ระยะยุบตัวของชิ้นงานตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดการยุบตัว	[mm, m]
dS	การเปลี่ยนแปลงระยะยุบตัวของชิ้นงาน	[mm, m]
h	ระยะยุบตัวของชิ้นงานจากภาระการกระแทก	[mm, m]
V	ความเร็ว (Velocity)	[m/s]

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

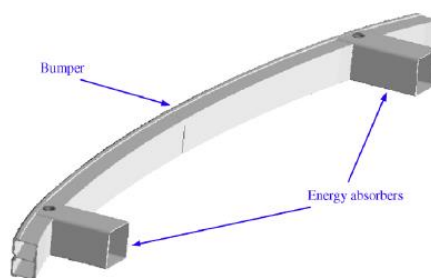
สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
$Mass$	มวล	[kg]
A	พื้นที่ (Area)	[m ²]
σ	ความเค้นทางวิศวกรรม (Engineering Stress)	[N/m ² , Pa]
F	ค่าแรงที่กระทำตามแนวแกน	[N]
ε	ค่าความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering Strain)	-

บทที่ 1

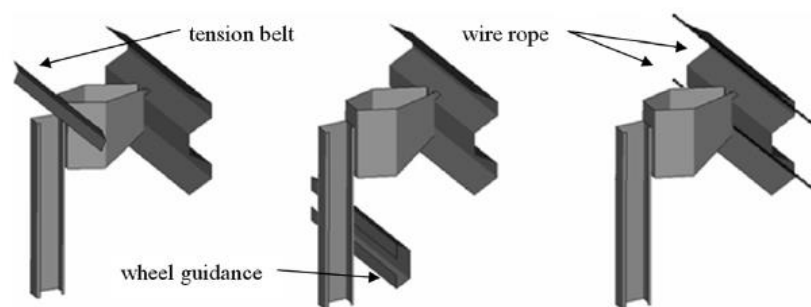
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ปัจจุบันการพัฒनावัสดุได้เป็นไปอย่างต่อเนื่องซึ่งวัสดุประกอบเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายทั้งในอุตสาหกรรมการบิน อวกาศ และรถยนต์ เนื่องจากคุณสมบัติทางกลของวัสดุประกอบมีค่าอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง (high strength weight ratio) สามารถปรับความแข็งแรงตามทิศทางที่รับภาระได้ จึงทำให้วัสดุประกอบถูกนำมาประยุกต์เป็นโครงสร้างร่วมส่วนหน้าของรถยนต์ ดังตัวอย่างในภาพที่ 1.1 (ก) ในการป้องกันความเสียหายของโครงสร้างห้องผู้โดยสารภายใต้การชน ซึ่งบริเวณดังกล่าวเป็นบริเวณที่สร้างอันตรายแก่ผู้โดยสารรถยนต์จากแรงกระแทกที่อาจเกิดขึ้น ในกรณีที่เกิดการชนพลังงานที่เกิดจากการชนจะทำให้โครงสร้างเกิดการยุบตัว พลังงานจะถูกถ่ายเทมายังห้องผู้โดยสารตามโครงสร้างที่ยุบตัวเข้ามา กระแทก สร้างอันตรายต่อผู้โดยสารมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับพลังงานที่เหลืออยู่ การพัฒนาโครงสร้างให้มีความปลอดภัยอย่างสูง เนื่องจากการแรงจากการชนหรือแรงกระแทกของยานพาหนะ และโครงสร้างป้องกันความปลอดภัยตามริมถนน เช่น แผงกั้นบริเวณทางโค้ง ดังภาพที่ 1.1 (ข) แผงกั้นบริเวณขอบสะพาน และป้ายสัญญาณ เป็นสิ่งสำคัญ การทำให้โครงสร้างเหล่านี้แข็งแรงขึ้นเพื่อลดความเสี่ยงของอุบัติเหตุ ซึ่งทำให้เกิดความสูญเสียชีวิตของผู้ขับขี่ ดังนั้นในการออกแบบทางด้านการกระแทกของโครงสร้าง ตัวแปรที่มีความสำคัญ ได้แก่ แรงสูงสุดที่มีค่าน้อยที่สุดและความสามารถในการดูดซับพลังงานที่มีค่าสูงสุดของโครงสร้างเป็นสิ่งที่ต้องการ นอกจากนี้ผู้ออกแบบยังต้องพยายามเลือกใช้นาโด รูปร่าง ชนิดวัสดุ และพฤติกรรมความเสียหายของโครงสร้างให้เป็นตามความต้องการตามเงื่อนไขของตัวแปรดังกล่าวข้างต้น



(ก) ตัวดูดซับพลังงานที่เสริมในกันชนรถยนต์



(ข) ลักษณะการเสริมแรงของแพ่งกั้นบนริมถนน

ภาพที่ 1.1 แสดงตัวดูดซับพลังงานทำหน้าที่ดูดซับพลังงานของโครงสร้างจากแรงกระแทก

โดยทั่วไปโครงสร้างยานพาหนะ มักจะทำด้วยโลหะ แต่ข้อเสียของวัสดุเหล่านี้ เมื่อถูกใช้ไประยะหนึ่ง จะเกิดการชำรุดและพังทลายไป อีกทั้งต้นทุนที่ใช้ในการผลิตค่อนข้างสูง ดังนั้นวัสดุประกอบเสริมแรง (Fiber reinforced composite, FRP) จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ซึ่งวัสดุเหล่านี้มีคุณสมบัติที่สำคัญ คือ น้ำหนักเบา ความแข็งแรง ความสามารถในการดูดซับพลังงานสูง ทนต่อแรงกระทำซ้ำๆ ได้ดี ทนต่อการกัดกร่อน ไม่เหนียวหนาทึบ ไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก เป็นต้น การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของท่อไฟเบอร์กลาสภายใต้แรงกระทำแบบกึ่งคงที่และกระแทกในแนวแกน ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองถูกขึ้นรูปด้วยมือ (Hand lay-up) โดยมีลักษณะมุมไขว้ที่แตกต่างกัน โดยการศึกษาแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของเส้นใยแก้วต่อพลังงานดูดซับ ลักษณะการเสียหายของชิ้นงาน และความสามารถในการดูดซับพลังงานจำเพาะ อีกทั้งยังเป็นการสร้างมาตรฐานของการผลิตและออกแบบโครงสร้างยานพาหนะต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อหาคุณสมบัติวัสดุทางวิศวกรรมของวัสดุประกอบเสริมแรง FRP
- 1.2.2 เพื่อหาความสามารถการดูดซับพลังงานและกลไกความเสียหายของท่อที่ทำด้วยวัสดุประกอบเสริมแรง ที่มีจำนวนด้านแตกต่างกัน
- 1.2.3 เพื่อศึกษาตัวแปรที่สำคัญ เช่น ความหนาและ มุมเฉียงของท่อ
- 1.2.4 เพื่อหาประสิทธิภาพของแรงระหว่างแรงสูงสุดต่อแรงเฉลี่ยและค่าการดูดซับพลังงานจำเพาะ
- 1.2.5 เพื่อศึกษาผลตอบสนองระหว่างแรงและระยะยุบตัวของท่อ

1.2.6 เพื่อทำการเปรียบเทียบท่อน้ำตัดสี่เหลี่ยมในแต่ละรูปร่างที่มีจำนวนด้านแตกต่างกัน ที่มีค่าประสิทธิภาพของแรงและค่าการดูดซับพลังงานจำเพาะดีที่สุด

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาตัวแปรและการดูดซับพลังงานของท่อน้ำตัดสี่เหลี่ยมทรงรีเว้าที่ทำด้วยวัสดุประกอบเสริมแรง ภายใต้แรงกดตามแนวแกนแบบสถิตยศาสตร์ ซึ่งขอบเขตของโครงการวิจัยนี้ประกอบด้วย

1.3.1 กรณีแรงที่กระทำแบบกึ่งคงที่

1.3.1.1 ความเร็วในการกด คือ 10 mm/min

1.3.1.2 ระยะยุบของชิ้นงานทรงกรวยคือ 180 mm และทรงกระบอก 60 mm

1.3.1.3 ชิ้นงานถูกวางบนเครื่องทดสอบโดยไม่มีอุปกรณ์จับยึดที่ฐาน

1.3.1.4 เป็นการกดในแนวแกนด้วยแรงที่กระทำแบบกึ่งคงที่

1.3.2 กรณีแรงกระแทก

1.3.2.1 ความเร็วในการกระแทก คือ 7 m/s

1.3.2.2 ระยะห่างของค้อนก่อนปล่อยคือ 2.5 m

1.3.2.3 ชิ้นงานถูกวางบนเครื่องทดสอบโดยไม่มีอุปกรณ์จับยึดที่ฐาน

1.3.2.4 น้ำหนักของหัวค้อนกรณีทรงกรวยคือ 30 kg และกรณีทรงกระบอก 45 kg

1.3.3 ชิ้นงานทดลอง

1.3.3.1 ทรงกรวย

1) ท่อน้ำตัดสี่เหลี่ยม ทำด้วยวัสดุประกอบเสริมแรง FRP ประเภท เส้นใยแก้ว (Fiber glass) ผสมเรซิน โพลีเอสเตอร์ ซึ่งเป็นวัสดุประกอบที่นิยมใช้ในทางวิศวกรรม

2) การขึ้นรูปของท่อที่ทำด้วยวัสดุประกอบเสริมแรง จะทำโดยใช้มือ (Hand lay-up technique)

3) ท่อน้ำตัดสี่เหลี่ยมมีขนาดคือ ความกว้างคือ 50 mm. ความยาวคือ 100 mm ความสูงคือ 300 mm ความหนา 1.5, 2.0 และ 2.5 mm มุมเฉียงเท่ากับ 5, 10 และ 15 องศา

1.3.3.2 ทรงกระบอก

1) ชิ้นงานมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกคือ 50 mm. ความยาวคือ 100 mm. หนา 2 mm.

2) ชิ้นงานที่ใช้ทดลองมีมุมไขว้แตกต่างกัน 3 แบบ คือ ชิ้นงาน A มีมุมไขว้ $[(0/90)/(0/90)/(0/90)]$ ชิ้นงาน B มีมุมไขว้ $[(45/-45)/(45/-45)/(45/-45)]$ และชิ้นงาน C มีมุมไขว้ $[(45/-45)/(0/90)/(45/-45)]$ ตามลำดับ

1.3.4 ตัวแปรที่สำคัญในการศึกษา ได้แก่ ความหนาและ มุมเฉียงของท่อ

1.3.5 ผลการทดลองที่ได้รับ ประกอบด้วย ผลตอบสนองระหว่างแรงกดกับระยะยุบตัวของท่อและศึกษากลไกความเสียหายเนื่องจากการชนของท่อ

1.3.6 หาประสิทธิภาพของแรงคือแรงสูงสุดต่อแรงเฉื่อยและค่าการดูดซับพลังงานจำเพาะ

1.3.7 เปรียบเทียบความสามารถการดูดซับพลังงานจำเพาะและประสิทธิภาพของแรงของท่อที่มีด้านแตกต่างกัน

1.3.8 การสร้างแบบจำลองด้วย FEA โดยใช้โปรแกรม ABAQUS ใช้เฉพาะกับท่อทรงกระบอกเท่านั้น

1.4 ผลสำเร็จและความคุ้มค่าของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ตัวดูดซับพลังงานที่มีค่าการดูดซับพลังงานและประสิทธิภาพของแรงที่สูง

1.4.2 เป็นแนวทางในการออกแบบของวิศวกร ที่จะใช้ในการออกแบบเกี่ยวกับปัญหาของแรงกระแทก เช่น การชนของยานพาหนะ ที่จะช่วยลดการเสียชีวิตของผู้ขับขี่

1.4.3 ได้ตัวดูดซับพลังงานที่มีน้ำหนักเบาและความแข็งแรงสูง

บทที่ 2

ข้อมูลพื้นฐาน ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุประกอบ (Composites material) [1]

ปัจจุบันพัฒนาการด้านวัสดุได้เป็นไปอย่างต่อเนื่อง นอกจากกลุ่มพอลิเมอร์ โลหะและเซรามิกแล้ว ยังมีวัสดุที่สามารถจัดได้เป็นอีกกลุ่มใหญ่เพิ่มเติมจากสามกลุ่มหลักข้างต้นคือกลุ่ม วัสดุประกอบ คือ “วัสดุที่เกิดจากการรวมกันหรือผสมกันขององค์ประกอบ (จุลภาคหรือมหภาค) ที่มีสมบัติทางเคมีและโครงสร้างที่ต่างกันตั้งแต่สององค์ประกอบขึ้นไป” ซึ่งองค์ประกอบที่มาผสมกันเหล่านั้นจะไม่ละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน โดยวัสดุประกอบที่ได้เป็นวัสดุที่มีโครงสร้างใหม่ซึ่งโดยทั่วไปและจะมีสมบัติที่ดีกว่าวัสดุต้นทางที่นำมาผสมกัน

วัตถุประสงค์ของการทำวัสดุประกอบเพื่อให้ได้มาซึ่งวัสดุที่มีสมบัติรวมเหนือกว่าสมบัติของแต่ละองค์ประกอบ หรือเป็นไปตามต้องการโดยไม่สามารถหาได้จากการใช้องค์ประกอบใดองค์ประกอบหนึ่งเพียงองค์ประกอบเดียว องค์ประกอบในวัสดุประกอบที่สำคัญแบ่งออกเป็น

2 ส่วนคือ เมทริกซ์ (Matrix) และส่วนเสริมแรง (Reinforcement) ประโยชน์ของวัสดุประกอบสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายทั้งในอุตสาหกรรมการบิน กีฬา ก่อสร้าง เคมีและอื่นๆ

2.2 เมทริกซ์และวัสดุเสริมแรง (Matrices and Reinforcements)

2.2.1 เมทริกซ์ (Matrices)

เมทริกซ์คือวัสดุหรือองค์ประกอบของวัสดุประกอบที่มีเฟสต่อเนื่อง โดยทั่วไปสำหรับวัสดุประกอบแล้วจะมีปริมาณมากกว่าส่วนเสริมแรง แต่ก็ไม่เสมอไป เมทริกซ์ทำหน้าที่ทั้งเป็นที่อยู่ ปกป้องและยึดเหนี่ยวส่วนเสริมแรงรวมทั้งถ่ายทอดภาระจากภายนอกที่กระทำไปยังส่วนเสริมแรงซึ่งส่วนใหญ่รับภาระได้มากกว่าส่วนของเมทริกซ์ วัสดุที่ใช้ทำเมทริกซ์ เช่น พอลิเมอร์ โลหะ เซรามิก และคาร์บอน เป็นต้น สำหรับกลุ่มพอลิเมอร์ที่ใช้ทำเมทริกซ์ประกอบด้วยทั้ง เทอร์โมเซต (thermosets) เทอร์โมพลาสติก (thermoplastics) และยาง (rubbers) ซึ่งข้อมูลเปรียบเทียบสมบัติของเทอร์โมเซตและเทอร์โมพลาสติกดังแสดงในตารางที่ 2.1 แต่ละกลุ่มของเมทริกซ์ข้างต้นสามารถเลือกใช้วัสดุได้หลายๆ ชนิดเช่น

2.2.1.1 กลุ่มเทอร์โมเซต ได้แก่ อีพอกซี พอลิเอสเตอร์ พอลิไอไมด์ และฟีนอลิก เป็นต้น ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมเซต

2.2.1.2 กลุ่มเทอร์โมพลาสติก ได้แก่ แกะกรีติก ไนลอน พอลิสไตรีน พอลิเอทิลีน และพอลิอีเธอร์อีเธอร์คีโตน เป็นต้น

2.2.1.3 กลุ่มยาง ได้แก่ ยางธรรมชาติ และยางสังเคราะห์ ตัวอย่างเช่น ยางบิวทาไดอิน สไตรีน ไอโซพรีน และ ไนไตรล์หรือยางเอ็นบี อาร์ ซึ่งเป็นโคพอลิเมอร์ของอะครีโลไนไตรล์ และบิวทาไดอิน เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบช่วงของสมบัติระหว่างเทอร์โมเซตและเทอร์โมพลาสติก [1]

Properties	Thermosets	Thermoplastics
Young's modulus (GPa)	1.3-6.0	1.0-4.8
Tensile strength (MPa)	20-180	40-190
Flexural toughness $k_{lc} (MPa.m^{\frac{1}{2}})$	0.5-1.0	1.5-6.0
$G_{lc} (kJ / m^{\frac{1}{2}})$	0.02-0.2	0.7-6.5
Maximum service temperature (°C)	50-450	25-230

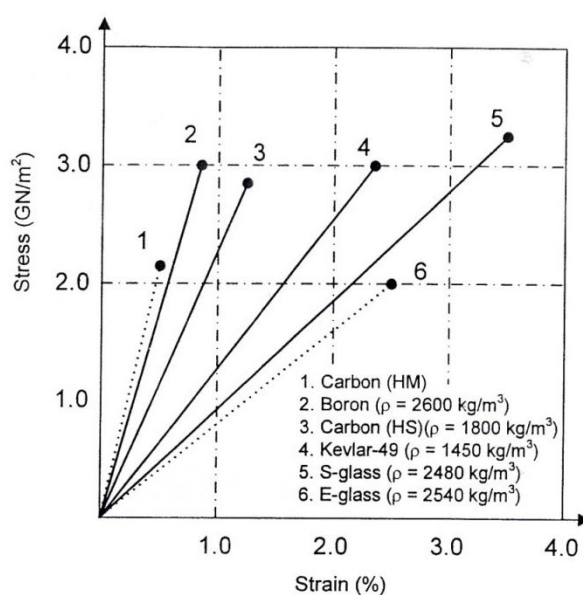
ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบสมบัติของเทอร์โมเซตต่างๆ [1]

Properties	Epoxy	Polyester	Phenolics	Polyamides
Density (Mg / m^3)	1.1-1.4	1.1-1.5	1.3	1.2-1.9
Young's modulus (GPa)	2.1-6.0	1.3-4.5	4.4	3-3.1
Tensile strength (MPa)	35-90	45-85	50-60	80-190
Flexural toughness $k_{lc} (MPa.m^{\frac{1}{2}})$	0.6-1.0	0.5	-	-
$G_{lc} (kJ / m^{\frac{1}{2}})$	0.02	-	-	0.3-0.39
Thermal expansion ($(10^{-6} K^{-1})$)	55-110	100-200	45-110	14-90
Glass trans. Temp. (°C)	120-190	-	-	-

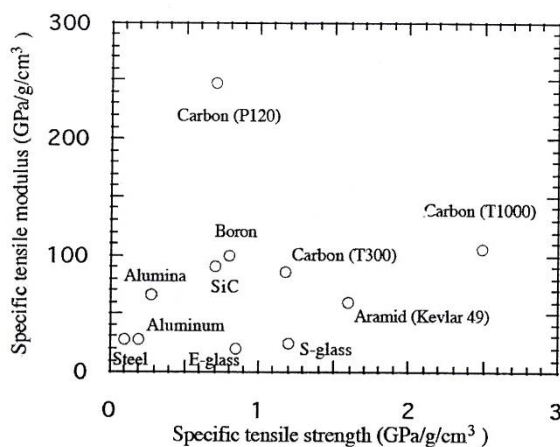
2.2.2 ส่วนเสริมแรง (Reinforcements)

เป็นวัสดุหรือตัวเติมที่ใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของเมทริกซ์ เช่น ความแข็ง (hardness) ความแข็งแรง (strength) และความแข็งเกร็ง (stiffness) ให้เพิ่มขึ้นซึ่งบางครั้งเรียกว่วัสดุหรือตัวเติมนี้อา่ตัวเสริมประสิทธิภาพหรือเสริมแรง (reinforcement) ถ้าบรรจุวัสดุประสงค้ข้างต้นซึ่งเป็นได้ทั้งสารเคมีที่มีอนุภาคที่เล็กมากและเส้นใยเสริมแรงต่างๆ แต่บางกรณีพบว่าสัดส่วนที่เติมลงในเมทริกซ์น้อยกว่าส่วนของเมทริกซ์ มักเรียกกันทั่วไปว่า ตัวเติมไม่เสริมประสิทธิภาพหรือไม่เสริมแรง (inert filler or non-reinforcing filler) นิยมใช้เพื่อลดต้นทุนการผลิต ได้แก่ ดินขาว (clay) แป้ง แคลเซียมคาร์บอเนต โลหะที่เติมลงในเมทริกซ์ของเซรามิก ตลอดจนยางที่เติมในพลาสติก เป็นต้น

ในด้านการใช้งานแล้ววัสดุประกอบที่สำคัญที่สุดได้แก่วัสดุประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใย เส้นใยที่ใช้มีหลากหลายชนิดดังตัวอย่างของเส้นใยและสมบัติแสดงไว้ในภาพที่ 2.1 จุดมุ่งหมายของการทำวัสดุประกอบประเภทนี้เพื่อให้ความแข็งแรงและแข็งเกร็งสูงในน้ำหนักอันจำกัด โดยมักแสดงในรูปของความแข็งแรงจำเพาะ (specific strength) และความแข็งเกร็งหรือมอดูลัสจำเพาะ (specific stiffness or modulus) ดังแสดงในภาพที่ 2.2 ดังนั้นวัสดุประกอบที่มีความแข็งแรงและแข็งเกร็งจำเพาะสูงสามารถทำจากเมทริกซ์และเส้นใยที่มีน้ำหนักเบาได้ อย่างไรก็ตามความยาวของเส้นใยและการจัดเรียงตัวเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อสมบัติของวัสดุประกอบเช่นกัน



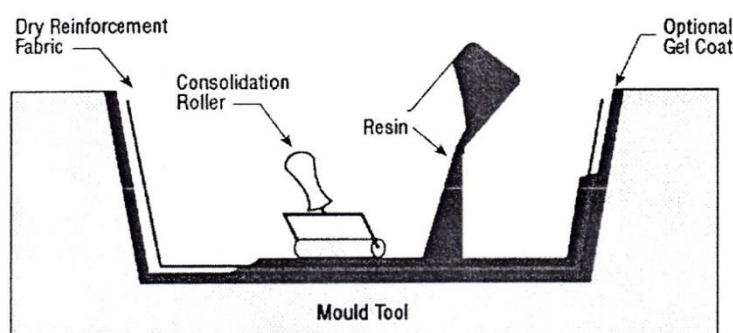
ภาพที่ 2.1 เปรียบเทียบเส้นใยเสริมแรงชนิดต่างๆ [1]



ภาพที่ 2.2 ความแข็งแรงและความแข็งเกร็งจำเพาะของวัสดุที่ทำจากเส้นใยชนิดต่างๆ [1]

2.3 การขึ้นรูปแบบทาด้วยมือ (Hand Lay-up Molding)

เป็นการบวนการขึ้นรูปที่ทำได้ง่าย ต้นทุนถูกแต่เป็นกระบวนการที่ใช้เวลาและแรงงานมาก สามารถทำได้โดยการวางส่วนเสริมแรง (โดยทั่วไปเป็นเส้นใย) ลงในแม่พิมพ์และทาทับด้วยเรซินพร้อมกับใช้ลูกกลิ้งรีดให้เรซินซึมผ่านลงในช่องว่างของตัวเสริมแรง ดังแสดงในภาพที่ 2.3 การขึ้นรูปสามารถทำซ้ำๆ หลายๆ ชั้นเพื่อให้ได้ความหนาตามที่ต้องการ ในการทำวัสดุประกอบใช้สำหรับอากาศยานมักใช้วิธีนี้ในการขึ้นรูปเบื้องต้นก่อนใช้เครื่องอัดความดันและความร้อน หรือห้องบ่มอัดความดัน (autoclave) ต่อไป วิธีการนี้ยังมีข้อดีในเรื่องการจัดเรียงเส้นใยที่ทำได้ง่าย ตลอดถึงทำชิ้นงานที่รูปทรงซับซ้อนได้ แต่ส่วนใหญ่มักจะใช้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์วัสดุคอมพอสิตทั่วไป เช่น เรือไฟเบอร์กลาสและอ่างอาบน้ำ เป็นต้น



ภาพที่ 2.3 การขึ้นรูปแบบทาด้วยมือและตัวอย่างชิ้นงาน [1]

2.3.1 ขั้นตอนการขึ้นรูป

2.3.1.1 เตรียมแม่แบบโดยการล้างทำความสะอาดผิวหน้าด้วยน้ำหรือผ้าเช็ดทำความสะอาดก็ได้ แล้วปล่อยให้แห้ง

2.3.1.2 ขัดผิวหน้าด้วยขี้ผึ้งขัดผิว เพื่อให้ผิวหน้ามันเรียบ

2.3.1.3 ทาและขัดขี้ผึ้ง เพื่อให้ผิวหน้าเรียบและมันยิ่งขึ้น และทำหน้าที่เป็นตัวถอดแบบขึ้นต้นด้วย

2.3.1.4 ทาหรือพ่นสีผิวหน้าเจลโค้ดแล้วทิ้งให้แข็งตัว

2.3.1.5 วางผืนใยแก้วทับลงไป

2.3.1.6 ใช้แปรงหรือลูกกลิ้งจุ่มโพลีเอสเตอร์เรซินที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาแล้ว ทาหรือกลิ้งไปบนผืนใยแก้วให้ทั่ว ทิ้งให้โพลีเอสเตอร์เรซินแข็งตัวจึงตัดขอบ แล้วใช้ผ้าทรายลูบผิวด้านหยาบให้เรียบ

2.3.1.7 หากต้องการให้ชิ้นงานมีความหนาและความแข็งแรงมากขึ้น ให้วางผืนใยแก้วทับลงไปอีกและทาหรือกลิ้งโพลีเอสเตอร์เรซินจนทั่ว สลับกันจนได้ความหนาที่ต้องการแล้ว ปล่อยให้แห้งให้แข็งตัว

2.3.1.8 ตัดขอบใยแก้วที่ยื่นออกมาจากแม่แบบ

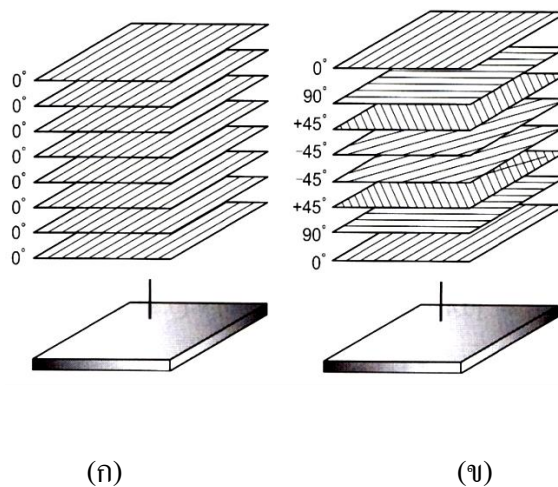
2.3.1.9 เมื่อชิ้นงานแข็งตัวได้ที่แล้วจึงถอดชิ้นงานออกจากแม่แบบ โดยใช้ลิ้มไม้ น้ำอัด หรือลมอัด

2.3.1.10 ขัดตกแต่งขอบชิ้นงานให้เรียบ แล้วนำไปประกอบหรือต่อเติมชิ้นส่วนอื่นๆ

2.4 การจัดเรียงตัวของเส้นใย [2]

การเรียงตัวของเส้นใยภายในเมทริกซ์นั้นทำได้หลายวิธีด้วยกัน กรณีเส้นใยที่มีขนาดสั้น และเรียงตัวในเมทริกซ์ไม่เป็นระเบียบ จะทำให้ค่าอัตราส่วนของความยาวต่อความโตต่ำ แต่การผลิตของวัสดุจะทำได้ง่าย โดยเฉพาะขั้นตอนการใส่เส้นใยลงในเมทริกซ์ อีกทั้งการกระจายตัวของความแข็งแรงก็จะมีอย่างสม่ำเสมอตลอดในเนื้อของวัสดุผสมด้วย

เส้นใยที่ยาวต่อเนื่องและเรียงตัวกันในทิศทางเดียวจะให้คุณสมบัติการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอทั่วทุกด้าน หากเราต้องการวัสดุที่ต้องการรับแรงหลายๆทิศทาง เราสามารถทำได้โดยจัดเรียงทิศทางของเส้นใยที่มีมุมแตกต่างกัน โดยใช้ใยที่มีความยาวต่อเนื่อง ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 (ก) การเรียงตัวกันของเส้นใยในทิศทางเดียว (ข) การเรียงตัวของเส้นใยในทิศทางต่างกันเพื่อกระจายความแข็งแรงให้กับทุกๆด้าน [2]

2.5 กลศาสตร์ของวัสดุประกอบ (Mechanics of Composites)

2.5.1 สัดส่วนน้ำหนักและสัดส่วนปริมาตร (Weight and Volume Fractions)

สมบัติโดยรวมส่วนใหญ่ของวัสดุประกอบเกี่ยวข้องโดยตรงกับทั้งสมบัติและปริมาณของแต่ละองค์ประกอบที่ประกอบขึ้นเป็นวัสดุประกอบนั้น สำหรับสัดส่วนน้ำหนัก (Weight fraction, w_p) นั้นทั่วไปใช้ประโยชน์ในการเตรียมปริมาณสาร ในการขึ้นรูปแต่สำหรับสัดส่วนปริมาตร (volume fraction, v_p) มักใช้ในการวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของวัสดุประกอบมากกว่าการใช้สัดส่วนน้ำหนัก และสัดส่วนปริมาตรสัมพันธ์กับน้ำหนัก (W) และปริมาตร (V) ของแต่ละองค์ประกอบ เมื่อ c แทนวัสดุประกอบ f แทนส่วนเสริมแรง และ m แทนเมทริกซ์ ดังนั้น

$$w_f = \frac{W_f}{W_c} \quad \text{และ} \quad w_m = \frac{W_m}{W_c} \quad (2.1)$$

และ

$$v_f = \frac{V_f}{V_c} \quad \text{และ} \quad v_m = \frac{V_m}{V_c} \quad (2.2)$$

จะได้ว่า

$$w_f + w_m = 1 \quad (2.3)$$

และ

$$V_f + V_m = 1 \quad (2.4)$$

โดยที่	w_f	คือ สัดส่วนน้ำหนักของเส้นใย
	w_m	คือ สัดส่วนน้ำหนักของเมทริกซ์
	V_f	คือ สัดส่วนปริมาตรของเส้นใย
	V_m	คือ สัดส่วนปริมาตรของเมทริกซ์
	W_f	คือ น้ำหนักของเส้นใย
	W_c	คือ น้ำหนักของวัสดุประกอบ
	w_m	คือ น้ำหนักของเมทริกซ์
	V_f	คือ ปริมาตรของเส้นใย
	V_c	คือ ปริมาตรของวัสดุประกอบ
	V_m	คือ ปริมาตรของเมทริกซ์

สัดส่วนน้ำหนักและสัดส่วนปริมาตรสามารถโยงความสัมพันธ์ด้วยความหนาแน่นจาก

$$W_c = W_f + W_m \quad (2.5)$$

และ

$$W = \rho V \quad (2.6)$$

ดังนั้น

$$\rho_c V_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad (2.7)$$

$$\rho_c = \rho_f \left(\frac{V_f}{V_c} \right) + \rho_m \left(\frac{V_m}{V_c} \right) \quad (2.8)$$

$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad (2.9)$$

โดยที่ ρ_c คือ ความหนาแน่นของวัสดุประกอบ

ρ_f คือ ความหนาแน่นของเส้นใย

ρ_m คือ ความหนาแน่นของเมทริกซ์

และจาก

$$V_c = V_f + V_m \quad (2.10)$$

จากสมการ (2.10) จะได้

$$\frac{W_c}{\rho_c} = \frac{W_f}{\rho_f} + \frac{W_m}{\rho_m} \quad (2.11)$$

หรือ

$$\frac{1}{\rho_c} = \frac{w_f}{\rho_f} + \frac{w_m}{\rho_m} \quad (2.12)$$

จากสมการ (2.4) และ (2.12) จะได้ว่า

$$V_f = \frac{w_f \rho_c}{\rho_f} s \quad (2.13)$$

และ

$$V_m = \frac{w_m \rho_c}{\rho_m} \quad (2.14)$$

2.5.2 กลศาสตร์จุลภาคของวัสดุประกอบ (Micromechanics of Composite Materials)

2.5.2.1 กลศาสตร์จุลภาคสำหรับความแข็งแรงของวัสดุประกอบเสริมแรงด้วยเส้นใย (Micromechanics For Fiber Reinforced Composites)

ในเบื้องต้นนี้จะวิเคราะห์ถึงกลศาสตร์จุลภาคสำหรับความแข็งแรง (Stiffness) ของวัสดุประกอบที่ประกอบขึ้นจากการเสริมแรงด้วยเส้นใยวางในทิศใดทิศหนึ่งเพียงทิศเดียว (unidirectional Composites) เพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์ขั้นสูงของวัสดุประกอบที่มีการจัดเรียงเส้นใยในหลายทิศทางและหลายๆชั้น (laminated Composites) ต่อไป

กลศาสตร์จุลภาคสำหรับความแข็งแรงตามแนวแกนเส้นใย (Micromechanics for longitudinal stiffness) แบบจำลองการวิเคราะห์ดังแสดงในภาพที่ 2.5 สมมติให้เมทริกซ์และเส้นใยสร้างพันธะยึดเหนี่ยวกันแบบสมบูรณ์ (Perfect Bonding) โดยไม่มีการลื่นไถลของผิวสัมผัสแยกจากกันเมื่อ P_c คือแรงที่กระทำกับหน้าตัด σ คือความเค้น และ A คือพื้นที่หน้าตัดจากแบบจำลองข้างต้นความเครียดที่เกิดขึ้นในวัสดุประกอบ ความเครียดในเส้นใย และความเครียดในเมทริกซ์มีค่าเท่ากัน จากแบบจำลองข้างต้นเขียนความสัมพันธ์ได้

$$\epsilon_c = \epsilon_f = \epsilon_m \quad (2.15)$$

โดยที่

ϵ_c คือ ความเครียดที่เกิดขึ้นในวัสดุประกอบ

ϵ_f คือ ความเครียดในเส้นใย

ϵ_m คือ ความเครียดในเมทริกซ์

ภาระที่กระทำต่อเส้นใยและภาระที่กระทำต่อเมทริกซ์ดังแสดงในสมการที่ (2.16) และ (2.17) ตามลำดับ

$$P_f = \sigma_f A_f \quad (2.16)$$

$$P_m = \sigma_m A_m \quad (2.17)$$

โดยที่ P_f คือ ภาระที่กระทำต่อเส้นใย
 P_m คือ ภาระที่กระทำต่อเมทริกซ์
 P_c คือ ภาระที่กระทำต่อวัสดุประกอบ

ส่วนภาระที่กระทำต่อวัสดุประกอบ เขียนได้เป็น

$$P_c = \sigma_c A_c \quad (2.18)$$

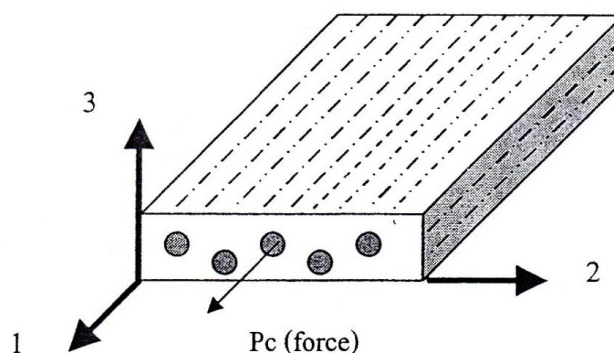
เมื่อระบบอยู่ในภาวะสมดุล

$$P_c = P_f + P_m \quad (2.19)$$

ดังนั้น

$$\sigma_c A_c = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \quad (2.20)$$

$$\sigma_c = \frac{\sigma_f A_f}{A_c} + \frac{\sigma_m A_m}{A_c} \quad (2.21)$$



ภาพที่ 2.5 แบบจำลองการวิเคราะห์กลศาสตร์จุลภาคตามแนวแกนของเส้นใย [2]

สำหรับเส้นใยความยาวเท่ากันและวางในแนวเดียวกันสัดส่วนพื้นที่ของเส้นใยเท่ากับสัดส่วนของปริมาตรดังนั้น

$$V_f = \frac{A_f}{A_c} \text{ และ } V_m = \frac{A_m}{A_c} \quad (2.22)$$

จะได้ว่า

$$\sigma_c = \sigma_c V_f + \sigma_m V_m \quad (2.23)$$

เมื่อการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear elastic) และ E_c คือมอดุลัสของวัสดุประกอบตามแนวแกนเส้นใย ส่วน E_f คือ มอดุลัสของเส้นใยตามแนวแกน และ E_m คือมอดุลัสของเมทริกซ์จะได้

$$\sigma_c = E_c \epsilon_c, \sigma_f = E_f \epsilon_f, \sigma_m = E_m \epsilon_m \quad (2.24)$$

นำสมการ (2.24) แทนใน (2.23) จะได้ว่า

$$E_c \epsilon_c = E_f \epsilon_f V_f + E_m \epsilon_m V_m \quad (2.25)$$

เมื่อ $\epsilon_c = \epsilon_f = \epsilon_m$ ดังนั้น

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \quad (2.26)$$

ซึ่งสมการ (2.26) อยู่ในรูปเดียวกับสมการของผสมดังที่กล่าวมาแล้วและเมื่อวัสดุประกอบมีองค์ประกอบของเส้นใยและเมทริกซ์มากกว่าอย่างละหนึ่งองค์ประกอบ สามารถเขียนเป็นสมการทั่วไปได้เป็น

$$E_c = \sum_i E_f V_f + \sum_j E_m V_m \quad (2.27)$$

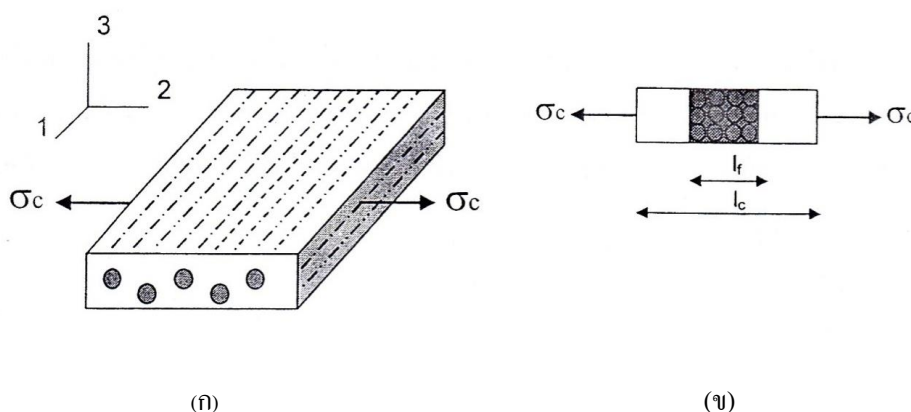
หมายเหตุ: สำหรับสมการ (2.27) จะใช้ได้กับการทำนายผลจากการทดสอบสมบัติการดึงที่เส้นใยที่ยึดตัวเมื่อมีการกระทำ แต่ในกรณีการอัดแล้วก่อให้เกิดการยุบตัวของเส้นใย (misalignment) ส่งผลให้การทำนายคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริงมาก

กลศาสตร์จุลภาคสำหรับความแข็งแรงตามแนวขวางแกนเส้นใย (Micromechanics for transverse stiffness) เมื่อพิจารณาถึงแรงหรือความเค้น σ_c ที่กระทำต่อวัสดุประกอบในแนวขวางกับแกนเส้นใยดังแบบจำลองแสดงในภาพที่ 2.6 (ก) ซึ่งเขียนส่วนหน้าตัดแทนใหม่ด้วยแบบจำลอง ดังรูป 2.6 (ข) จากรูปดังกล่าวจะเห็นได้ว่าสัดส่วนความยาวของหน้าตัดเป็นค่าเดียวกับสัดส่วนปริมาตร $\left(\frac{l_f}{l_c} = \frac{v_f}{v_c}\right)$ ในกรณีนี้แรงหรือความเค้นมีค่าคงที่ตลอดความยาวของหน้าตัด ส่วนการยึดตัวตามแนวขวางเขียนได้เป็น

$$\delta_c = \delta_f + \delta_m \quad (2.28)$$

โดยที่ δ_c คือ การยึดตัวตามแนวขวางของวัสดุประกอบ
 δ_f คือ การยึดตัวตามแนวขวางเส้นใย
 δ_m คือ การยึดตัวตามแนวขวางเมทริกซ์

$$\epsilon_c l_c = \epsilon_f l_f + \epsilon_m l_m \quad (2.29)$$



ภาพที่ 2.6 แบบจำลองการวิเคราะห์กลศาสตร์จุลภาคตามแนวขวางกับแกนของเส้นใย [2]

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f \frac{l_f}{l_c} + \varepsilon_m \frac{l_m}{l_c} \quad (2.30)$$

เมื่อ

$$V_f = \frac{l_f}{l_c} \text{ และ } V_m = \frac{l_m}{l_c} \quad (2.31)$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f V_f + \varepsilon_m V_m \quad (2.32)$$

เมื่อการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น $\sigma = E\varepsilon$ ดังนั้น

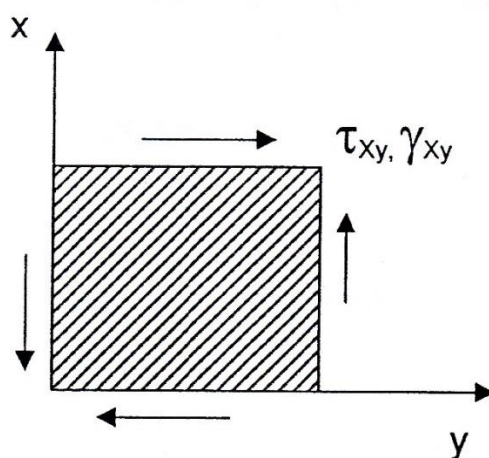
$$\frac{\sigma_c}{E_c} = \frac{\sigma_f}{E_f} V_f + \frac{\sigma_m}{E_m} V_m \quad (2.33)$$

เมื่อ $\sigma_c = \sigma_f = \sigma_m$ ดังนั้น

$$\frac{1}{E_c} = \frac{1}{E_{22}} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \quad (2.34)$$

กลศาสตร์จุลภาคสำหรับความแข็งเกร็งการเฉือน (Micromechanics for shear stiffness) ในทำนองเดียวกับการหามอดูลัสตามแนวขวาง การหามอดูลัสเฉือนสามารถใช้โมเดลแสดงในภาพที่ 2.7 และสมการสำหรับมอดูลัสเฉือน ดังแสดงในสมการที่ (2.35) จะเห็นว่า G_{12} ขึ้นกับ G_m เป็นหลัก (เช่นเดียวกับ E_{22} ที่ขึ้นอยู่กับ E_m นั่นเอง) ในทางปฏิบัติแล้วค่า G_f อาจหาจากการคำนวณด้วยค่า E_f และ V_f

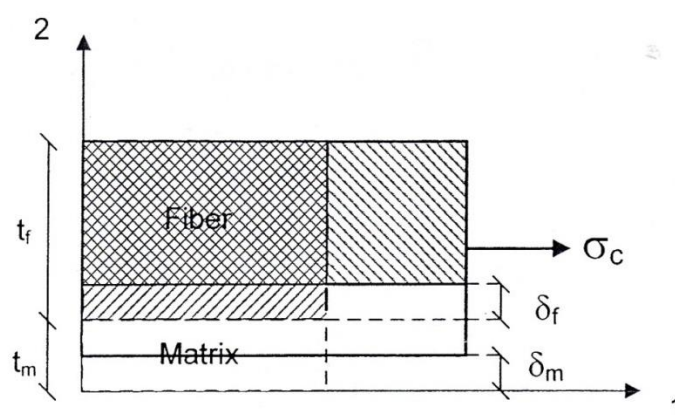
$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{V_f}{G_f} + \frac{V_m}{G_m} \quad (2.35)$$



ภาพที่ 2.7 แบบจำลองการวิเคราะห์กลศาสตร์จุลภาคสำหรับการเฉือน [2]

2.5.2.2 ค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio, ν)

ในการทำนองเดียวกับการหามอดูลัสตามแนวแกนของเส้นใย การหาอัตราส่วนปัวซองสามารถใช้โมเดลดังแสดงในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 แบบจำลองการวิเคราะห์กลศาสตร์จุลภาคสำหรับหาอัตราส่วนปัวซอง [2]

จากแบบจำลองดังรูปจะได้ว่า

$$\delta_f = t_f (\epsilon_{22})_f = -t_f \nu_f \epsilon_f \quad (2.36)$$

$$\delta_m = t_m (\epsilon_{22})_m = -t_m \nu_m \epsilon_m \quad (2.37)$$

$$\delta_c = t_c (\epsilon_{22})_c = -t_c v_c \epsilon_c \quad (2.38)$$

จาก $\delta_c = \delta_f = \delta_m$ และ $\epsilon_c = \epsilon_f = \epsilon_m$

ดังนั้น

$$t_c V_{12} = t_f V_f + t_m V_m \quad (2.39)$$

$$V_{12} = \frac{t_f}{t_c} V_f + \frac{t_m}{t_c} V_m \quad (2.40)$$

เนื่องจาก $\frac{t_f}{t_c} = v_f$ และ $\frac{t_m}{t_c} = v_m$

ดังนั้น

$$V_{12} = v_f V_f + v_m V_m \quad (2.41)$$

2.6 มาตรฐานสากลในการทดสอบรถยนต์ [3]

ในการศึกษาการเสียหายของโครงสร้างยานยนต์นั้น ได้มีการศึกษาวิจัยอย่างจริงจังและแพร่หลายในต่างประเทศ โดยมีมาตรฐานการทดสอบการชนแบบต่างๆ หรือแม้แต่ในการทดสอบการชนจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ นอกจากนี้ในประเทศอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ยังได้มีการกำหนดมาตรฐานในการทดสอบรถยนต์ไว้หลายมาตรฐาน เช่น มาตรฐานด้านความปลอดภัยของสหพันธ์ยานยนต์ (Federal Motor Vehicle Safety Standard, FMVSS) มาตรฐานการประเมินและการทดสอบรถยนต์ใหม่ (New Car Assessment Program, NCAP) และมาตรฐานด้านความปลอดภัยบนทางด่วน (Insurance Institute for Highway Safety, IIHS) ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า การศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างยานยนต์ภายใต้การชนกระแทกนั้นมีความสำคัญอย่างมากในปัจจุบัน ดังจะได้อธิบายในรายละเอียดแต่ละมาตรฐานดังนี้

2.6.1 มาตรฐานความปลอดภัยของสหพันธ์ยานยนต์ (FMVSS)

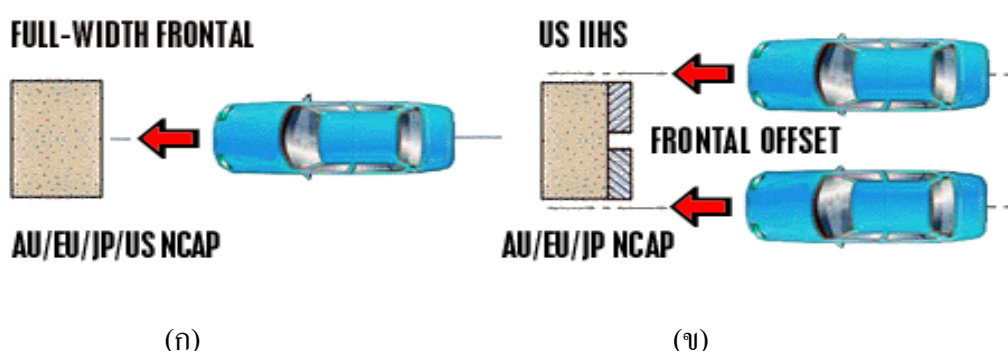
เป็นมาตรฐานด้านความปลอดภัยทางรถยนต์และเริ่มมีใช้ที่ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งเป็นมาตรฐานในการทดสอบระบบต่างๆ ของรถยนต์และเริ่มใช้ครั้งแรกในปี 1968 โดยมาตรฐานที่ใช้มีหลายประเภท ตัวอย่างเช่น มาตรฐานที่ 116 (Motor Vehicle Brake Fluids) ซึ่งเป็นข้อกำหนดเกี่ยวกับระบบเบรกในรถยนต์ โดยมาตรฐานที่มีการใช้ครั้งแรกคือ มาตรฐานที่ 209 ซึ่งกล่าวถึงความปลอดภัยในการใช้เข็มขัดนิรภัยกับผู้โดยสารทั้งรถยนต์ส่วนบุคคล รถบรรทุก และรถยนต์โดยสาร เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีมาตรฐานการทดสอบแบบอื่นๆ อีกหลายข้อที่ไม่ได้กล่าวถึง ซึ่งเน้นเรื่องความปลอดภัยเป็นหลัก

2.6.2 มาตรฐานการประเมินและการทดสอบรถยนต์ใหม่ (NCAP)

มาตรฐานการประเมินและทดสอบรถยนต์ใหม่นี้มีใช้หลายประเทศ ในหลายทวีป เช่น ทวีปอเมริกา ยุโรป ญี่ปุ่นและออสเตรเลีย โดยมีวิธีการทดสอบการชนในหลายลักษณะดังนี้

2.6.2.1 การทดสอบโดยการชนด้านหน้าแบบชนเต็ม (Full frontal crash) ในการทดสอบนี้จะใช้ความเร็วในการชน 64 km/h (40 mph) โดยให้รถยนต์พุ่งเข้าชนกำแพงแบบเต็มหน้า ด้วยความเร็วที่กำหนดเพื่อดูความสามารถในการต้านทานความเสียหายและลักษณะของการเสียหาย เพื่อวิเคราะห์ดูความแข็งแรงและเป็นข้อมูลในการผลิตต่อไป ดังแสดงในภาพที่ 2.9 (ก)

2.6.2.2 การทดสอบโดยการชนด้านหน้าแบบครึ่งหนึ่ง (Offset frontal crash) การทดสอบการชนแบบนี้จะใช้ความเร็วในการชน 56 km/h (35 mph) มีวิธีการทดสอบคือ ให้รถวิ่งชนกำแพงด้วยความเร็วตามกำหนดโดยจะชนเพียงซีกเดียวเท่านั้น ดังแสดงในภาพที่ 2.9 (ข)

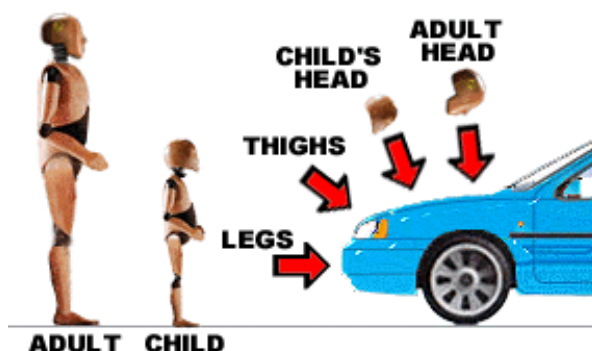


ภาพที่ 2.9 ลักษณะการทดสอบการชนด้านหน้าตามมาตรฐานการทดสอบรถยนต์ใหม่

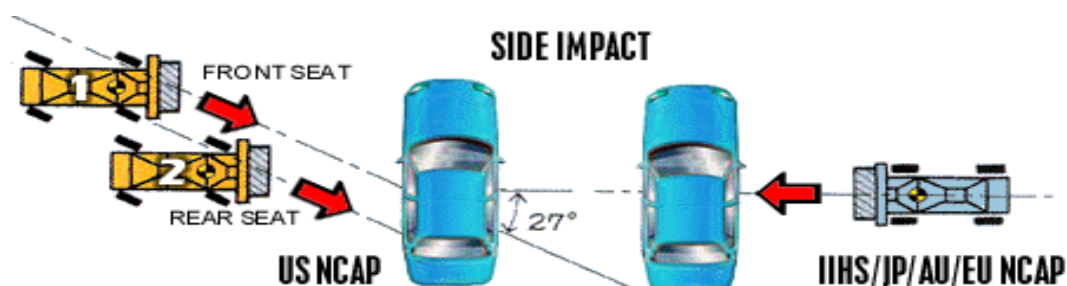
(ก) การทดสอบการชนแบบเต็ม (ข) การทดสอบการชนแบบครึ่ง [3]

2.6.2.3 การทดสอบโดยการชนคนเดินเท้า ในการทดสอบนี้ความเร็วที่ใช้ประมาณ 40 km/h (25 mph) เป็นการทดสอบการชนคนเดินเท้าโดยสร้างหุ่นจำลองจากนั้นให้รถวิ่งเข้าชนตามความเร็วที่กำหนดเพื่อสังเกตจุดที่จะเกิดอันตรายกับร่างกายในส่วนต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 2.10

2.6.2.4 การทดสอบโดยการชนด้านข้างมีวิธีการทดสอบคือให้รถวิ่งเข้าชนรถยนต์อีกคันหนึ่งด้วยความเร็ว 50 km/h (30 mph) ไปในทิศทางด้านข้างของรถทดสอบและในทิศทางมุมที่ต่างกันโดยรถคันที่ชนจะใช้เป็นลักษณะ Rigid Body ดังแสดงในภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.10 มาตรฐานการทดสอบการชนคนเดินเท้าของการทดสอบรถยนต์ใหม่ [3]



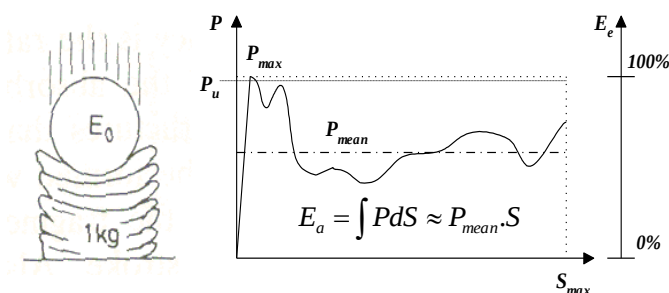
ภาพที่ 2.11 มาตรฐานการทดสอบการชนด้านข้างของการทดสอบรถยนต์ใหม่ [3]

2.7 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาการรับแรงกระแทก [4]

2.7.1 ภาวะวิกฤติหรือการเสียหาย

ภาวะวิกฤติ (Critical load or Collapse load), P_{cr} หมายถึง ภาระครั้งแรกที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการเสียหายอย่างสังเกตเห็นได้ ณ จุดนี้เป็นตำแหน่งที่เส้นกราฟใน ภาพที่ 2.12 เริ่มตกลงหลังจากที่กราฟขึ้นสูงสุดในช่วงแรก ซึ่งภาวะวิกฤตินี้มีความสำคัญมากกับการออกแบบเพื่อไม่ให้

ชิ้นงานเกิดการเสียหายก่อนช่วงเวลาที่เหมาะสม แต่ในบางครั้งภาระวิกฤติอาจจะมีค่าเท่ากับภาระสูงสุด (P_{max}) ก็ได้ ในกรณีของ ภาพที่ 2.12 นี้จะเห็นว่าภาระสูงสุดมีค่าเท่ากับภาระวิกฤติหรืออาจกล่าวได้ว่าค่าภาระวิกฤติก็คือ ค่าภาระที่สูงที่สุดครั้งแรกก่อนที่เส้นกราฟจะตกลงและหลังจากช่วงนี้อาจมีค่าภาระสูงสุดที่สูงกว่าจุดนี้ก็ได้



ภาพที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาระและระยะยุบตัว (Load - Displacement Curve) [4]

2.7.2 ภาระสูงสุด

ภาระสูงสุด (Maximum load), P_{max} หมายถึง ภาระสูงสุดที่เกิดขึ้นในกราฟของค่าภาระและระยะยุบตัวตลอดช่วงเวลาการเสียหายของชิ้นงาน ซึ่งค่าของภาระสูงสุดควรจะอยู่ในช่วงที่เหมาะสมและไม่ต้องสูงมากจนเกินไปเพราะจะทำให้อัตราแรงไม่คงที่ เช่น การลดความเร็วอย่างทันทีทันใด อาจทำให้เกิดอันตรายต่อร่างกายมนุษย์ด้วย

2.7.3 ภาระเฉลี่ย

ภาระเฉลี่ย (Mean crushing load), P_{mean} หมายถึง ค่าของภาระเฉลี่ยตลอดการเสียรูปของโครงสร้างภายใต้การชนกระแทกจนสิ้นสุดการยุบตัว โดยมักเปรียบเทียบกับระยะยุบตัวของชิ้นงาน ซึ่งค่าภาระเฉลี่ยนี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าพลังงานที่โครงสร้างสามารถดูดซับได้ โดยทั่วไปแล้วค่าภาระเฉลี่ยควรมีค่าสูงเพื่อให้ได้ค่าพลังงานดูดซับที่สูงตามไปด้วย

2.7.4 พลังงานดูดซับ

พลังงานดูดซับ (Energy absorption), E_a หมายถึง ค่าพลังงานที่ชิ้นงานสามารถดูดซับได้ตลอดการชนกระแทกหรือการยุบตัว ซึ่งหาได้จากการรวมพื้นที่ใต้กราฟระหว่างภาระที่ใช้กับระยะยุบตัวที่ได้จากการชนกระแทกของชิ้นงานหรือโครงสร้าง จาก ภาพที่ 2.12 เป็นกราฟแสดง ค่าภาระที่ใช้และระยะยุบตัวจากตัวอย่างการทดสอบการชนของเหล็กชนิดหนึ่ง จากกราฟแสดงค่าตัวแปรที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ คือ ค่าการดูดซับพลังงานจากการชนของชิ้นงาน สามารถหาได้จากสมการที่ (2.42)

$$E_a = \int P dS \quad (2.42)$$

โดยที่ E_a คือ พลังงานที่ชิ้นงานดูดซับไว้ได้
 P คือ ภาระที่กระทำกับวัสดุชิ้นงาน
 dS คือ การเปลี่ยนแปลงระยะยวบตัวของชิ้นงาน

จากภาพที่ 2.12 เนื่องจากเส้นกราฟของภาระและระยะการยวบตัวไม่คงที่สม่ำเสมอตลอดระยะเวลาที่เกิดการชนกระแทก ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงแนะนำให้ใช้การประมาณจากค่าภาระเฉลี่ยตามหลักของ mean - value theorem ในการหาค่าการดูดซับพลังงานของวัสดุ จากการชนกระแทก ซึ่งหาค่าได้โดยใช้สมการที่ (2.43)

$$E_a = P_{mean} \cdot S \quad (2.43)$$

2.7.5 พลังงานดูดซับจำเพาะ

พลังงานดูดซับจำเพาะ (Specific energy absorption) E_s หมายถึง ค่าการดูดซับพลังงานของโครงสร้างหนึ่งๆ เทียบกับน้ำหนักของตัวโครงสร้างเอง ในการหาค่าการดูดซับพลังงานจำเพาะที่เกิดจากการชนกระแทกนั้น ต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายอย่างที่มีอิทธิพลต่อการชน ปกติทั่วไปชิ้นงานจะสามารถดูดซับพลังงานได้ตามความสามารถของตัวมันเอง เมื่อชิ้นงานเริ่มดูดซับพลังงานจากการชนกระแทก ตัวมันเองจะเริ่มยวบตัวหรือพับตัวจนกระทั่งไม่สามารถยวบตัวต่อได้อีก ลักษณะเช่นนี้หมายถึง วัสดุชิ้นงานนั้นได้ดูดซับพลังงานได้เต็มที่แล้ว ดังนั้นแรงที่เหลืออยู่ก็จะถูกส่งไปยังชิ้นส่วนที่เราต้องการปกป้องให้ความปลอดภัย เช่นร่างกายของมนุษย์ในห้องผู้โดยสาร ปกติแล้วเรามักพิจารณาการดูดซับพลังงานโดยเทียบกับมวลของตัวโครงสร้างเอง เพื่อไม่ให้ชิ้นงานมีมวลมากเกินไปกล่าวคือ แม้ว่าชิ้นงานจะสามารถดูดซับพลังงานได้มาก แต่ถ้าชิ้นงานมีมวลที่มากเกินไปก็อาจไม่เหมาะสมกับโครงสร้างบางชนิด ตัวอย่างเช่น โครงสร้างของรถยนต์หรือยานพาหนะอื่นๆ ซึ่งค่าพลังงานดูดซับจำเพาะสามารถหาได้จากสมการที่ (2.44)

$$E_s = \frac{\int P dS}{mass} \approx \frac{P_{mean} \cdot S}{mass} \quad (2.44)$$

โดยที่ E_s คือ การดูดซับพลังงานจำเพาะ

P_{mean} คือ ภาระเฉลี่ย

S คือ ระยะที่วัสดุชิ้นงานยุบตัวได้จากเริ่มต้นจนถึงจุดสุดท้าย

2.8 หลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [5]

การแก้ปัญหาทางด้านวิศวกรรม มีส่วนอย่างมากในการสร้างเสริมปรับปรุงความเป็นอยู่ของมนุษย์ให้ดียิ่งขึ้น ปรากฏการณ์เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้จากกฎเกณฑ์ทางฟิสิกส์และทำการประดิษฐ์ขึ้นมาในลักษณะของสมการต่างๆได้ ซึ่งอาจอยู่ในรูปแบบสมการอนุพันธ์ (Differential Equation) หรือในรูปแบบของสมการอินทิกรัล (Integral Equation) เป็นต้น โดยปกติแล้วปัญหานั้นจะประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ที่สอดคล้องกัน รวมทั้งเงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้นที่เหมาะสม ค่าของผลเฉลยแม่นยำตรงซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่แท้จริงของปัญหาดังกล่าว จะประกอบด้วยค่าของตัวแปรที่มีขนาดต่างกันและเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งต่างๆของรูปร่างปัญหานั้น หรือค่าผลเฉลยแม่นยำตรงประกอบด้วยค่าต่างๆทั้งหมดนับเป็นจำนวนอนันต์ค่าแทนที่จะทำการหาค่าแม่นยำที่ประกอบด้วยค่าจำนวนมากต่างๆ ดังกล่าวซึ่งปัญหาในทางปฏิบัติจะทำได้ หลักการคือ ทำการเปลี่ยนค่าแม่นยำทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่านี้มาเป็นค่าโดยประมาณที่มีจำนวนที่นับได้ ด้วยการแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหานั้นออกเป็นเอลิเมนต์ ซึ่งมีขนาดต่างๆกัน ผลเฉลยโดยประมาณของแต่ละเอลิเมนต์นั้นจำเป็นต้องสอดคล้อง กับสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขต่างๆ ที่กำหนดมาให้สำหรับปัญหานั้นๆ ซึ่งหมายความว่าหลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะเริ่มต้นจากการพิจารณาแต่ละเอลิเมนต์ แล้วทำการสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ แสดงตัวอย่างของรูปร่างเมชและเอลิเมนต์ โดยสมการที่สร้างขึ้นมานั้นจำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่พิจารณาอยู่นั้น ฉะนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมานี้ประกอบกันเข้าก่อให้เกิดระบบสมการชุดใหญ่ ซึ่งความหมายทางกายภาพของการทำเช่นนี้ ก็คล้ายกับการนำเอาทุกๆเอลิเมนต์ มารวมกันเข้า ก่อให้เกิดเป็นรูปร่างลักษณะของปัญหาทั้งหมด จากนั้นจึงประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ลงในสมการชุดใหญ่นี้ แล้วจึงทำการแก้ระบบสมการทั้งหมด ก่อให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการตามตำแหน่งต่างๆ ของรูปร่างปัญหา

2.8.1 ขั้นตอนพื้นฐานของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีดังนี้

2.8.1.1 ขั้นตอนของการเตรียมแบบจำลอง (Preprocessing phase)

- 1) การสร้างรูปร่างของแบบจำลอง (Geometric construction)
- 2) การแบ่งโดเมนของแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆต่อกันโดยแต่เอลิเมนต์จะประกอบไปด้วยโหนด (Discretization)

2.8.1.2 การกำหนด shape function ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมทางกายภาพของเอลิเมนต์หรือผลเฉลยของเอลิเมนต์

- 1) สร้างสมการสำหรับเอลิเมนต์
- 2) กำหนดค่าเงื่อนไขเริ่มต้น สภาวะโหลดและสภาวะขอบเขตให้กับ

ปัญหา

- 3) กำหนดคุณสมบัติของวัสดุ (Material properties)

2.8.1.3 ขั้นตอนการหาคำตอบ (Solution phase) การแก้หาคำตอบของสมการซึ่งอยู่ในรูปสมการเชิงเส้นหรือสมการไม่เชิงเส้น ซึ่งคำตอบคือค่าการ กระจัดที่โหนดต่างๆ

2.8.1.4 การวิเคราะห์ผลลัพธ์ (Post processing phase) การวิเคราะห์หาผลลัพธ์ที่เราสนใจเพิ่มเติมเช่นเราอาจอยากรู้อาจะทราบค่าความเค้นหลัก เป็นต้น

2.8.2 โปรแกรม FEA ที่ใช้ในการศึกษา (ABAQUS) [3]

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทาง FEA ชื่อ ABAQUS เป็นเครื่องมือหลักในการวิจัย ดังนั้นจึงควรทำความเข้าใจกับการใช้งานโปรแกรมนี้เสียก่อน โปรแกรม ABAQUS เป็นโปรแกรมคำนวณที่อาศัยหลักการของ FEA ในการคำนวณและวิเคราะห์ผล เป็นหนึ่งในโปรแกรมด้าน FEA ที่นิยมใช้งานทั้งในส่วนของงานวิจัย และภาคอุตสาหกรรม สามารถวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมได้อย่างหลากหลาย เช่น ปัญหาด้านการชน การสั่นสะเทือน ความร้อน ของไหล และการเสียหายแบบต่างๆ เป็นต้น โปรแกรมนี้ประกอบไปด้วยส่วนหลักของโปรแกรมที่สำคัญดังนี้

2.8.2.1 ส่วนของการสร้างแบบจำลอง

ในส่วนนี้เป็นการสร้างแบบจำลองขึ้นเพื่อเตรียมการทดสอบ โดยสามารถทำได้ 2 แบบ คือ แบบแรกโดยการใช้ ABAQUS/CAE ซึ่งมีลักษณะที่คล้ายกับการเขียนรูปในโปรแกรมเขียนแบบหรืออาจจะเขียนจากโปรแกรมที่เกี่ยวกับทางด้านการเขียนแบบ (CAD) เช่น Solid Work ก็ได้ แล้วจึงดึงเข้ามาใช้ในโปรแกรม ABAQUS/CAE แบบที่สองเขียนโดยการใช้คำสั่งในภาษาของโปรแกรม ABAQUS โดยจะเขียนในลักษณะเป็น Text File Format หรือเรียกว่า Input File ซึ่งไฟล์ที่ได้จะมีนามสกุลเป็น *.inp ตัวอย่างหน้าจอของ ABAQUS/CAE แสดงดังรูป (2.13)

ในส่วนนี้นอกจากจะต้องสร้างภาพของโครงสร้างให้มีขนาดและลักษณะเหมือนจริงแล้ว ยังต้องทำการใส่เงื่อนไขอื่นๆที่เกี่ยวข้อง เช่น คุณสมบัติของวัสดุ เงื่อนไขขอบเขต ลักษณะของภาระที่กระทำ เงื่อนไขของผิวสัมผัส ชนิดของเอลิเมนต์ จำนวนของเอลิเมนต์ ชนิดของการวิเคราะห์ ข้อมูลที่ต้องการเก็บ เป็นต้น ซึ่งเงื่อนไขทั้งหมดที่ใช้ในโปรแกรมจะมีผลต่อการคำนวณและผลที่ได้จากการคำนวณ ดังนั้นคณะวิจัยจึงได้ทำการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติต่างๆที่จำเป็น และทำการเปรียบเทียบ

โปรแกรมกับผลการทดลองเพื่อให้มั่นใจว่าผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สามารถใช้งานได้จริง



ภาพที่ 2.13 แสดงลักษณะหน้าจอของโปรแกรม ABAQUS/CAE

2.8.2.2 ส่วนของการคำนวณผล

ส่วนนี้คือขั้นตอนการประมวลผล โดยโปรแกรมจะนำข้อมูลและเงื่อนไขที่สร้างไว้ในแบบจำลองมาทำการคำนวณและประมวลผลตามวิธีการที่ได้เขียนไว้ในโปรแกรมส่วนแรก ในส่วนนี้สามารถทำได้สองวิธี คือ วิธีแรกโดยใช้ ABAQUS/CAE วิธีที่สองโดยการใช้ ABAQUS/Command ซึ่งโปรแกรมจะทำการคำนวณค่าตามที่ได้กำหนดเงื่อนไขและขอบเขตของตัวแปรต่างๆ

2.8.2.3 ส่วนของการแสดงผลของโปรแกรม

ส่วนของการแสดงผลคือส่วนที่โปรแกรมแสดงผลการคำนวณที่ได้ออกมา โดยอาจแสดงผลในรูปแบบของภาพขึ้นงานในลักษณะต่างๆ การกระจายตัวของตัวแปรที่ต้องการ หรือกราฟ เป็นต้น ในโปรแกรมนี้ส่วนที่ใช้แสดงผล คือ ABAQUS/Viewer โดยจะนำข้อมูลหรือผลที่ได้จากการประมวลผลในส่วน 2 เรียกว่าไฟล์ ODB มาเปิดแสดงผล เพื่อทำการบันทึกค่าตัวแปรต่างๆ รวมถึงข้อมูลที่โปรแกรมทำบันทึกไว้ขณะทำการทดสอบ จากนั้นจะนำข้อมูลไปใช้ในการคำนวณหาค่าพลังงานดูดซับต่อไป

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โครงสร้างส่วนหน้าของรถยนต์ มีความสำคัญในการป้องกันความเสียหายของโครงสร้างภายใต้การชน และมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความปลอดภัยของผู้โดยสาร ความสามารถในการดูดซับพลังงานของวัสดุประกอบมีความสำคัญในการพัฒนา พลังงานที่ดูดซับซึ่งขึ้นอยู่กับตัวแปร คือ ชนิดของเส้นใย เมทริกซ์ การเรียงตัวของเส้นใย เส้นใย รูปทรง และความเร็วในการทดสอบ โดยทั่วไปโลหะเช่นอะลูมิเนียม มีลักษณะการเสียหาย แบบพับ และ แบบงอ ซึ่งพลังงานที่กระจายจะถูกรวมทั้งหมดมาจุดเดียวในแนวแกนๆ เมื่อเปรียบเทียบกับ วัสดุประกอบซึ่งมี ลักษณะการเสียหาย แบบแตกเปราะเป็นชิ้นเล็ก ตลอดแนวแกนท่อนในลักษณะคงที่จึงส่งผลให้เกิดการกระจายตัวของแรงได้มากกว่า นอกจากนี้เนื่องจากวัสดุประกอบมีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรง และมีความคงทน วัสดุประกอบจึงเป็นอีกทางเลือกเพื่อทดแทนวัสดุเดิม จึงมีงานวิจัยที่ศึกษาผลของลักษณะการเสริมแรง รูปทรง มุมไขว้ของเส้นใย อัตราการกด ที่นำไปสู่ความสามารถของการดูดซับพลังงานของท่อวัสดุประกอบ เช่น การศึกษาทดลองพฤติกรรมการเสียหายของโครงสร้างรถยนต์ ภายใต้แรงกระทำแบบคงที่และไม่คงที่ โครงสร้างหน้าตัด รูปทรงนาฬิกาทราย รูปทรงกระบอก รูปทรงกรวย [6-10] และรูปทรงสี่เหลี่ยม โดยขึ้นรูปจาก Fiber/vinyl ester ได้ศึกษา วิธีการเสียหายจากการสังเกต และใช้เครื่องขยายสเกล เพื่อหาคุณลักษณะการดูดซับพลังงาน เปรียบเทียบระหว่างการทดลองกับทฤษฎี [11-14] การศึกษาคุณลักษณะการยุบตัวของท่อวัสดุประกอบได้พิจารณา ศึกษา ผลกระทบของโครงสร้างที่อัตราส่วนความหนาต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง การเสริมแรงด้วยเส้นใย และ รูปแบบการเสียหายทางกลของวัสดุประกอบ [15] การศึกษาผลของกระบวนการขึ้นรูปด้วยระบบสูญญากาศและไม่ใช้สูญญากาศ ในการดูดซับพลังงานของ glass/polyester พบว่าขึ้นงานรูปทรงกระบอก ขึ้นรูปด้วยสูญญากาศ มีค่าดูดซับพลังงานจำเพาะสูงขึ้นสองเท่า การศึกษาอิทธิพลของการดูดซับพลังงาน ของพื้นที่หน้าตัดภายใต้แรงกระทำในแนวแกน ได้พิจารณาศึกษาอิทธิพลของใยแก้วเสริมแรง และพบว่าหน้าตัดทรงกระบอกดูดซับพลังงานได้มากกว่าหน้าตัดสี่เหลี่ยม [16]

C. Milan et al. (1999) [17] ได้ทำการศึกษาการกดของข้อต่อที่เหมาะสมระหว่าง ท่อวัสดุประกอบและท่ออะลูมิเนียม โดย การทดลองและแบบจำลอง ข้อต่อนี้ถูกเชื่อมต่อท่อหลายจุดจากโครงสร้างของแม่แรงหรือปั้นจั่น การคำนวณได้มีการวิเคราะห์แบบจำลอง ท่อได้ทำการทดสอบโดยแรงกดระหว่างแผ่นระนาบสองแผ่น กดลงจนกระทั่งขึ้นงานเกิดความเสียหาย ความยาวของขึ้นงานที่ทำการทดสอบคือ 40 mm. การทดสอบขึ้นงานโดยใช้เครื่องที่มีชื่อว่า Instron Universal Testing Machine ซึ่งมีแรงกระทำได้สูงสุดที่ 100 KN ภายใต้อัตราการยุบ คือ 0.1 m/s การหาคำตอบจากแบบจำลองโดยทำการออกแบบข้อต่อ แบบจำลองได้รวมถึงชนิดของเอลิเมนต์ ขนาดของเมท

ตลอดจนค่าอิตาสติก และค่าคุณสมบัติความแข็งแรงของวัสดุ เป็นต้น จากผลการทดลอง พบว่าภาพกราฟภาระ-ระยะยวบตัว เป็นผลการทดลองและแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของแรงที่กระทำจากแบบจำลองคือ 8% และค่าระยะยวบตัวที่คลาดเคลื่อนคือ 12%

Paolo Feraboli et al. (2009) [18] ได้ทำการศึกษาการดูดซับพลังงานจากการชนจากท่อวัสดุประกอบ รูปร่างของชิ้นงานที่ใช้ศึกษาเป็นท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยพิจารณาจากชิ้นงานที่รูปร่างแตกต่างตามพื้นที่หน้าตัดทั้ง 5 แบบ โดยควบคุม ความหนา, อัตราส่วนผสม, กระบวนการขึ้นรูป และวิธีการทดสอบให้เหมือนกัน ซึ่งชิ้นงานที่ใช้ศึกษามีส่วนผสมเป็น T700 / 2510 (carbon fiber / epoxy prepreg) ไฟเบอร์เป็นชนิดแผ่นทอ 12 ktow ขึ้นรูปโดยการ vacuum bag และการจัดเรียงชั้นไฟเบอร์ เป็น $[0/90]_{4s}$ ความหนาชิ้นงานเท่ากับ 1.65 mm และทดสอบโดยใช้ ความเร็วในการทดสอบ 50.8 mm / min กระทำกับชิ้นงานจนเสียหาย ผลการศึกษาพบว่า สำหรับอัตราส่วนผสม และ Lay-up ที่ศึกษามีเปอร์เซ็นต์การดูดซับพลังงานที่บริเวณมุมของชิ้นงานสูง ขณะที่บริเวณส่วนที่เป็นพื้นที่เรียบ พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การดูดซับพลังงานต่ำ

S. Solaimurugan et al. (2007) [19] ได้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับพลังงานจากการชนของท่อทรงกระบอกวัสดุประกอบ โดยท่อวัสดุประกอบมีจำนวนชั้นของไฟเบอร์เป็น 4 และ 6 ชั้น ซึ่งเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงชั้นของไฟเบอร์ที่แตกต่างกันไป ชิ้นงานที่ใช้ทดลองทำจาก เส้นใยแก้วชนิด Woven roving (WRM) ความหนาแน่น 610 g/m² และ เส้นใยแก้วทิศทางเดียว (UD) ความหนาแน่น 750 g/m² ส่วนเรซินใช้ คือเรซินไอโซพาทาลิก เป็นส่วนประกอบในการขึ้นรูปชิ้นงาน และใช้ทดสอบหาค่าคุณสมบัติของวัสดุประกอบที่ใช้ทดลองโดยการขึ้นรูปชิ้นงานที่ใช้ทดลองจะขึ้นรูปด้วยมือ สลับชั้นกันระหว่าง $[WRM/(UD)_m/WRM]$ ตามที่กำหนดไว้คือ 4 และ 6 ชั้น ขนาดอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางภายในกับความหนา (D/t) ประมาณ 15 และ 25 ตามลำดับ ที่ปลายท่อลบขอบทำมุม 30 ความเร็วคือ 2 mm/min ผลการศึกษาพบว่า จำนวนชั้นที่เพิ่มขึ้นของวัสดุประกอบ มีผลทำให้แนวโน้มการดูดซับพลังงานสูงขึ้น

พิพัฒน์ ไฟศาลาณูมาศ (2550) [20] การศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบการผลิตกับค่าความต้านทานแรงกระแทกของถังไฟเบอร์กลาส โดยทำการออกแบบและผลิตถังไฟเบอร์กลาส ขนาด 750 ลิตร จำนวน 6 แบบ ที่ผลิตจากใยแมทร่วมกับใยแก้วชนิดเส้น จากนั้นนำถังที่ผลิตได้มาเตรียมเป็นชิ้นทดสอบ 2 แบบ โดยแยกตามแนวการตัด คือ ตัดตามแนวการพันเส้นใย และตัดขวางแนวการพันเส้นใย แล้วนำไปทำการทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM D256 06 ผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มจำนวนชั้นของใยแมทในการผลิตถังไฟเบอร์กลาสนั้นทำให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกเพิ่มขึ้น คือในรูปแบบที่ผลิตด้วยใยแมท 1, 2 และ 3 ชั้นแล้วพันด้วยใยเส้นแบบเรียงชิด 1 ชั้น ที่ตัดตามแนวการพันเส้นใย มีค่าความต้านทานแรงกระแทก เพิ่มขึ้นเป็น 79.86% และ 4.05%

ตามลำดับ และค่าที่ได้จากขั้นตอนทดสอบที่ตัดขวางแนวการพัน มีค่าความต้านทานแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเป็น 66.55 % และ 44.35% ตามลำดับ ส่วนในรูปแบบที่ผลิตด้วยใยแมท 1, 2 และ 3 ชั้น แล้วพันด้วยใยเส้นแบบเรียงไขว้ 1 ชั้น ขั้นตอนทดสอบที่ตัดตามแนวการพันเส้นใย มีค่าความต้านทานแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเป็น 4.91% และ 6.74% ตามลำดับ และค่าที่ได้จากขั้นตอนทดสอบที่ตัดขวางแนวการพัน มีค่าความต้านทานแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเป็น 104.14% และ 6.58% ตามลำดับ รูปแบบการพัน แต่ละรูปแบบให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกแตกต่างกันไป คือ ในแนวที่ตัดตามการพันเส้นใยนั้นการพันแบบเรียงไขว้ให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกดีกว่าการพันแบบเรียงชิด ส่วนในแนวที่ตัดขวางการพันเส้นใย การพันแบบเรียงชิดให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกดีกว่าการพันแบบเรียงไขว้

Jaehong Lee et al. (2007) [21] ได้ทำการศึกษาคุณลักษณะของสะพานพลาสติกเสริมใยแก้ว เพื่อศึกษาการทดลองของสะพานพลาสติกเสริมใยแก้วภายใต้แรงกระทำแบบคงที่และเปรียบเทียบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จากโปรแกรม ABAQUS โดยให้มีการออกแบบโดยมีแบบการไขว้สองแบบคือ DBT [45/90/-45] และ LT [0/90] ส่วนประกอบของวัสดุที่ใช้ในพลาสติกเสริมใยแก้วภายในประกอบด้วย เส้นใยและโพลีเอสเตอร์เรซิน น้ำหนักของใยแก้วและน้ำหนักของโพลีเอสเตอร์เรซินคือ 60 เปอร์เซ็นต์ และ 40 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สำหรับการคำนวณเชิงตัวเลขของแบบจำลองสะพานโดยใช้โปรแกรม ABAQUS ชนิดของการวิเคราะห์คือ แผ่นเปลือก 8 โหนด และใช้องค์ประกอบที่ 6 ต่อ 1 โหนด (S8R) สมมุติให้ชิ้นส่วนทั้งหมดติดกัน ผลจากการทดลองพบว่าตัวอย่างชิ้นงานของ LT มีความแข็งแรงกว่า DBT

สุรศักดิ์ สุวรรณแดง และคณะ (2550) [22] ได้ทำการศึกษาการแอ่นตัวแบบไม่เชิงเส้นของโครงสร้างคานที่ทำจากวัสดุผสมจากพลาสติกกับจีลีโอไม้อย่างพารา เมื่อรับแรงกระทำแบบจุด โดยใช้โปรแกรม ABAQUS วัสดุผสมประเภทนี้ได้จากการผสมพลาสติกกับจีลีโอไม้อย่างพารา ผสมกันกับพลาสติกตัวอย่างที่ทดสอบ 3 ชนิด คือ พีวีซี พีอี และ พีพี ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและค่าการแอ่นตัวของคานที่ทำจากวัสดุผสมที่มีสมบัติไม่เชิงเส้นถูกนำไปจำลองด้วยโปรแกรม ABAQUS ทั้งในกรณีการรับน้ำหนักบรรทุกในแนวตั้งและแนวนอน และนำผลไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ วัสดุไม้แดงซึ่งนิยมใช้ในงานโครงสร้างปัจจุบันจะถูกนำมาศึกษาและใช้เปรียบเทียบกับวัสดุผสมด้วย ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าทั้งวัสดุไม้แดงและวัสดุผสมทั้ง 3 ประเภท ให้ค่าการแอ่นตัวที่สอดคล้องกันระหว่างแบบจำลองและการทดสอบทั้งกรณีแอ่นตัวน้อยและแอ่นตัวมาก แสดงให้เห็นว่าโปรแกรม ABAQUS สามารถใช้จำลองการทดสอบและวิเคราะห์การเสียรูปของวัสดุผสมซึ่งมีสมบัติไม่เชิงเส้นได้เป็นอย่างดี

M.Golzar et al. (2010) [23] ศึกษาการสร้างต้นแบบชิ้นส่วนวัสดุประกอบเพื่อประกบกับด้านข้างโครงสร้างรถยนต์ โดยศึกษาการสร้างวัสดุประกอบเพื่อประกบโครงสร้างเพื่อใช้แทนที่

เหล็ก บริเวณด้านข้างของโครงสร้างรถยนต์ ยี่ห้อ Samand Sarir แผ่นวัสดุประกอบได้มีการสร้างเรียงทับซ้อนกันของเส้นใยดังนี้ [0/90] และ [45/-45] เป็นมุมไขว้ของใยแก้ว การศึกษานี้ยังใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการสร้างแบบจำลองแผ่นประกอบ โดยใช้โปรแกรมที่มีชื่อว่า ABAQUS ผลจากแบบจำลองแผ่นวัสดุประกอบเส้นใยแก้วเรียงทับซ้อนกันที่ [0/90] สามารถดูดซับพลังงานดีกว่าสำหรับการป้องกันโครงสร้างของชิ้นส่วนวัสดุประกอบ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเดิม คือ 1.7 kg และเบากว่าเหล็กเดิมถึง 42%

S.M.R.Khalili et al. (2011) [24] ได้ศึกษาแบบจำลองจากการกระแทกด้วยความเร็วต่ำของแผ่นวัสดุประกอบและทรงกระบอกผนังบาง โดยได้ทำการศึกษาโครงสร้างแผ่นลามิเนตและท่อผนังบางภายใต้การกระแทกด้วยความเร็วต่ำ ในการสร้างแบบจำลองการกระแทกด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยทำการหาผลเฉลยจาก ABAQUS/Explicit แผ่นระนาบและเปลือกใช้ชนิดของเมชคือ SC8R หรือ S4R 8 node จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า สำหรับแบบแผ่นบางและแบบเปลือกบาง S4R element มีความเหมาะสมและถูกต้องแม่นยำ แม้ว่าในกรณีที่ใช้ SC8R element ซึ่งสามารถใช้ได้และมีความถูกต้องมากกว่า ซึ่งจะทำให้เวลาในการคำนวณของ CPU มากกว่า สอดคล้องกันกับผลของแบบจำลอง สำหรับแบบแผ่นหนาและแบบเปลือกหนาควรใช้ชนิด SC4R element

Chien-Hua Huang et al. (2003) [25] ได้ทำการศึกษาทดลองแบบจำลองของการกดแบบคงที่ของแผ่นวัสดุผสม โดยการทดสอบกดของแผ่นใยคาร์บอนเสริมแรงโดยกระทำแบบคงที่เพื่อเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและผลแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม ABAQUS การทดลองแบบแผ่น โดยคาร์บอนและอีพอกซีเรียงซ้อนทับกัน โดยเส้นใยคาร์บอนคือ Toho ETA 12000 และแผ่นพื้นหรือเรซินคือ ACD 8810 Epoxy ซึ่งทั้งสองเรียงทับซ้อนกันที่ [90/0] และ [45/-45] ตามลำดับ โดยทั้งสองจะไขว้ทั้งหมด 16 ชั้น เรียกว่า Cross-Ply และ Angle-Ply ตามลำดับ โดยในการขึ้นรูปแบบสุญญากาศ อากาศจะถูกดูดออกโดยใช้ปั๊มดูดออก ที่ความดัน 5 atm และอุณหภูมิ 81.5 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิ 131.1 องศาเซลเซียส ที่ 90 m โดยจะมีแผ่นความกว้างคือ 16 cm ยาว 7 cm มีความหนา 0.228 cm การทดสอบขึ้นงานใช้เครื่องทดสอบของ MTS 180 corporation ซึ่งออกแบบให้ง่ายต่อการรองรับ โดยมีขอบแบบอิสระ หัวเหล็กกดมีเส้นผ่านศูนย์กลางคือ 7.5 cm แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม ABAQUS ในการคำนวณ แบบจำลองได้ใช้ C3D20R เอลิเมนต์ 20 โหนด ความละเอียดของเมทเอลิเมนต์จากขอบมายังจุดตรงกลาง เอลิเมนต์ที่มีอยู่ทั้งหมดคือ 1,664 เอลิเมนต์ และความหนามี 4 เอลิเมนต์ ชั้นของทั้ง 4 วัสดุถูกวางซ้อนกันในหนึ่งเอลิเมนต์ ซึ่งทั้งหมดก็คือ 16 เอลิเมนต์ ในการศึกษาได้แนะนำในการคัดแปลงเฟคเตอร์ในค่าความแข็ง ลักษณะการเสียหายของแผ่นภายใต้แรงกระทำการเปลี่ยน Stress-based Criteria ไปยัง Strain-based Criteria

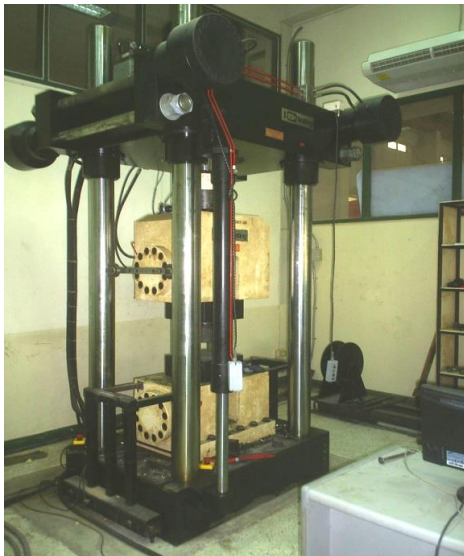
บทที่ 3

วิธีการศึกษาและการทดสอบ

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

3.1.1 เครื่องทดสอบการกด (Quasi -Static Compressive and Tensile Testing Machine)

เครื่องทดสอบการกดแบบกระทำแบบต่อเนื่อง ซึ่งใช้ในการวิจัยมีชื่อว่า เครื่อง ESH Testing Limited เป็นเครื่องที่สามารถทดสอบการกด (Compressive Test) และ การดึง (Tensile Test) ดังภาพที่ 3.1 ซึ่งเป็นเครื่องทดสอบที่ใช้ระบบคอมพิวเตอร์กับระบบไฮดรอลิกส์ (Hydraulic) ในการทดสอบมีความสามารถถึง 2,000 KN และระยะการกดมากที่สุดคือ 200 mm เครื่องทดสอบสามารถบันทึกข้อมูลการทำงานได้ทุกๆ 0.04 mm ผลที่ได้จากการทดสอบเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำ (Load) และระยะทางในการยุบตัว (Displacement) โดยสามารถบันทึกผลการทดลอง และแสดงเป็นกราฟได้ทันที



(ก) เครื่องทดสอบ



(ข) จอแสดงผล

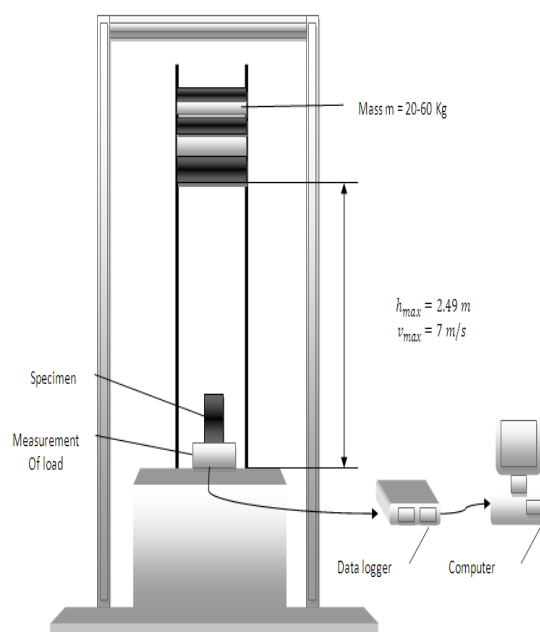
ภาพที่ 3.1 เครื่องทดสอบการกด (Quasi -Static Compressive and Tensile Testing Machine)

3.1.2 เครื่องทดสอบการกระแทก (Impact Testing Machine)

เครื่องทดสอบการกระแทกที่ใช้ในการศึกษานี้มีลักษณะเป็นหอสูง ดังแสดงในภาพที่ 3.2 (ก) โดยหอสูงนี้มีมีความสูง 2.49 m มีอุปกรณ์ติดตั้งหัวค้อนซึ่งสามารถยกขึ้นไปในระดับความสูงต่างๆ ก่อนปล่อยให้ตกอย่างอิสระ (Free falling) เพื่อตกกระทบชิ้นงานด้านล่างที่ฐานด้านล่างของเครื่องดังภาพที่ 3.2 (ข) ได้ติดตั้ง Load Cell เพื่อบันทึกค่าแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการกระแทกของชิ้นงานและหัวค้อน โดย Load Cell ดังกล่าวสามารถบันทึกข้อมูลได้ถึงความถี่สูงสุดถึง 10,000 ค่าต่อวินาที หัวค้อนที่ใช้ในการทดสอบสามารถเปลี่ยนน้ำหนักได้ระหว่าง 20-60 Kg



(ก) เครื่องทดสอบ

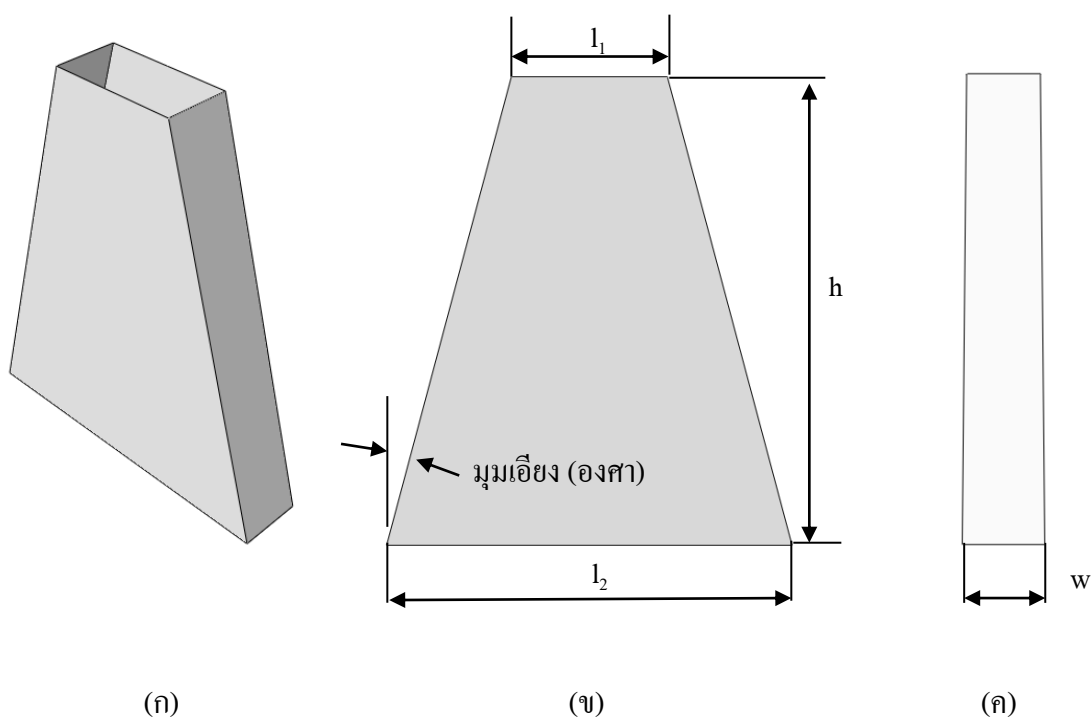


(ข) ไลอะแกรมของเครื่องทดสอบ

ภาพที่ 3.2 เครื่องทดสอบการกระแทก (Impact Testing Machine)

3.2 ชิ้นงานทดลองแบบทรงกรวย

ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะท่อทรงกรวย ขึ้นรูปจากพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไอโซพาทาลิก และเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิด E-glass มีลักษณะเป็นเส้นใยสับเป็นเส้นและทอเป็นผืน ความยาวของเส้นใยประมาณ 5-10 cm โดยยึดติดกันเป็นผืนด้วยกาว และมีทิศทางสุ่มแบบหลายทิศทาง ในส่วนการขึ้นรูป ขึ้นรูปด้วยวิธี แบบ Hand lay-up ซึ่งเป็นการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยมือ ขนาดของชิ้นงานทรงกรวยมีมุมเอียงแตกต่างกัน 3 มุม คือ 5, 10 และ 15 องศา ดังภาพที่ 3.3 แสดงขนาดของชิ้นงานทรงกรวย และความหนาแตกต่างกัน 3 ความหนา คือ 1.5, 2.0 และ 2.5 mm ความสูง คือ 300 mm และความกว้างปลายด้านบนของชิ้นงาน คือ 50.00 mm ความยาวปลายด้านบนของชิ้นงาน คือ 100 mm ในส่วนของความยาวของฐานชิ้นงานแปรผันตามมุมเอียงของชิ้นงาน จากตารางที่ 3.1 แสดงขนาดของชิ้นงานไฟเบอร์กลาสแบบทรงกรวยที่ใช้ทดลอง



ภาพที่ 3.3 ขนาดของชิ้นงานทรงกรวย (ก) ภาพรวมของชิ้นงาน (ข) ด้านหน้าของชิ้นงาน และ (ค) ด้านข้างของชิ้นงาน

ตารางที่ 3.1 ขนาดของชิ้นงานไฟเบอร์กลาสแบบทรงกรวยที่ใช้ในการทดลอง

ชิ้นงาน	มุมเอียง (องศา)	ความสูง (mm) (h)	ความกว้าง (mm) (w)	ความยาว ด้านบน (mm) (l ₁)	ความยาว ของฐาน (mm) (l ₂)	ความหนา (mm)
A5-1.5	5	300	50.00	100.00	150	1.50
A5-2.0						2.00
A5-2.5						2.50
B10-1.5	10	300	50.00	100.00	210	1.50
B10-2.0						2.00
B10-2.5						2.50
C15-1.5	15	300	50.00	100.00	260	1.50
C15-2.0						2.00
C15-2.5						2.50

3.2.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน

ชิ้นงานที่ใช้ในการศึกษานี้คือไฟเบอร์กลาส ซึ่งมีส่วนประกอบหลักคือ เมทริกซ์ หรือเรซิน ซึ่งในการศึกษานี้ได้ใช้เรซินโพลีเอสเตอร์ ทนแรงกระแทกชนิดไอโซพาทาลิเรซิน (ISO 2600) ดังภาพที่ 3.4 และเส้นใยสับเป็นเส้น ความยาวประมาณ 5-10 cm โดยยึดติดกันเป็นผืนด้วย กาว และมีทิศทางสุ่มแบบหลายทิศทาง เบอร์ 300 ดังภาพที่ 3.5 สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานได้แก่ แปรง ขนาด 2 นิ้ว เพื่อใช้ทาเรซิน ลูกกลิ้งโลหะเกลียวขนาด 4 นิ้ว ใช้รีดฟองอากาศ ในขณะที่ขึ้นรูปชิ้นงาน



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3.4 (ก) เรซินและ (ข) Hardener (ตัวทำให้แข็ง) ที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน



ภาพที่ 3.5 เส้นใยแก้วแบบสุ่มหลายทิศทาง



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 3.6 อุปกรณ์ที่ใช้ขึ้นรูปชิ้นงาน (ก) แปรงขนาด 2 นิ้ว (ข) ลูกกลิ้งโลหะเกลียวขนาด 4 นิ้ว และ (ค) จี๊ฟใช้สำหรับถอดแบบ

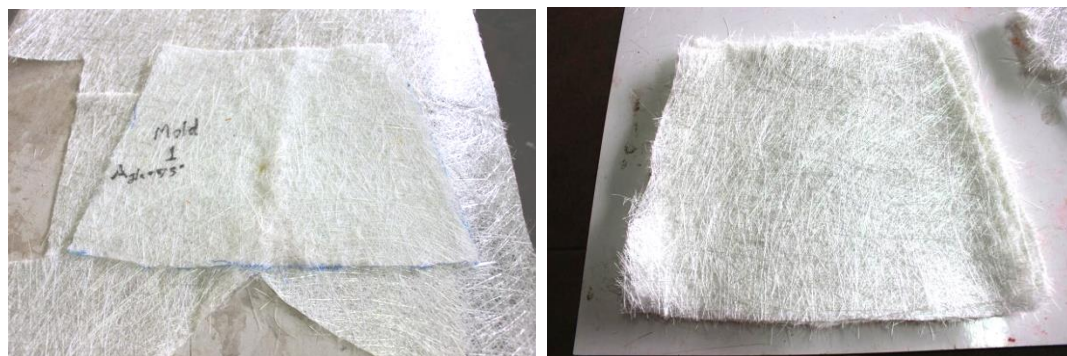
3.2.2 ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานแบบทรงกรวย

3.2.2.1 เตรียมแม่แบบที่ใช้ในการขึ้นรูป ซึ่งมีลักษณะทรงกรวยที่มีมุมเอียงเดียวกันกับชิ้นงานในทุกกรณี โดยแม่แบบทำจากไฟเบอร์กลาสมีลักษณะเป็นแผ่นผิวเรียบ ทั้งหมด 4 ชั้น จากนั้นนำมาประกอบเข้าด้วยกัน โดยใช้กระดาษกาวเป็นตัวประสาน ดังภาพที่ 3.7 แสดงถึงแม่แบบที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน จากนั้นนำแม่แบบทำความสะอาดด้วยน้ำแล้วตากให้แห้ง แล้วทาจี้ผึ้งหรือแว็กซ์หล่อยไว้นจนเกิดเป็นฝ้าขาว แล้วจึงขัดผิวแม่แบบด้วยจี้ผึ้งขัดผิวหรือแว็กซ์ ขัดให้เกิดความร้อน ทำซ้ำประมาณ 3 ถึง 4 ครั้ง เพื่อให้ผิวของแม่แบบเกิดความมัน



ภาพที่ 3.7 แม่แบบของชิ้นงาน

3.2.2.2 เตรียมเส้นใยแก้วเพื่อใช้ในการขึ้นรูป โดยตัดเส้นใยแก้วตามขนาดของแม่แบบ ดังภาพที่ 3.8 ซึ่งจำนวนชั้นของเส้นใยมีดังนี้ ชิ้นงานความหนา 1.5 mm จำนวน 2 ชั้น ความหนา 2.0 mm จำนวน 3 ชั้น และความหนา 2.5 mm จำนวน 4 ชั้น



ภาพที่ 3.8 เส้นใยแก้วที่ตัดตามลักษณะของชิ้นงาน สำหรับใช้ในการขึ้นรูป



ภาพที่ 3.9 ตวงปริมาณเรซินสำหรับการขึ้นรูป

3.2.2.3 เตรียมเรซิน โดยเริ่มต้นจากการผสมเรซินและตัวทำให้แข็งลงในแก้วพลาสติก แล้วกวนเรซินในทิศทางเดียวประมาณ 2 ถึง 3 นาที เพื่อให้膩ยาตัวทำให้แข็งทำปฏิกิริยากับเรซิน จากตารางที่ 3.2 แสดงถึงน้ำหนักของเรซินและน้ำหนักของเส้นใยแก้วที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.2 น้ำหนักของเรซินและน้ำหนักของเส้นใยแก้ว

ชิ้นงาน	น้ำหนักของเรซิน (g)	น้ำหนักของเส้นใยแก้ว (g)	Hardener (ตัวทำให้แข็ง) (%)
A5-1.5	200	61.96	1-2
A5-2.0	250	92.07	1-2
A5-2.5	300	111.70	1-2

ตารางที่ 3.2 น้ำหนักของเรซินและน้ำหนักของเส้นใยแก้ว (ต่อ)

ชิ้นงาน	น้ำหนักของเรซิน (g)	น้ำหนักของเส้นใยแก้ว (g)	Hardener (ตัวทำให้แข็ง) (%)
B10-1.5	220	78.15	1-2
B10-2.0	280	93.65	1-2
B10-2.5	380	129.50	1-2
C15-1.5	250	87.45	1-2
C15-2.0	350	104.28	1-2
C15-2.5	450	139.95	1-2

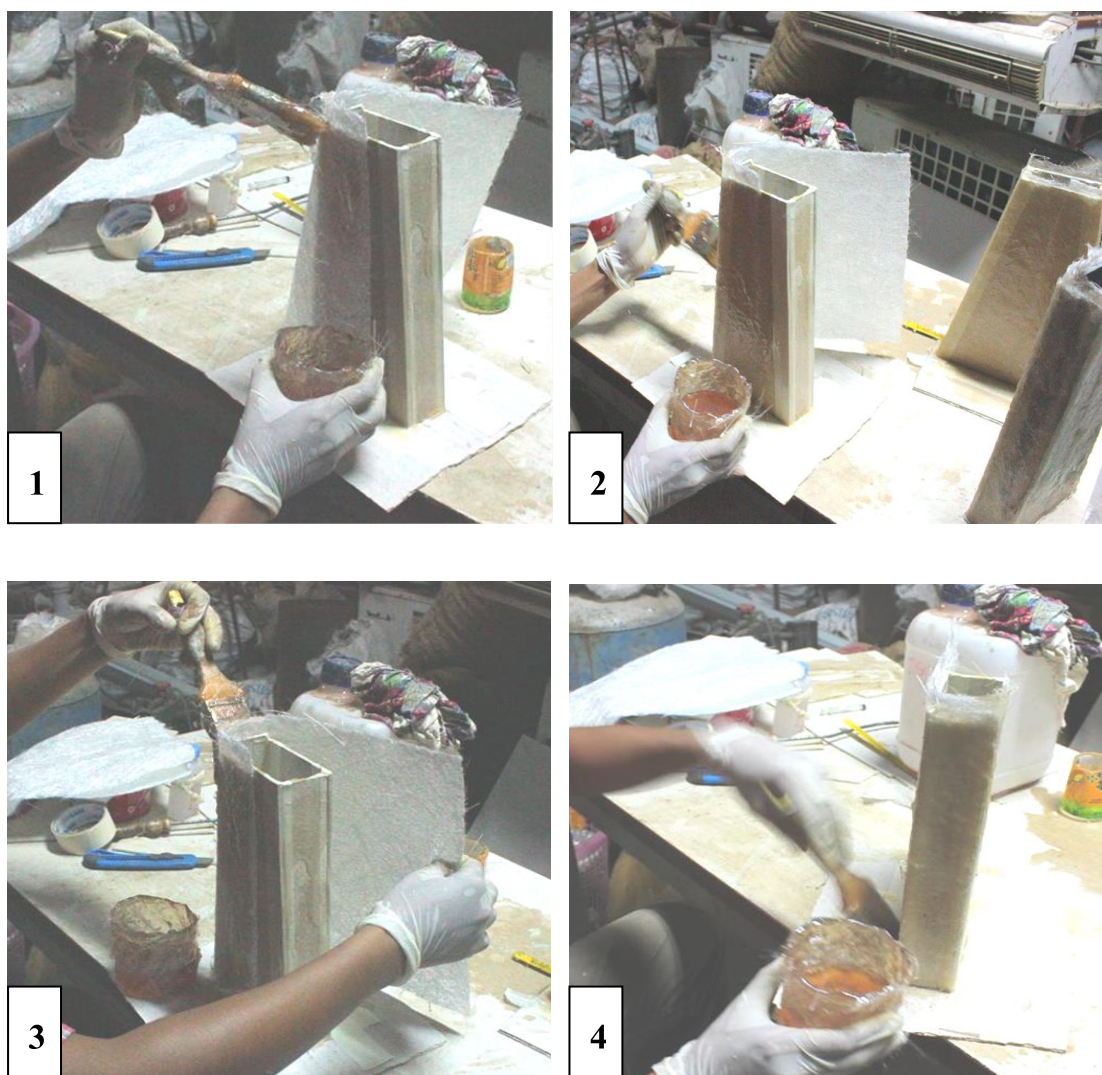


(ก)



(ข)

ภาพที่ 3.10 ขั้นตอนการเตรียมสารและผสมสาร Hardener (ก) เติมสาร Hardener ลงในเรซิน
(ข) กวนเรซินทิศทางเดียวกัน



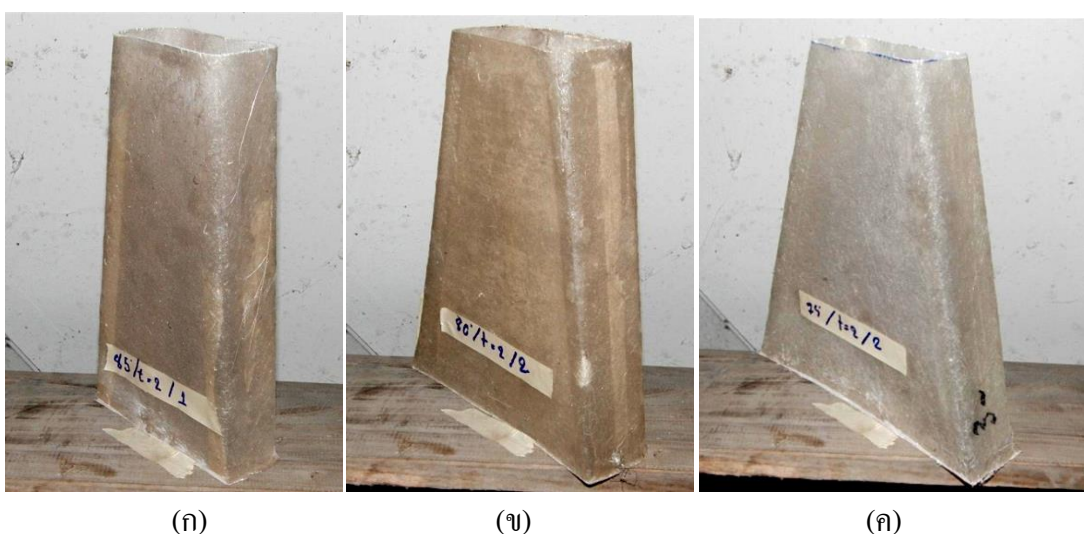
ภาพที่ 3.11 ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงาน โดยทาเรซินและวางเส้นใยแก้วบนแม่แบบ

3.2.2.4 ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงาน ทำได้โดยใช้แปรงจุ่มลงน้ำยาเรซินให้ชุ่มแล้วทา
ลงทั่วแม่แบบ ดังภาพที่ 3.11 หมายเลข 1 จากนั้นนำเส้นใยแก้วที่เตรียมไว้ วางบนแม่แบบ แล้วทา
เรซินบนเส้นใยแก้วจนชุ่มทั่วชิ้นงานดังภาพที่ 3.11 หมายเลข 2-4 และใช้ลูกกลิ้งโลหะเกลียวกลิ้งบน
ชิ้นงานในแต่ละชั้น เพื่อรีดฟองอากาศ



ภาพที่ 3.12 ชี้นงานเริ่มแข็งตัว

3.2.2.4 จากภาพที่ 3.12 แสดงถึงขั้นตอนการเซตตัวของเรซิน เป็นการปล่อยให้ ชี้นงานแห้งโดยใช้อุณหภูมิตามสิ่งแวดล้อม ใช้เวลาประมาณ 3 ชั่วโมง จากนั้นจึงถอดแบบ นำ ชี้นงานตัดขอบ จะได้ชี้นงานตามภาพที่ 3.13



(ก)

(ข)

(ค)

ภาพที่ 3.13 ชี้นงานที่ใช้ในการทดสอบ (ก) ชี้นงาน ที่มีมุมเอียง 5 องศา (ข) ชี้นงาน ที่มีมุมเอียง 10 องศา และ(ค) ชี้นงาน ที่มีมุมเอียง 15 องศา

3.3 ชิ้นงานทดลองแบบทรงกระบอก

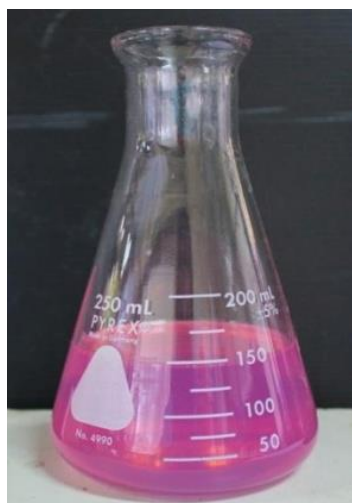
ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะท่อทรงกระบอก ขึ้นรูปจากพอลิเอสเตอร์เรซินชนิด ไอโซพทาติก และเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิด E-glass มีลักษณะเป็นเส้นยาวเหมือนด้ายทอเป็นผืน ในการขึ้นรูป ขึ้นรูปด้วยวิธี แบบ Hand lay-up ซึ่งเป็นการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยมือ โดยมุมการไขว้ของเส้นใย 3 แบบคือ [(0/90)/(0/90)/(0/90)] , [(45/-45)/(45/-45)/(45/-45)] และ [45/-45]/[0/90]/[45/-45] ตามลำดับ ขนาดของท่อมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกคือ 50.00 mm. ความหนาคือ 2.00 mm. และความยาวคือ 100.00 mm ดังแสดงในตารางที่ 3.3 แสดงถึงขนาดของท่อไฟเบอร์กลาส

ตารางที่ 3.3 ขนาดของท่อไฟเบอร์กลาสที่ใช้ในการทดลอง

ลำดับ	เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)	ความยาว (mm)	ความหนา (mm)	มุมไขว้เส้นใย (องศา)
A	50.00	100.00	2.00	[(0/90)/(0/90)/(0/90)]
B	50.00	100.00	2.00	[(45/-45)/(45/-45)/(45/-45)]
C	50.00	100.00	2.00	[45/-45]/[0/90]/[45/-45]

3.3.1 ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงาน

ชิ้นงานที่ใช้ในการศึกษานี้คือไฟเบอร์กลาส ซึ่งมีส่วนประกอบหลักคือ เมทริกซ์หรือเรซิน ดังภาพที่ 3.14 ซึ่งในการศึกษานี้ได้ใช้เรซินชนิดทนแรงกระแทกที่เรียกว่า ไอโซพทาติกเรซิน ในส่วนของเส้นใยแก้วเป็นชนิดผืนเย็บเรียงชิดติดกันสองแนวแกนคือ 0/90 องศา ดังภาพที่ 3.15 โดยมีขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานดังนี้



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3.14 (ก) เรซินและ (ข) ตัวทำให้แข็งที่ใช้ในการขึ้นรูปท่อไฟเบอร์



ภาพที่ 3.15 เส้นใยแก้วทอเป็นผืนที่มีลักษณะมุมไขว้กัน 0/90 องศา

3.3.1.1 เตรียมแม่แบบที่ใช้ในการทดลองลักษณะเป็นทรงกระบอกมีความยาวคือ 500 mm โดยผ่ากลางท่อด้านหนึ่งให้มีความกว้างคือ 5 mm และเจาะปลายทั้งสองข้าง เพื่อใช้ในการถอดแบบ จากนั้นนำแม่แบบทำความสะอาดด้วยน้ำแล้วตากให้แห้ง แล้วทากี๊ฟหรือแวกซ์ปล่อยไว้จนเกิดเป็นฝ้าขาว แล้วจึงขัดผิวแม่แบบด้วยขี้ผึ้งขัดผิวหรือแวกซ์ ขัดให้เกิดความร้อน ทำซ้ำประมาณ 3 ถึง 4 ครั้ง เพื่อให้ผิวของแม่แบบเกิดความมัน

3.3.1.2 เตรียมเส้นใยแก้วเพื่อใช้ในการพันท่อแม่แบบในการพันแบบมุมไขว้ [(0/90)/(0/90)/(0/90)] ตัดเส้นใยแก้วผืนให้ความกว้างคือ 470 mm และความยาว 470 mm ส่วนในการพันแบบมุมไขว้ [(45/-45)/(45/-45)/(45/-45)] ตัดเส้นใยแก้วผืน ความกว้างคือ 120 mm ความยาวคือ 750 mm เพื่อให้เหมาะสมในการวางมุมไขว้กับแม่แบบ

3.3.1.3 วางแบบลงบนเครื่องหมุนซึ่งเป็นที่เครื่องสร้างขึ้นมาเพื่อลดปัญหาของการไหลมารวมตัวกันของเรซิน ซึ่งส่งผลทำให้ชิ้นงานมีความหนาไม่เท่ากัน ซึ่งเครื่องหมุนแม่แบบมีลักษณะเป็นเพลยาว และมีความยาวประมาณ 800 mm หมุนด้วยมอเตอร์ และควบคุมความเร็วรอบด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าหมุนด้วยความเร็ว 34 rpm

3.3.1.4 ขึ้นรูปด้วยการทาเรซินลงบนเส้นใยแก้ว ดังภาพที่ 3.16 เริ่มต้นจากการผสมเรซินและตัวทำให้แข็งลงในแก้วพลาสติก แล้วกวาเรซินในทิศทางเดียวประมาณ 2 ถึง 3 นาที ซึ่งปริมาณของเรซินที่ใช้คือ 140 ml และตัวทำให้แข็งประมาณ 0.14 ml จากนั้นทาลงใยแก้วจนกระทั่งครบจำนวนชั้นของใยแก้ว ในการศึกษาครั้งนี้ใช้เส้นใยแก้วทั้งหมด 6 ชั้น เมื่อทาเรซินจนชุ่มแล้วจึงนำเอาลูกกลิ้งโลหะเกลียวกลิ้งบนชิ้นงานเพื่อไล่อากาศออก



(ก)

(ข)

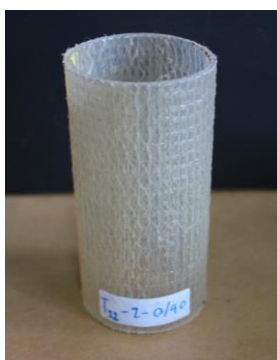
ภาพที่ 3.16 (ก) การทาเรซินลงบนเส้นใยแก้วที่พันแม่แบบ (ข) ลูกกลิ้งโลหะเกลียวเพื่อไล่อากาศออก

3.3.1.5 หลังจากผ่านการทาเรซินและรีดอากาศออกด้วยลูกกลิ้งแล้ว เครื่องหมุนแม่แบบเริ่มหมุนด้วยความเร็วที่ 34 rpm ใช้เวลาในการหมุนประมาณ 180 min ดังภาพที่ 3.17 เพื่อให้เรซินเซ็ทตัวและมีความแข็งแรงพอที่จะถอดแบบออกได้ง่าย ทั้งนี้หลังจาก 180 min ไปแล้ว ชิ้นงานจะติดกับแม่แบบซึ่งจะทำให้ถอดแบบออกยาก



ภาพที่ 3.17 เครื่องหมุนแม่แบบ

3.3.1.6 การถอดแม่แบบชิ้นงาน ถอดออกโดยการดึงชิ้นงานออกจากตัวแม่แบบ หลังจากนั้นชิ้นงานวางไว้เพื่อให้ชิ้นงานแห้ง จะได้ท่อชิ้นงานตามมุมที่เราต้องการ จากนั้นปล่อยให้ชิ้นงานทิ้งไว้ประมาณ 1 ถึง 2 วัน เพื่อให้ชิ้นงานแห้งดีแล้วจึงนำชิ้นงานไปตัด ก็จะได้ชิ้นงานที่สมบูรณ์ดังแสดงในภาพที่ 3.18



(ก) ชิ้นงาน A

[(0/90)/(0/90)/(0/90)]



(ข) ชิ้นงาน B

[(45/-45)/(45/-45)/(45/-45)]



(ค) ชิ้นงาน C

[+45/-45]/ [0/90] / [+45/-45]

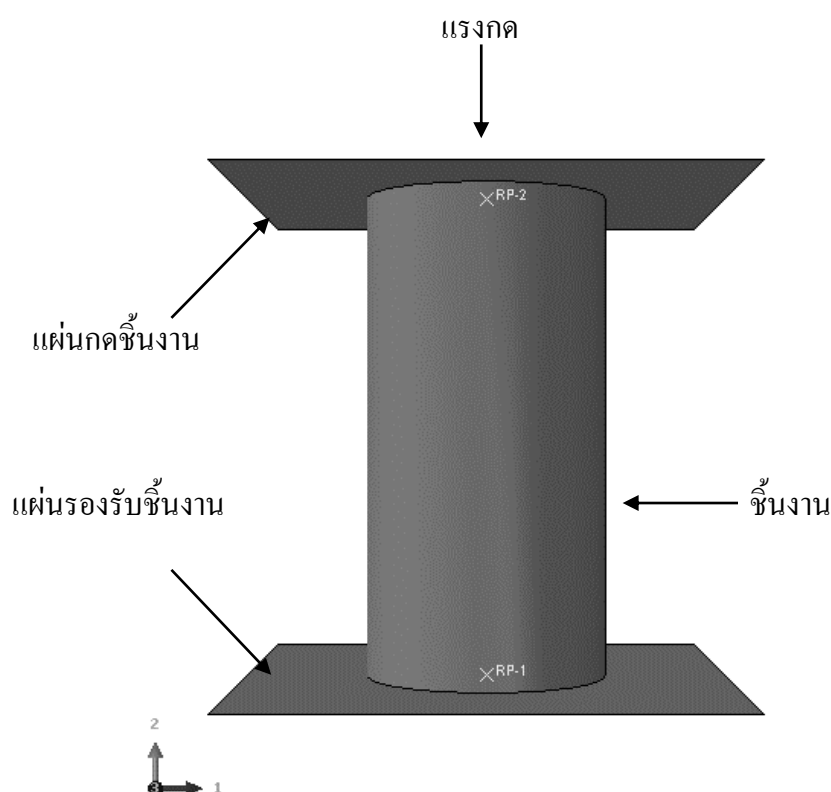
ภาพที่ 3.18 ชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปในมุมไขว้ต่างๆ

3.4 รายละเอียดแบบจำลอง FEA

ในวิธีการคำนวณ โดยใช้วิธีระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากโปรแกรมที่มีชื่อว่า ABAQUS/Explicit ซึ่งมีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

3.4.1 การสร้างแบบจำลองทดสอบ

แบบจำลองที่สร้างขึ้นประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนของชิ้นงานซึ่งเป็นท่อไฟเบอร์กลาสวางทับซ้อนกันที่มุมต่างๆ แผ่นกกดด้านบนซึ่งกำหนดให้เป็นวัตถุแข็งเกร็งทำหน้าที่จำลองการกดชิ้นงานและแผ่นรองรับด้านล่าง ทำหน้าที่รองรับชิ้นงาน ในการสร้างแบบจำลองของชิ้นงาน กำหนดให้ชิ้นงานมีลักษณะการเรียงทับซ้อนของมุมไขว้ จำนวน 6 ชั้น ในแต่ละชั้นมีความหนา คือ 0.33 mm ความหนาของท่อคือ 2 mm เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกคือ 50 mm และความยาว คือ 100 mm ในส่วนของแบบจำลองโครงสร้างคือ Shell ชนิด Revolution Type Deformable ในส่วนของแผ่นวัตถุแข็งเกร็ง โครงสร้างเป็นแบบ Shell Element ชนิด Planar Discrete Rigid ขนาดของแผ่นวัตถุแข็งเกร็งคือ กว้างคือ 50 mm และยาวคือ 50 mm ดังภาพที่ 3.19 แสดงถึงโครงสร้างของชิ้นงานและแผ่นวัตถุแข็งเกร็ง ซึ่งวัตถุแข็งเกร็งไม่มีความเสียหายเกิดขึ้น



ภาพที่ 3.19 แบบจำลองโครงสร้างของชิ้นงานและแผ่นวัตถุแข็งเกร็ง

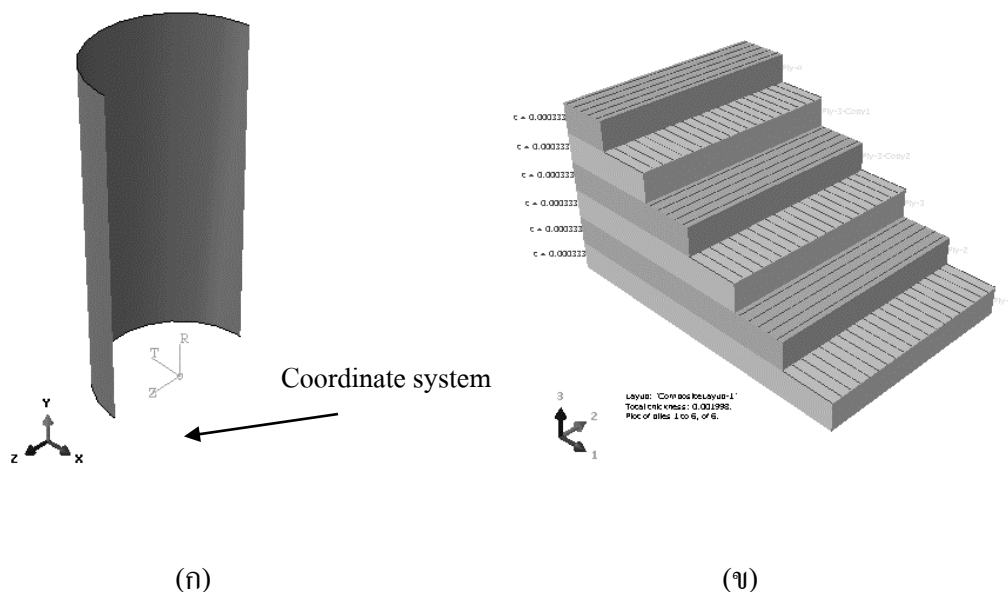
3.4.2 การกำหนดคุณสมบัติของท่อชิ้นงาน

ในการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุชิ้นงาน ซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นวัสดุประกอบที่มีคุณสมบัติไม่เท่ากัน โดยคุณสมบัติทางกลของวัสดุประกอบที่ใช้ในโปรแกรมได้มาจากการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุจริง ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไปและมีค่าดังต่อไปนี้

ค่าโมดูลัสตามยาว	E_1	คือ 15.83 GPa
ค่าโมดูลัสตามขวาง	E_2, E_3	คือ 5.37 GPa
ค่าโมดูลัสเฉือนในระนาบ	G_{12}	คือ 7.34 GPa
ค่าโมดูลัสเฉือนนอกระนาบ	G_{23}	คือ 2.41 GPa
ค่าโมดูลัสเฉือนในระนาบ	G_{13}	คือ 7.34 GPa
ค่าอัตราปัวซอง	ν_{12}	คือ 0.12
ค่าอัตราปัวซอง	ν_{13}	คือ 0.14
ค่าอัตราปัวซอง	ν_{23}	คือ 0.14
ค่าความหนาแน่น	ρ	คือ 1600 Kg/m ³
ค่าความต้านทานแรงดึงตามแนวเส้นใย	X_t	คือ 358.8 MPa
ค่าความต้านทานแรงกดตามแนวเส้นใย	X_c	คือ 209.93 MPa
ค่าความต้านทานแรงดึงตามขวางเส้นใย	Y_t	คือ 10.46 MPa
ค่าความต้านทานแรงกดตามขวางเส้นใย	Y_c	คือ 65.71 MPa
ค่าความต้านทานแรงเฉือน	S_{12}	คือ 62.20 MPa
ค่าความต้านทานแรงเฉือนนอกระนาบ	S_{23}	คือ 48.28 MPa

3.4.3 การกำหนดแกนและลักษณะการเรียงตัวของเส้นใย

ในการกำหนดแกนของชิ้นงานวัสดุประกอบนั้นจำเป็นที่จะต้องตั้งแกนขึ้นมาใหม่เนื่องจากแกน x ของแกน global นั้นมีลักษณะการพันตามขวางของเส้นใย จึงต้องปรับตั้งระบบของการกำหนดแกน เพื่อให้แกน x มีทิศทางไปในทิศทางเดียวกันกับแกนชิ้นงาน ดังภาพที่ 3.20 (ก) แสดงการกำหนดแกน ในส่วนของการเรียงตัวของเส้นใยจะเรียงตัวตามทิศทางดังภาพที่ 3.20 (ข)



ภาพที่ 3.20 (ก) การกำหนดใช้แกน coordinate system (ข) ลักษณะการเรียงตัวของเส้นใย

3.4.4 การกำหนดระยะเวลาในการทดสอบชิ้นงาน

การกำหนดเวลาในการทดสอบชิ้นงาน เป็นการกำหนดระยะเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ชิ้นงาน โดยเวลาจะมีความสัมพันธ์ระหว่างระยะยวบต่อความเร็ว ในกรณีการะเบบกึ่งคงที่ ใช้เวลา 0.06 min และกรณีการะเบบกระแทก ใช้เวลา 0.0085 วินาที

3.4.5 การกำหนดการสัมผัสกันของชิ้นงาน

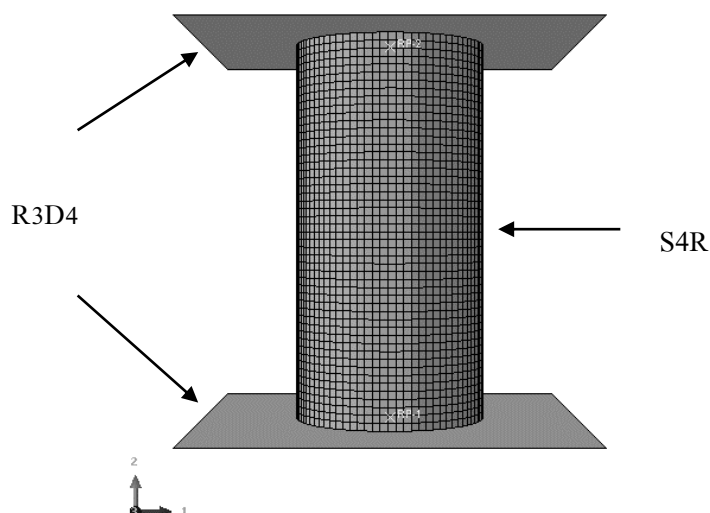
การกำหนดการสัมผัสกันของชิ้นงานที่ทดสอบ ซึ่งเป็นการกำหนดให้ชิ้นงานที่มีโอกาสสัมผัสกัน ได้แก่การกำหนด General contact คือเมื่อเกิดการยุบตัวของท่อชิ้นงานที่สัมผัสกันทั้งหมด และการกำหนด Surface –Self - Surface Contact คือเมื่อเกิดการสัมผัสกันระหว่างแผ่นวัตถุแข็งเกร็งกับชิ้นงาน โดยแผ่นกดด้านบนและแผ่นรองรับด้านล่างมีค่าความเสียดทานเท่ากับ 0.2

3.4.6 การกำหนดสถานะเงื่อนไขขอบ

สถานะเงื่อนไขขอบสำหรับการวิเคราะห์ชิ้นงานประกอบด้วย การกำหนดเงื่อนไขขอบของความเร็วที่กระทำต่อแบบจำลองโดยเลือก Velocity ใน Boundary Condition ซึ่งเหมือนกับ การทดลองจริง ที่ความเร็ว 7 m/s ในกรณีของภาระกระแทก และ 10 mm/min ในกรณีของภาระแบบกึ่งคงที่ ในส่วนการกำหนดขอบเขตของแบบจำลองโดยเลือก Symmetry/Antisymmetry/Encastre ใน Boundary Condition ยึดด้านล่างของแบบจำลองไม่ให้เคลื่อนที่ในทิศทางต่างๆ และในการกำหนดระยะของการเคลื่อนที่ของแผ่นวัตถุแข็งเกร็งให้ไปในทิศทางเดียว โดยเลือก Displacement/Rotation ใน Boundary Condition

3.4.7 ชนิดของเอลิเมนต์

เอลิเมนต์ของท่อขึ้นงาน คือ ชนิด S4R มี 4 โหนด มีผิวสองด้านซึ่งสามารถคำนวณได้ทั้ง Thin Shell และ Thick Shell ใช้การคำนวณแบบความเครียดจำกัดและ integrate ที่กึ่งกลาง element. ขนาดของเมชคือ 0.003 และเอลิเมนต์แผ่นวัตถุแข็งเกร็ง คือ ชนิด R3D4 มี 4 Node กำหนดเป็นวัตถุแข็งเกร็ง ลักษณะของแบบจำลองแสดงในภาพที่ 3.21



ภาพที่ 3.21 ลักษณะ Element ของ FEA Model ในการศึกษา

3.4.8 การกำหนดชื่อไฟล์ที่สร้างขึ้นเพื่อการทดสอบ

เป็นการสร้างชื่อไฟล์ที่เก็บข้อมูลเกี่ยวกับการทดสอบไว้ ซึ่งเมื่อมีการสร้างชิ้นงานการทดสอบ ก็จะมีการสร้างไฟล์เก็บไว้ที่ Folder TEMP เพื่อสำรองข้อมูลที่จำเป็นในการวิเคราะห์ เก็บการสร้างชื่อไฟล์ที่เก็บข้อมูลเกี่ยวกับการทดสอบและตรวจสอบสถานะ การคำนวณของโปรแกรม

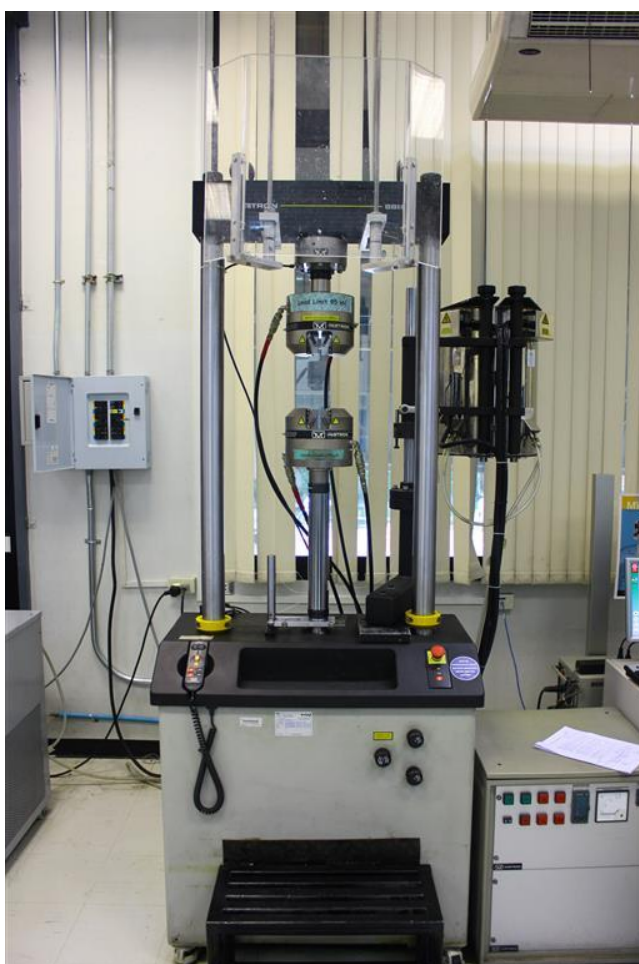
3.4.9 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์โปรแกรม ABQUS/Explicit

การแสดงผลออกทางจอแสดงผลจะแสดงได้หลากหลายรูปแบบกว่าการแสดงผลออกมาในรูปแบบชุดข้อมูลแต่ก็ไม่นำมาวิเคราะห์หาค่าเพิ่มเติม หรือนำมาคำนวณได้เนื่องจากเป็นการแสดงผลเช่น การแสดงผลออกมาในรูปแบบของ ภาพเคลื่อนไหว (Animation) และกราฟแต่ก็สามารถนำมาประกอบการวิเคราะห์ได้ ในการศึกษาได้นำผลที่ได้ในรูปแบบของกราฟเพื่อประกอบการวิเคราะห์รูปแบบการเสียหายและนำข้อมูลในรูปแบบชุดของตัวเลขเพื่อนำมาเขียนเป็นกราฟและคำนวณต่อไป

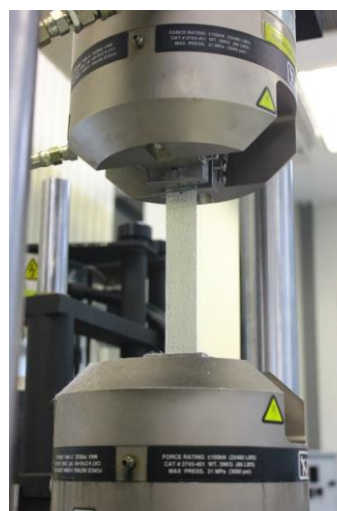
3.5 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ

3.5.1 วิธีการทดสอบชิ้นงานภายใต้แรงดึง

เครื่องทดสอบที่ใช้ในการวิจัย มีชื่อว่า Universal Testing Machine Dynamic Type รุ่น Instron 8801 ความสามารถในการกด 100 kN ดังแสดงในภาพที่ 3.22 จากห้องปฏิบัติการทดสอบทางกล ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ซึ่งหลักการทำงานของเครื่อง โดยใช้แรงดันน้ำมันในการขับเคลื่อนกดหัวทดสอบให้เคลื่อนที่เพื่อให้เกิดแรงกระทำบนชิ้นงานภายใต้ระบบคอมพิวเตอร์ควบคุม แรงที่เกิดขึ้นจะถูกวัดโดยโหลดเซลล์ ส่วนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานทดสอบจะถูกวัดโดยระยะการเคลื่อนที่ของ actuator หรือ extensometer ผลที่ได้จากการทดลองสรุป ดังตารางที่ 3.4



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3.22 (ก) เครื่องทดสอบแรงดึง (ข) การจับยึดชิ้นงาน

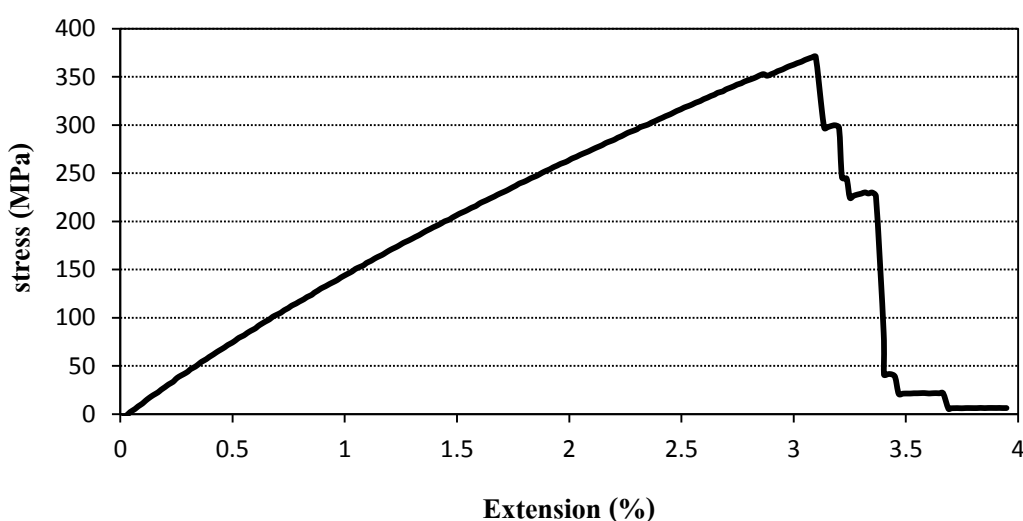
3.5.2 ผลการทดสอบแรงดึง

3.5.2.1 การทดสอบการต้านทานแรงดึงการเรียงตัวของเส้นใยในทิศทางต่างกัน ของชิ้นงาน A

การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 3039 โดยมีการเรียงตัวของเส้นใยแบบหลายทิศทางคือ [0/90]/ [0/90]/ [0/90] ดังภาพที่ 3.23 ขนาดของชิ้นงาน ความหนาคือ 2.00 mm ความกว้างคือ 25.00 mm ความยาวคือ 250.00 mm ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบคือ 10 mm/min ได้ผลดังภาพที่ 3.24 พบว่ากราฟมีแนวโน้มลักษณะสูงขึ้น ซึ่งเกิดจากการต้านทานแรง หลังจากนั้นกราฟตกลงอย่างรวดเร็วซึ่งเกิดจากชิ้นงานเกิดการเสียหาย จากการทดลองพบว่า ค่าความเค้นสูงสุดคือ 370.68 MPa และค่าความต้านทานแรงสูงสุดคือ 18.00 kN



ภาพที่ 3.23 ชิ้นงาน A ที่มีการเรียงตัวของเส้นใยคือ [0/90]/ [0/90]/ [0/90] สำหรับการทดลองแรงดึง



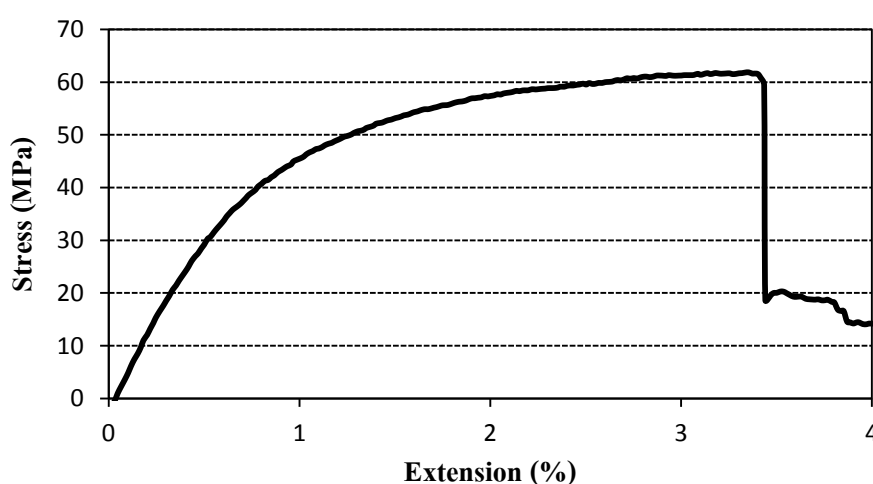
ภาพที่ 3.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะการยืดตัวภายใต้แรงดึงของชิ้นงาน A

3.5.2.2 การทดสอบการต้านทานแรงดึงการเรียงตัวของเส้นใยในทิศทางต่างกันของ ชิ้นงาน B

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบแรงเหวี่ยงในระนาบตามมาตรฐาน ASTM D 3518 และทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 3039 จากการทดสอบด้วยการดึงชิ้นงาน ที่มีมุมของเส้นใย [(45/-45)/(45/-45)/(45/-45)] องศา ความหนาคือ 2.00 mm ความกว้างคือ 25.00 mm ความยาวคือ 250.00 mm ดังภาพที่ 3.25 ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบคือ 10 mm/min ผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 3.26 แสดงความสัมพันธ์กันระหว่าง ความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงาน จากการทดลองพบว่า ค่าความเค้นสูงสุดคือ 62.86 MPa ค่าความต้านทานแรงสูงสุดคือ 2.90 kN



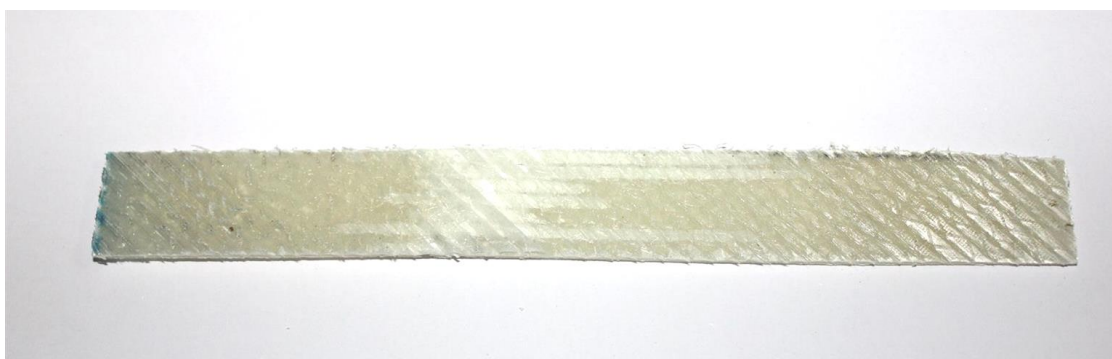
ภาพที่ 3.25 ชิ้นงาน B ที่มีการเรียงตัวของเส้นใยคือ [(45/-45)/(45/-45)/(45/-45)] สำหรับการทดลองแรงดึง



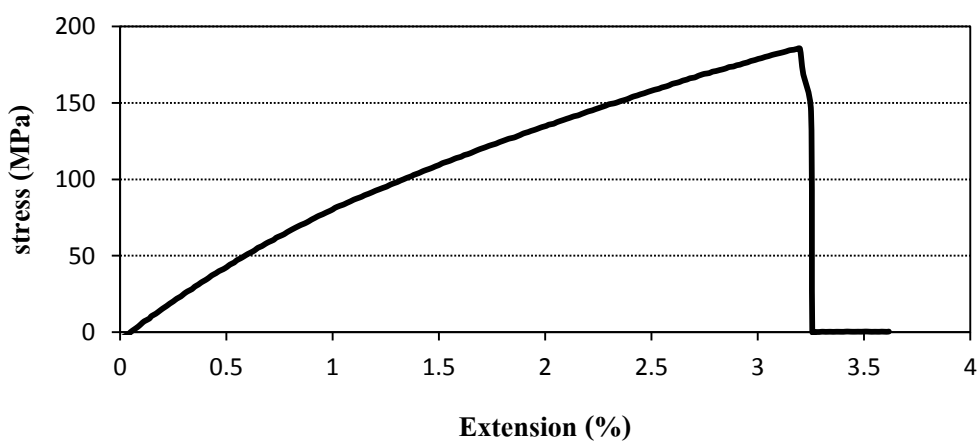
ภาพที่ 3.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะการยืดตัวภายใต้แรงดึงของชิ้นงาน B

3.5.2.3 การทดสอบการต้านทานแรงดึงการเรียงตัวของเส้นใยในทิศทางต่างกันของ ชิ้นงาน C

สำหรับการเตรียมชิ้นงานการทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 3039 โดยมีการเรียงตัวของเส้นใยแบบหลายทิศทางคือ [45/-45]/ [0/90]/ [45/-45] ดังภาพที่ 3.27 ขนาดของชิ้นงานคือ ความหนาคือ 2.00 mm ความกว้างคือ 25.00 mm ความยาวคือ 250.00 mm ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบคือ 10 mm/min ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงความสัมพันธ์กันระหว่าง ความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงาน ภาพที่ 3.28 จากราฟพบว่ากราฟมีแนวโน้มลักษณะสูงขึ้น ซึ่งเกิดจากการต้านทานแรง หลังจากนั้นกราฟตกลงอย่างรวดเร็วซึ่งเกิดจากชิ้นงานเกิดการเสียหาย จากการทดลองพบว่า ค่าความเค้นสูงสุดคือ 185.43 MPa และค่าความต้านทานแรงสูงสุดคือ 10.10 kN



ภาพที่ 3.27 ชิ้นงาน C ที่มีการเรียงตัวของเส้นใยคือ [45/-45]/ [0/90]/ [45/-45] สำหรับการทดลองแรงดึง



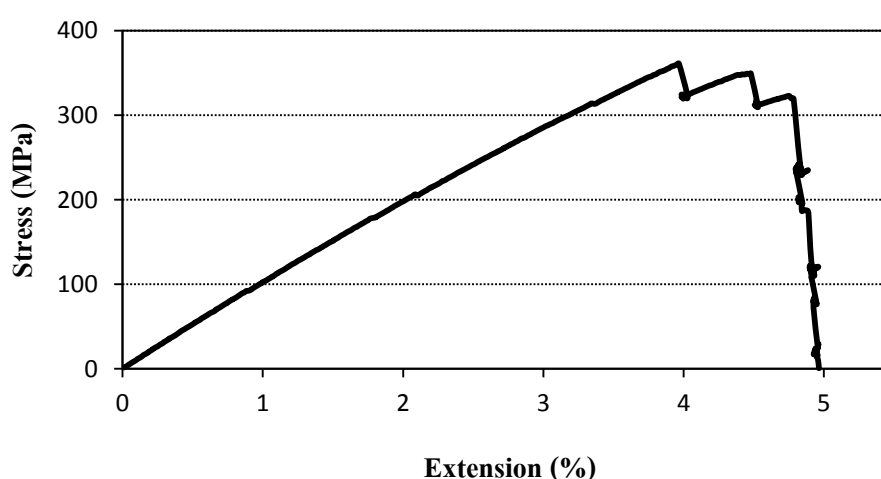
ภาพที่ 3.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะการยืดตัวภายใต้แรงดึงของชิ้นงาน C

3.5.2.4 การทดสอบการต้านทานแรงดึงตามแนวเส้นใยในทิศทางเดียว 0 องศา

การทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 3039 โดยมีการเรียงตัวของเส้นใยตามแนวยาวหรือ [0/0]/ [0/0]/ [0/0] องศา ในทิศทางเดียว ดังภาพที่ 3.29 โดยชิ้นงานทดลองมีความกว้างคือ 25.00 mm และความยาวคือ 250.00 mm ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบคือ 10 mm/min ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงาน ดังภาพที่ 3.30 จากการทดลองพบว่า ค่าความเค้นสูงสุดคือ 361.07 MPa และค่าความต้านทานแรงสูงสุดคือ 23.19 kN



ภาพที่ 3.29 ชิ้นงานที่มีการเรียงตัวของเส้นใยทิศทางเดียว สำหรับการทดลองแรงดึง



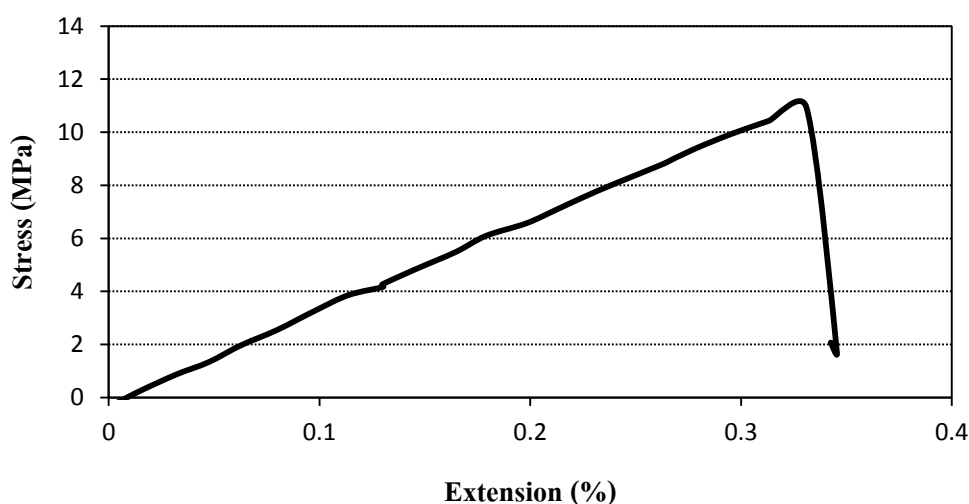
ภาพที่ 3.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงานภายใต้แรงดึง ตามแนวเส้นใยในทิศทางเดียว 0 องศา

3.5.2.5 การทดสอบการต้านทานแรงดึงตามแนวขวางเส้นใยในทิศทางเดียว 90 องศา

การทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 3039 ทดสอบภายใต้แรงดึง โดยมีการเรียงตัวของเส้นใยตามแนวขวางหรือ [90/90]/ [90/90]/ [90/90] องศา ในทิศทางเดียว ดังชิ้นงานแสดงในภาพที่ 3.31 โดยมีความกว้างคือ 25.00 mm และความยาวคือ 250.00 mm ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบคือ 10 mm/min ผลการทดสอบแสดงในดังภาพที่ 3.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงาน จากการทดลองพบว่า ค่าความเค้นสูงสุดคือ 10.94 MPa และค่าความต้านทานแรงสูงสุดคือ 0.59 kN



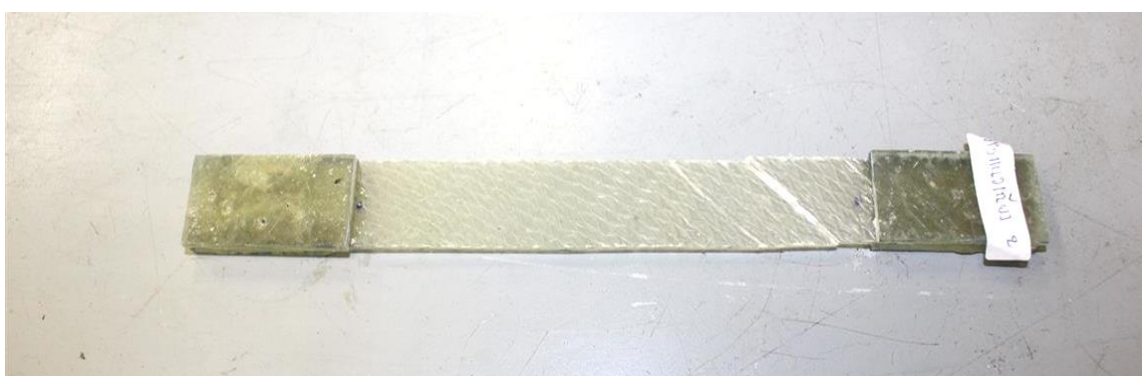
ภาพที่ 3.31 ชิ้นงานที่มีการเรียงตัวของเส้นใยทิศทางเดียว สำหรับการทดลองแรงดึง



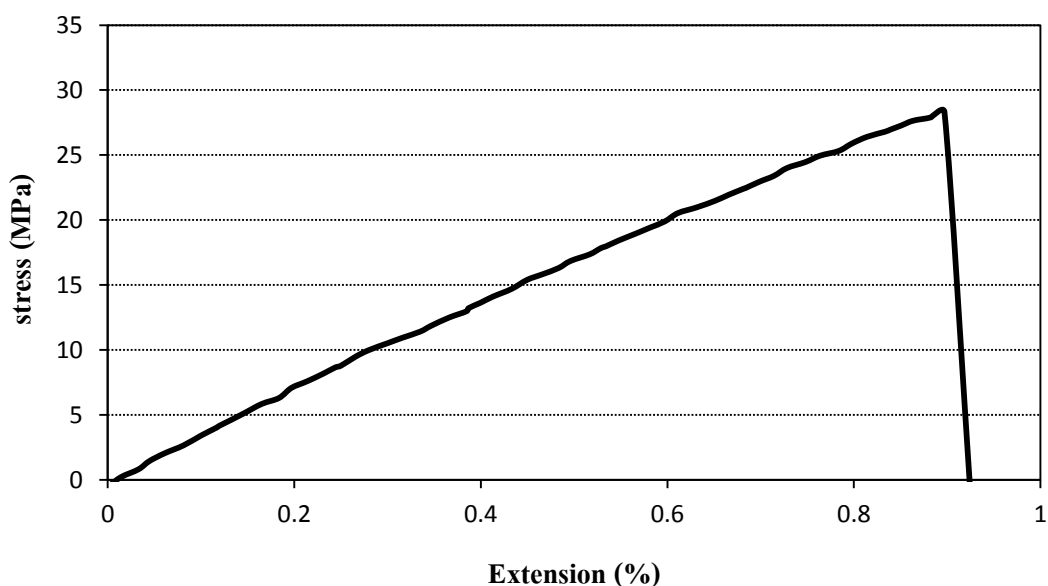
ภาพที่ 3.32 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงานภายใต้แรงดึง ตามแนวเส้นใยในทิศทางเดียว 90 องศา

3.5.2.6 การทดสอบการต้านทานแรงดึงตามแนวเฉียงเส้นใยในทิศทางเดียว 45 องศา

ชิ้นงาน ทดลอง มีการเรียงตัวของเส้นใยตามแนวเฉียงหรือ [45/45]/[45/45]/[45/45] องศา ในทิศทางเดียว ดังแสดงในภาพที่ 3.33 โดยความกว้างคือ 25.00 mm และความยาวคือ 250.00 mm ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบคือ 10 mm/min ผลที่ได้จากการทดสอบ แสดงความสัมพันธ์กันระหว่าง ความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงาน ดังภาพที่ 3.34 ผลจากการทดสอบพบว่า ค่าความเค้นสูงสุดคือ 28.33 MPa และค่าความต้านทานแรงสูงสุดคือ 1.54 kN



ภาพที่ 3.33 ชิ้นงานที่มีการเรียงตัวของเส้นใยทิศทางเดียว สำหรับการทดลองแรงดึง



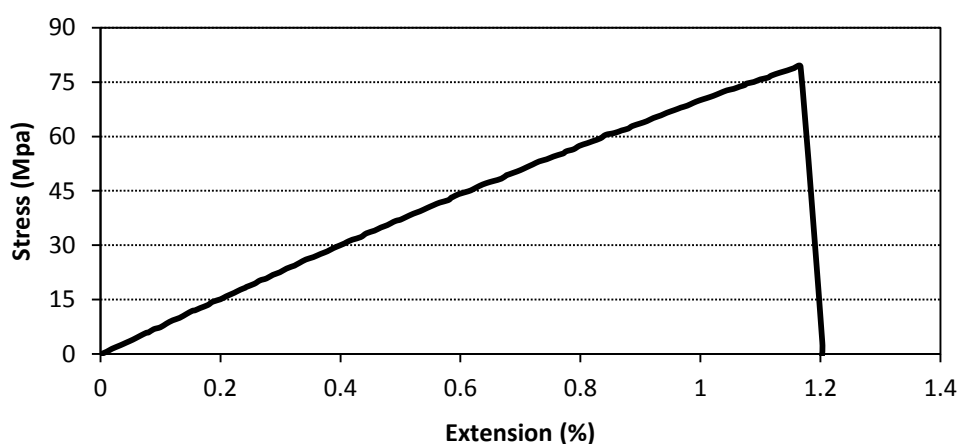
ภาพที่ 3.34 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงานภายใต้แรงดึง ตามแนวเส้นใยในทิศทางเดียว 45 องศา

3.5.2.7 ทดสอบการต้านทานแรงดึงของเส้นใยแบบสุ่มหลายทิศทางความหนา 1.5 mm

การทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 3039 ทดสอบภายใต้แรงดึง โดยมีการเรียงตัวของเส้นใยแบบสุ่มหลายทิศทาง ดังชิ้นงานแสดงในภาพที่ 3.35 โดยมีความกว้างคือ 25.00 mm และความยาวคือ 250.00 mm ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบคือ 10 mm/min ผลการทดสอบแสดงในดังภาพที่ 3.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงาน จากการทดลองพบว่า ค่าความเค้นสูงสุดคือ 79.28 MPa และค่าความต้านทานแรงสูงสุดคือ 3.19 kN



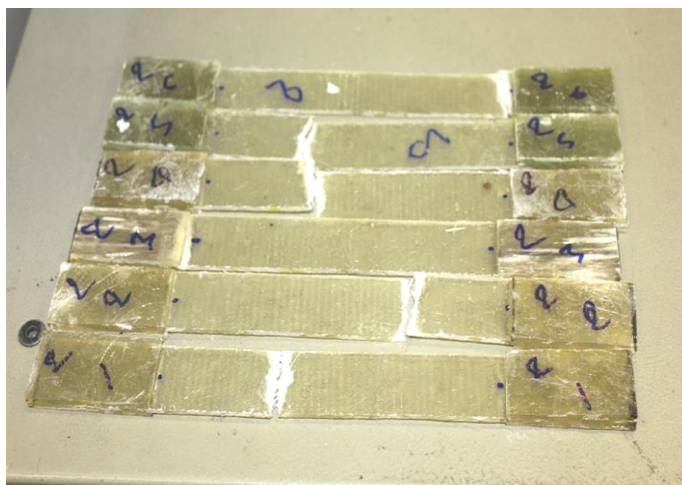
ภาพที่ 3.35 ชิ้นงานที่มีการเรียงตัวของเส้นใยแบบสุ่มหลายทิศทาง สำหรับการทดลองแรงดึง



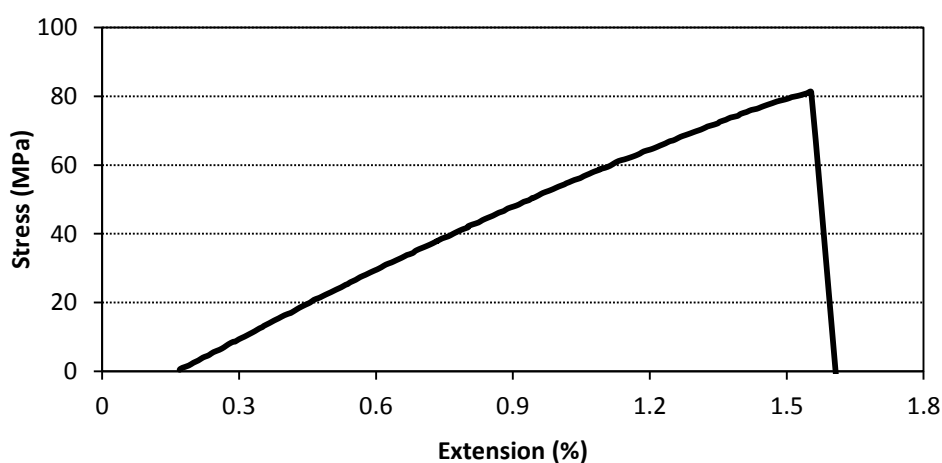
ภาพที่ 3.36 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงานภายใต้แรงดึง เส้นใยแบบสุ่มหลายทิศทางความหนา 1.5 mm

3.5.2.8 ทดสอบการต้านทานแรงดึงของเส้นใยแบบสุ่มหลายทิศทางความหนา 2.0 mm

การทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 3039 ทดสอบภายใต้แรงดึง โดยมีการเรียงตัวของเส้นใยแบบสุ่มหลายทิศทาง ดังชิ้นงานแสดงในภาพที่ 3.37 โดยมีความกว้างคือ 25.00 mm และความยาวคือ 250.00 mm ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบคือ 10 mm/min ผลการทดสอบแสดงในดังภาพที่ 3.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงาน จากการทดลองพบว่า ค่าความเค้นสูงสุดคือ 81.23 MPa และค่าความต้านทานแรงสูงสุดคือ 4.86 kN



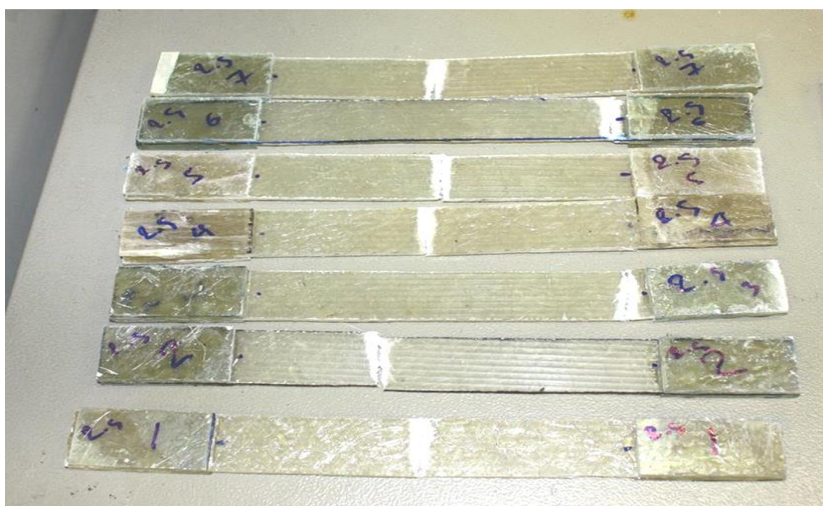
ภาพที่ 3.37 ชิ้นงานที่มีการเรียงตัวของเส้นใยแบบสุ่มหลายทิศทาง สำหรับการทดลองแรงดึง



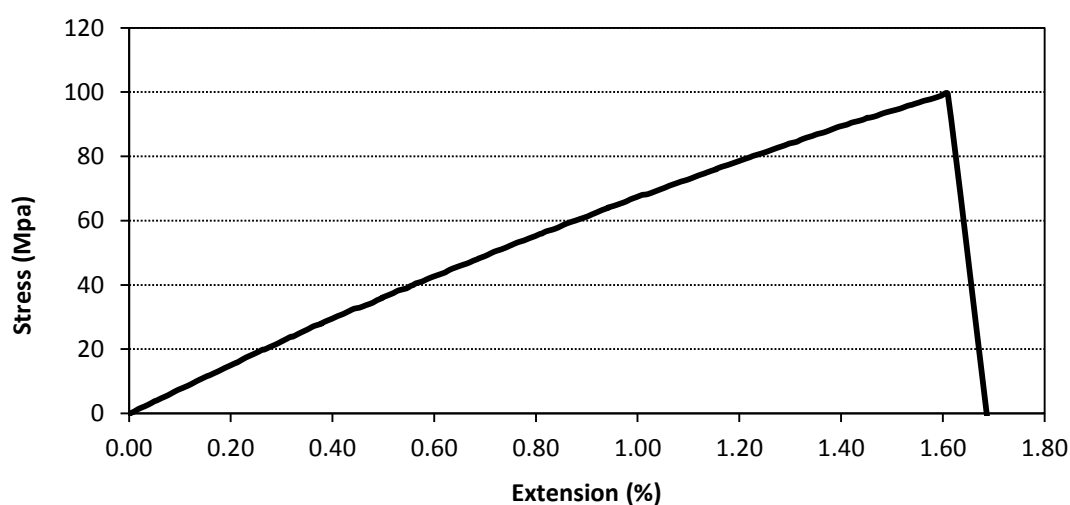
ภาพที่ 3.38 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงานภายใต้แรงดึง เส้นใยแบบสุ่มหลายทิศทางความหนา 2.0 mm

3.5.2.9 ทดสอบการต้านทานแรงดึงของเส้นใยแบบสุ่มหลายทิศทางความหนา 2.5 mm

การทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 3039 ทดสอบภายใต้แรงดึง โดยมีการเรียงตัวของเส้นใยแบบสุ่มหลายทิศทาง ดังชิ้นงานแสดงในภาพที่ 3.39 โดยมีความกว้างคือ 25.00 mm และความยาวคือ 250.00 mm ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบคือ 10 mm/min ผลการทดสอบแสดงในดังภาพที่ 3.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงาน จากการทดลองพบว่า ค่าความเค้นสูงสุดคือ 99.43 MPa และค่าความต้านทานแรงสูงสุดคือ 6.19 kN



ภาพที่ 3.39 ชิ้นงานที่มีการเรียงตัวของเส้นใยแบบสุ่มหลายทิศทาง สำหรับการทดลองแรงดึง



ภาพที่ 3.40 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงานภายใต้แรงดึง เส้นใยแบบสุ่มหลายทิศทางความหนา 2.5 mm

3.5.3 วิธีการทดสอบชิ้นงานภายใต้แรงกด

เครื่องทดสอบที่ใช้ในการวิจัย มีชื่อว่า Universal Testing Machine Dynamic Type รุ่น Instron 4502 ความสามารถในการกด 10 kgf ดังแสดงในภาพที่ 3.4.1 จากห้องปฏิบัติการทดสอบทางกล ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) หลักการทำงานของเครื่อง โดยใช้แรงดันน้ำมันในการขับเคลื่อนกดหัวทดสอบให้เคลื่อนที่เพื่อให้เกิดแรงกระทำบนชิ้นงานภายใต้ระบบคอมพิวเตอร์ควบคุม แรงที่เกิดขึ้นจะถูกวัดโดย โหลดเซลล์ ส่วนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานทดสอบจะถูกวัดโดยระยะการเคลื่อนที่ของ actuator หรือ extensometer



(ก)



(ข)

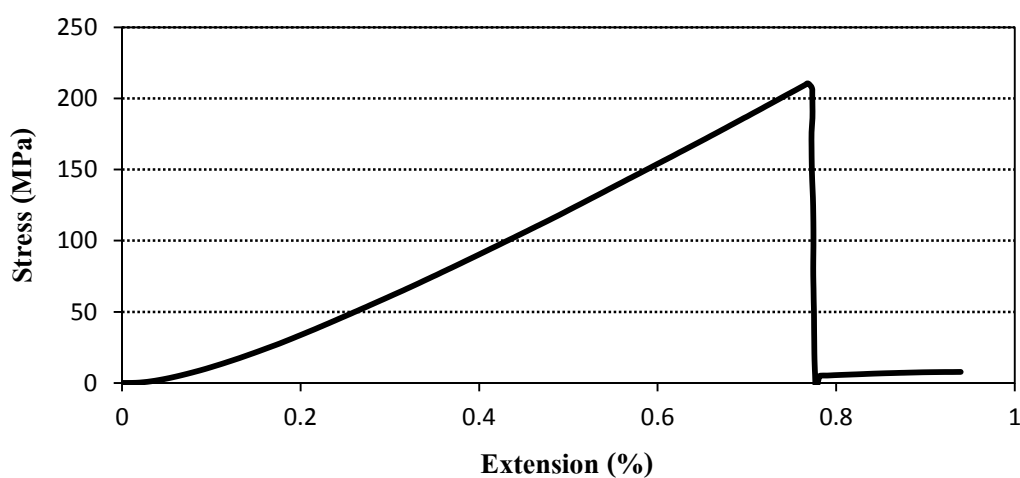
ภาพที่ 3.41 (ก) เครื่องทดสอบกด (ข) ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบแรงกด

3.5.3.1 การทดสอบการต้านทานแรงกดตามแนวเส้นใยในทิศทางเดียว 0 องศา

เตรียมชิ้นงานตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 695 โดยมีการเรียงตัวของเส้นใยตามแนวยาวหรือ [0/0]/[0/0]/[0/0] องศา ในทิศทางเดียวของชิ้นงาน ดังภาพที่ 3.42 โดยให้มีความหนาคือ 5.00 mm ความกว้างคือ 5.00 mm ความยาวคือ 25.00 mm ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบคือ 5 mm/min ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 3.43 ซึ่งพบว่ากราฟมีแนวโน้มลักษณะสูงขึ้น ซึ่งเกิดจากการต้านทานแรง หลังจากนั้นกราฟตกลงอย่างรวดเร็วซึ่งเกิดจากชิ้นงานเกิดการเสียหาย จากการทดลองพบว่า ค่าความเค้นสูงสุดคือ 210.55 MPa และค่าความต้านทานแรงสูงสุดคือ 5.54 kN



ภาพที่ 3.42 ชิ้นงานที่มีการเรียงตัวของเส้นใยตามแนวยาวของชิ้นงาน สำหรับการทดลองแรงกด



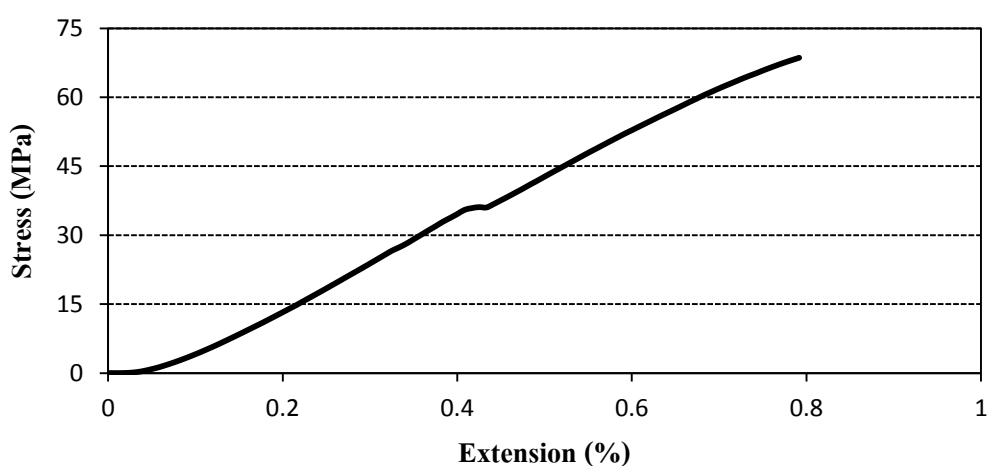
ภาพที่ 3.43 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงานภายใต้แรงกด ตามแนวเส้นใยในทิศทางเดียว 0 องศา

3.5.3.2 การทดสอบการต้านทานแรงกดตามแนวเส้นใยในทิศทางเดียว 90 องศา

เตรียมชิ้นงานตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 695 โดยมีการเรียงตัวของเส้นใยตามแนวขวางหรือ [90/90]/ [90/90]/ [90/90] องศา ในทิศทางเดียวของชิ้นงาน ดังภาพที่ 3.44 โดยความหนาคือ 5.00 mm ความกว้างคือ 5.00 mm ความยาวคือ 25.00 mm ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบคือ 5 mm/min ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงความสัมพันธ์กันระหว่าง ความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงาน ดังภาพที่ 3.45 จากการทดลองพบว่า ค่าความเค้นสูงสุดคือ 69.88 MPa และค่าความต้านทานแรงสูงสุดคือ 1.81 kN



ภาพที่ 3.44 ชิ้นงานที่มีการเรียงตัวของเส้นใยตามแนวขวางของชิ้นงานสำหรับการทดลองแรงกด



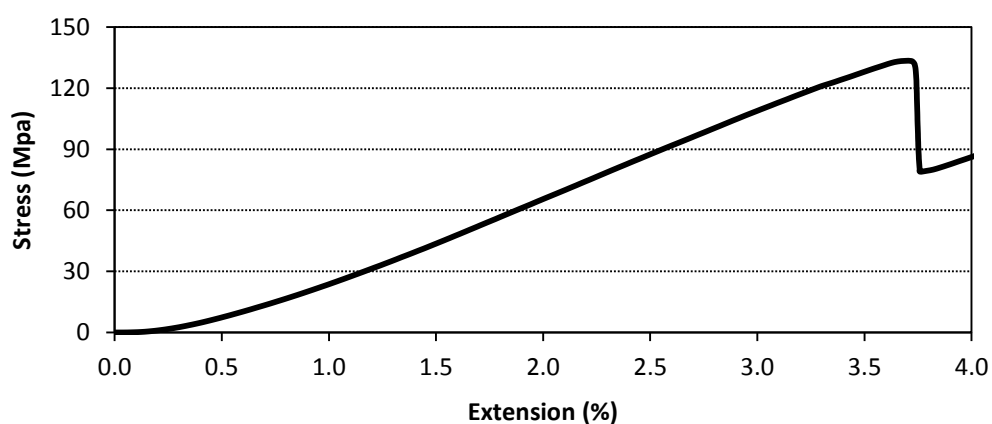
ภาพที่ 3.45 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงานภายใต้แรงกด ตามแนวเส้นใยในทิศทางเดียว 90 องศา

3.5.3.3 การทดสอบการต้านทานแรงกดตามแนวเส้นใยแบบสุ่มหลายทิศทาง

เตรียมชิ้นงานตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 695 โดยมีการเรียงตัวของเส้นใยแบบสุ่มหลายทิศทาง ดังภาพที่ 3.46 โดยให้มีความหนาคือ 5.00 mm ความกว้างคือ 5.00 mm ความยาวคือ 25.00 mm ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบคือ 5 mm/min ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 3.47 กราฟมีแนวโน้มลักษณะสูงขึ้น ซึ่งเกิดจากการต้านทานแรง หลังจากนั้นกราฟตกลงอย่างรวดเร็วซึ่งเกิดจากชิ้นงานเกิดการเสียหาย จากการทดลองพบว่า ค่าความเค้นสูงสุดคือ 133.37 MPa และค่าความต้านทานแรงสูงสุดคือ 3.25 kN



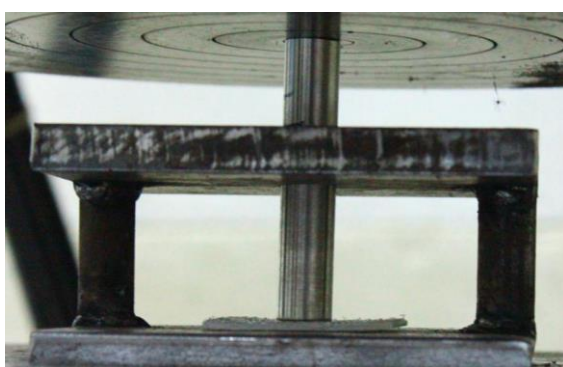
ภาพที่ 3.46 ชิ้นงานที่มีการเรียงตัวของเส้นใยตามแนวขวางของชิ้นงานสำหรับการทดลองแรงกด



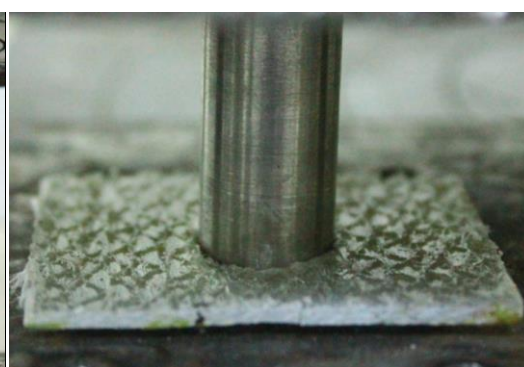
ภาพที่ 3.47 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงานภายใต้แรงกด เส้นใยแบบสุ่มหลายทิศทาง

3.5.4 วิธีการทดสอบชิ้นงานภายใต้แรงเฉือน

เครื่องทดสอบการกดแบบกระทำแบบกึ่งคงที่ ซึ่งใช้ในการวิจัยมีชื่อว่า เครื่อง ESH Testing Limited รายละเอียดของเครื่องซึ่งอธิบายในหัวข้อ 3.1.1 ซึ่งเป็นเครื่องทดสอบที่ใช้ระบบคอมพิวเตอร์กับระบบไฮดรอลิกส์ (Hydraulic) และอุปกรณ์การทดสอบแรงเฉือนที่มีลักษณะโดยหัวกดคือเหล็กทรงกระบอกตัน เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 mm ทดสอบโดยกดชิ้นงานผ่านความหนาให้ขาดออกจากกัน ดังภาพที่ 3.48



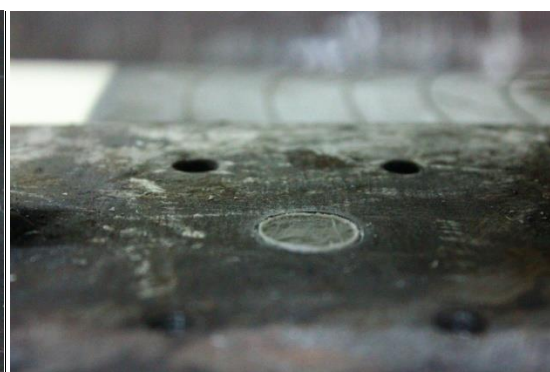
(ก) อุปกรณ์ทดสอบ



(ข) ลักษณะหัวกดเฉือนผ่านความหนาของชิ้นงาน



(ค) ด้านล่างของอุปกรณ์ทดสอบ

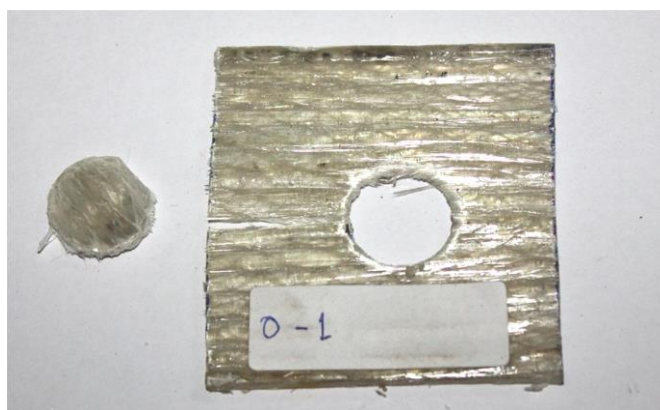


(ง) ชิ้นงานขาดออกจากกัน

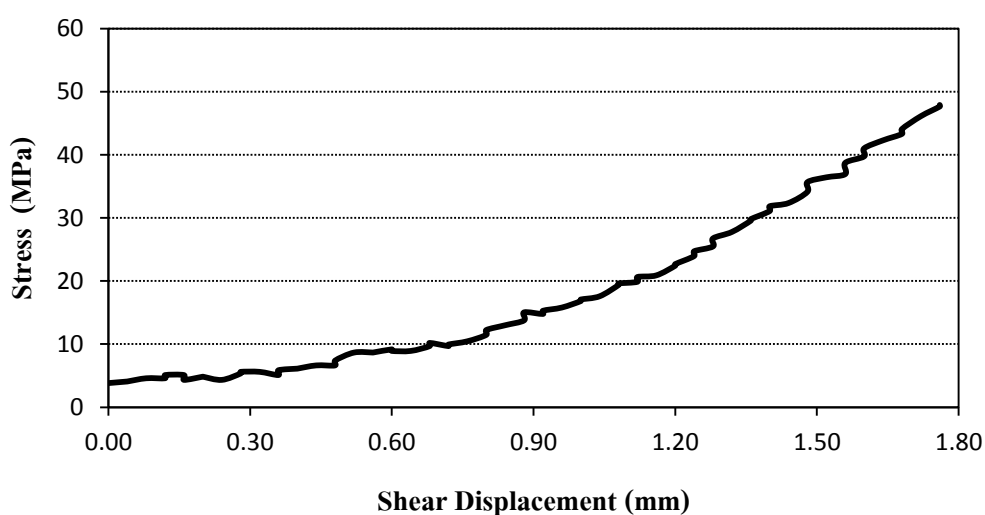
ภาพที่ 3.48 อุปกรณ์การทดสอบแรงเฉือน

3.5.4.1 การทดสอบแรงเฉือนนอกระนาบในทิศทางเดียว 0 องศา

เตรียมชิ้นงาน โดยให้มีการเรียงตัวของเส้นใยตามแนวยาว [0/0]/ [0/0]/ [0/0] องศา ในทิศทางเดียว ดังภาพที่ 3.49 โดยชิ้นงานมีความหนาคือ 2.00 mm ความกว้างคือ 50.00 mm ความยาวคือ 50.00 mm ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบคือ 10 mm/min ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงาน ภาพที่ 3.50



ภาพที่ 3.49 ชิ้นงานที่มีการเรียงตัวของเส้นใยตามแนวขวางของชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงเฉือน



ภาพที่ 3.50 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงานภายใต้แรงเฉือน ตามแนวเส้นใยทิศทางเดียว 0 องศา

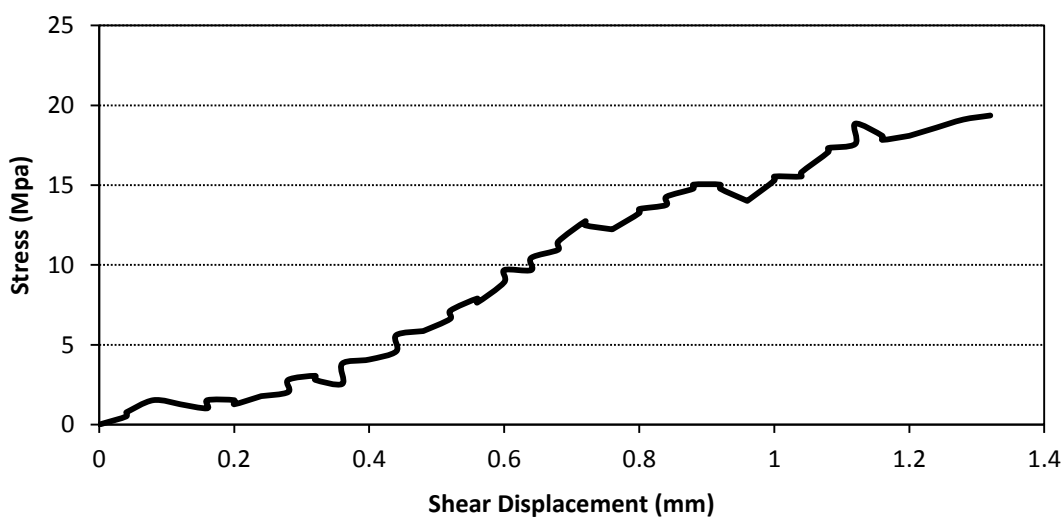
3.5.4.2 การทดสอบแรงเฉือนนอกระนาบของเส้นใยแก้วแบบสุ่มหลายทิศทางตามความหนา

1.5 mm

เตรียมชิ้นงาน โดยให้มีการเรียงตัวของเส้นใยแบบสุ่มหลายทิศทาง ดังภาพที่ 3.51 โดยชิ้นงานมีความหนาคือ 1.50 mm ความกว้างคือ 50.00 mm ความยาวคือ 50.00 mm ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบคือ 10 mm/min ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงาน ภาพที่ 3.52 จากการทดลองพบว่า ค่าความเค้นสูงสุดคือ 19.36 MPa และค่าความต้านทานแรงสูงสุดคือ 3.72 kN



ภาพที่ 3.51 ชิ้นงานที่มีการเรียงตัวของเส้นใยแบบสุ่มหลายทิศทางของชิ้นงานสำหรับการทดลองแรงเฉือน



ภาพที่ 3.52 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงานภายใต้แรงเฉือน เส้นใยแก้วแบบสุ่มหลายทิศทางความหนา 1.5 mm

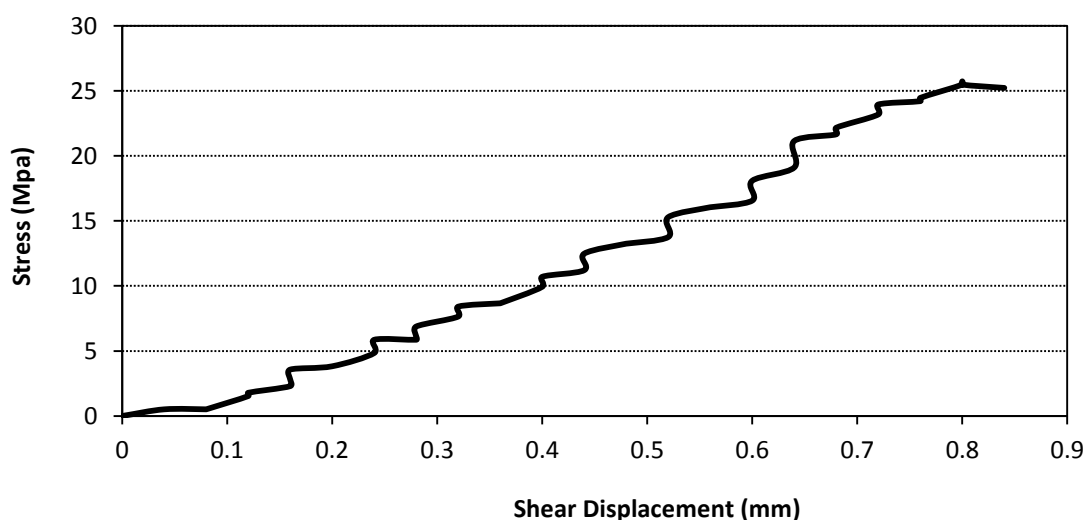
3.5.4.3 การทดสอบแรงเฉือนนอกระนาบของเส้นใยแก้วแบบสุ่มหลายทิศทางความหนา

2.0 mm

เตรียมชิ้นงาน โดยให้มีการเรียงตัวของเส้นใยแบบสุ่มหลายทิศทาง ดังภาพที่ 3.53 โดยชิ้นงานมีความหนาคือ 2.00 mm ความกว้างคือ 50.00 mm ความยาวคือ 50.00 mm ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบคือ 10 mm/min ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงาน ภาพที่ 3.54 จากการทดลองพบว่า ค่าความเค้นสูงสุดคือ 30.57 MPa และค่าความต้านทานแรงสูงสุดคือ 5.88 kN



ภาพที่ 3.53 ชิ้นงานที่มีการเรียงตัวของเส้นใยแบบสุ่มหลายทิศทางของชิ้นงานสำหรับการทดลองแรงเฉือน

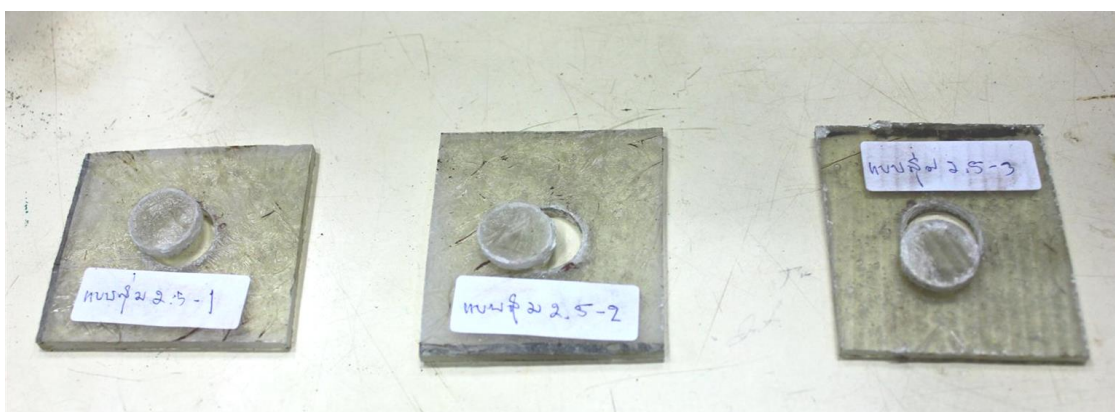


ภาพที่ 3.54 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงานภายใต้แรงเฉือน เส้นใยแก้วแบบสุ่มหลายทิศทางความหนา 2.0 mm

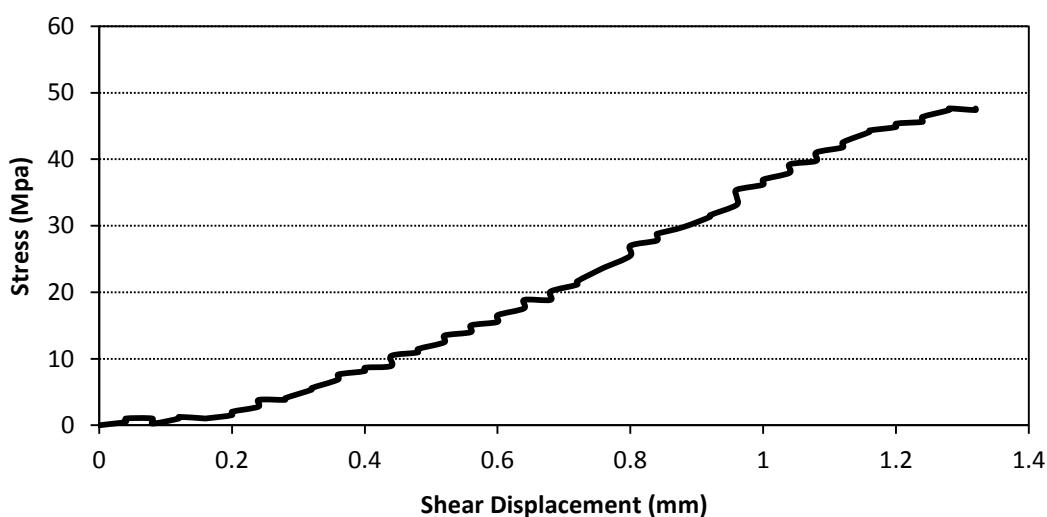
3.5.4.4 การทดสอบแรงเฉือนนอกระนาบของเส้นใยแก้วแบบสุ่มหลายทิศทางตามความหนา

2.5 mm

เตรียมชิ้นงาน โดยให้มีการเรียงตัวของเส้นใยแบบสุ่มหลายทิศทาง ดังภาพที่ 3.55 โดยชิ้นงานมีความหนาคือ 2.5 mm ความกว้างคือ 50.00 mm ความยาวคือ 50.00 mm ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบคือ 10 mm/min ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงาน ภาพที่ 3.56 จากการทดลองพบว่า ค่าความเค้นสูงสุดคือ 47.64 MPa และค่าความต้านทานแรงสูงสุดคือ 10.05 kN



ภาพที่ 3.55 ชิ้นงานที่มีการเรียงตัวของเส้นใยแบบสุ่มหลายทิศทางของชิ้นงานสำหรับการทดลองแรงเฉือน



ภาพที่ 3.56 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงานภายใต้แรงเฉือน เส้นใยแก้วแบบสุ่มหลายทิศทางความหนา 2.5 mm

ตารางที่ 3.4 ผลทดสอบคุณสมบัติของชิ้นงาน

การทดสอบ	ทิศทางเรียงตัวของเส้นใย (องศา)	ภาระสูงสุด (kN)	ความเค้น สูงสุด (MPa)	มอดูลัสความ ยืดหยุ่น (GPa)	ระยะยืดตัว (%)
แรงดึง	แบบสุ่ม หน้า 1.50 mm	3.19	79.28	7.71	1.17
	แบบสุ่ม หน้า 2.0 mm	4.86	81.23	6.93	1.55
	แบบสุ่ม หน้า 2.5 mm	6.19	99.43	7.54	1.61
	[0/90]/[0/90]/[0/90]	18.00	370.68	15.91	3.10
	[45/-45]/[45/45]/[45/45]	2.90	62.86	7.30	3.44
	[45/-45]/[0/90]/[45/-45]	10.10	185.43	9.49	3.20
	[0/0]/[0/0]/[0/0]	23.16	361.07	15.71	2.64
	[90/90]/[90/90]/[90/90]	0.59	10.94	5.61	0.22
	[45/45]/[45/45]/[45/45]	1.54	28.33	5.58	0.60
แรงกด	แบบสุ่ม	3.25	133.37	4.40	3.73
	[0/0]/[0/0]/[0/0]	5.54	210.55	9.09	2.87
	[90/90]/[90/90]/[90/90]	1.81	69.88	3.61	2.68
					ระยะยืดตัว (mm)
แรงเฉือน	[0/0]/[0/0]/[0/0]	9.29	48.28	2.41	1.76
	แบบสุ่ม หน้า 1.50 mm	3.72	19.36	1.46	1.32
	แบบสุ่ม หน้า 2.0 mm	5.88	30.57	3.63	0.84
	แบบสุ่ม หน้า 2.5 mm	10.05	47.64	3.60	1.32

3.6 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลองของเครื่องทดสอบแรงกระแทก

ในการศึกษานี้ใช้โปรแกรมในการบันทึกข้อมูลที่มีชื่อว่า KYOWA DCS 100A ดังภาพที่ 3.57 (ก) โหลดเซลล์ที่ใช้ในการวัดแรงมีความสามารถรับแรงกระแทกสูงสุดได้ 200 kN ของ KYOWA Model LC-20TV ดังภาพที่ 3.57 (ข) และอุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงสัญญาณของไฟฟ้า คือ Data logger ชนิด PCD-300 Series ดังภาพที่ 3.57 (ค) สำหรับการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบแรงกระแทกดังแสดงในภาพที่ 3.58 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.6.1 เชื่อมต่อสายโพลีคาร์บอเนตเข้ากับ Data logger และต่อสายเคเบิลจาก Data logger เข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์

3.6.2 ชั่งน้ำหนักของหัวค้อน ทำได้โดยนำหัวค้อนวางบนโพลีคาร์บอเนต จากนั้นเพิ่มหรือลดน้ำหนักที่ต้องการทดสอบ ในการศึกษาครั้งนี้หัวค้อนน้ำหนักประมาณ 45 kg

3.6.3 ติดตั้งกล้องความเร็วสูง เพื่อใช้ในการบันทึกพฤติกรรมการตอบสนองชิ้นงาน โดยบันทึกเป็นภาพเคลื่อนไหว สำหรับการปรับตั้งค่าในโปรแกรมมีรายละเอียดดังนี้

3.6.3.1 ความละเอียดในการบันทึกภาพเคลื่อนไหว คือ 1000 fps

3.6.3.2 ความเร็วชัตเตอร์ คือ 1250/s

3.6.3.3 สมดุลแสงสีขาว คือ Manual

3.6.3.4 รูรับแสง คือ 5.0

3.6.3.5 ความไวแสง คือ 400

3.6.4 ติดตั้งหลอดไฟ (SpotLight) เพื่อเพิ่มความสว่างให้กับชิ้นงานในการศึกษาที่ใช้หลอดไฟขนาด 1500 W ทั้งหมด 2 หลอด

3.6.5 ขั้นตอนการทดลองมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.6.5.1 ดึงหัวค้อนด้วยรถมอเตอร์ไฟฟ้า ตามความสูงที่ต้องการทดลอง สำหรับในการศึกษาใช้ความสูงระหว่างปลายชิ้นงานและปลายหัวค้อนเท่ากับ 2.47 m

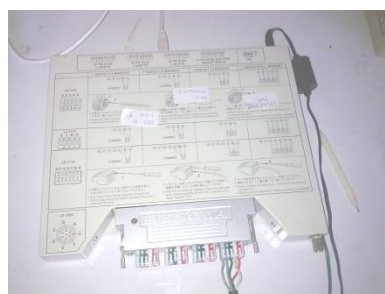
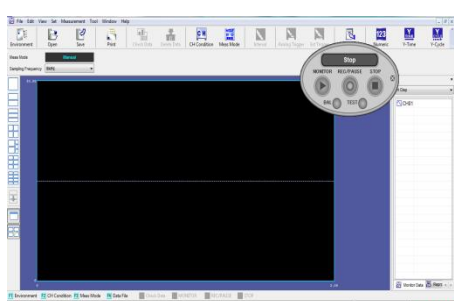
3.6.5.2 วางชิ้นงานในระดับกึ่งกลาง บนฐานรองรับแรงกระแทก

3.6.5.3 ปลดปล่อยหัวค้อนกระแทกต่อชิ้นงาน

3.6.5.4 บันทึกกราฟในช่วงระหว่างกระแทกจากโปรแกรม

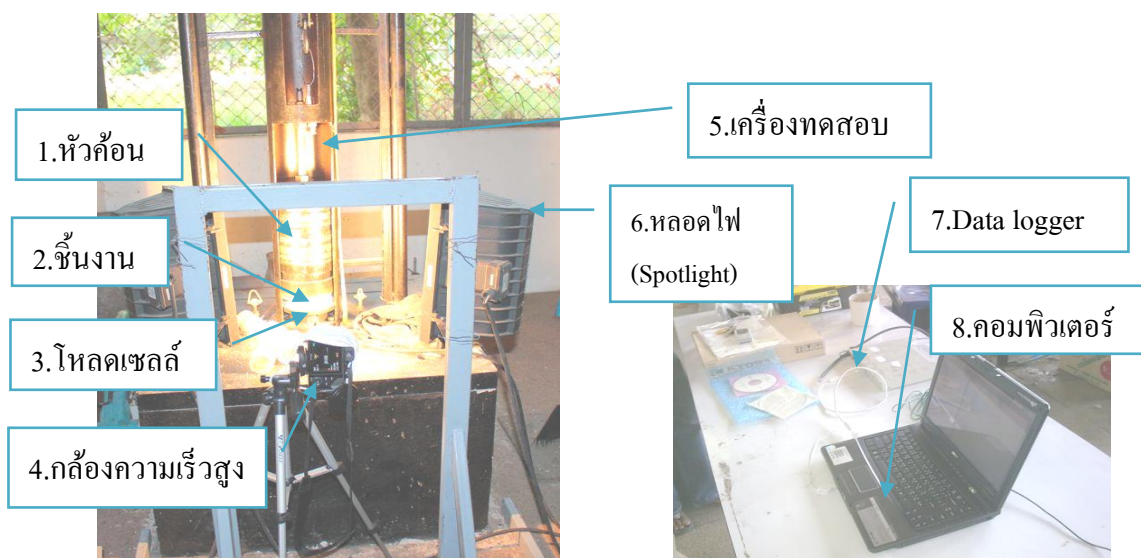
3.6.5.5 บันทึกภาพเคลื่อนไหวด้วยกล้องความเร็วสูง

3.6.5.6 วิเคราะห์ผลการทดลอง



(ก) โปรแกรม KYOWA DCS100A (ข) โพลีคาร์บอเนต (ค) Data logger PCD-300B Series

ภาพที่ 3.57 อุปกรณ์การทดลองของเครื่องทดสอบ



ภาพที่ 3.58 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลองของเครื่องทดสอบแรงกระแทก

3.7 ขั้นตอนในการศึกษา

การศึกษานี้ประกอบไปด้วยการทดลองและการใช้แบบจำลองทาง FEA โดยมีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

3.7.1 การทำการทดลอง

3.7.1.1 เตรียมชิ้นงานทดลองให้มีขนาดตามที่กำหนดในขอบเขต

3.7.1.2 นำชิ้นงานไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทกและเครื่องทดสอบแบบกึ่งคงที่ และแบบกระแทก ตามเงื่อนไขที่กำหนดในขอบเขตการศึกษา

3.7.1.3 บันทึกข้อมูลเป็นแรงปฏิกิริยาและระยะยุบตัวเพื่อทำการวิเคราะห์หาความสามารถในการรับแรงกระแทก

3.7.1.4 บันทึกภาพเพื่อประกอบการวิเคราะห์ข้อมูล

3.7.2 การทำแบบจำลองด้วย FEA

3.7.2.1 ศึกษาวิธีใช้งานโปรแกรม

3.7.2.2 ทดสอบคุณสมบัติวัสดุเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการสร้างแบบจำลอง

3.7.2.3 สร้างแบบจำลองและทำการทดสอบแบบจำลอง โดยใช้เงื่อนไขเดียวกับแบบการทดลอง

3.7.2.4 เปรียบเทียบผลการทดลองและแบบจำลอง

3.7.2.5 ใช้แบบจำลองในการศึกษาพฤติกรรมการเสียหายของชิ้นงาน

บทที่ 4

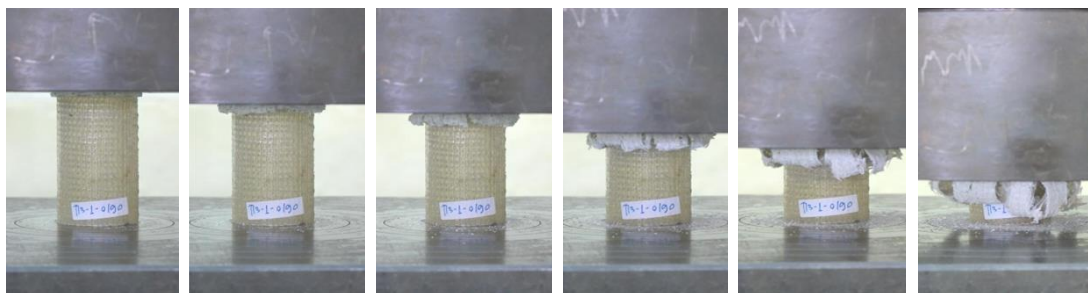
ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล

4.1 ชิ้นงานทรงกระบอก

4.1.1 การตอบสนองของท่อต่อแรงกระทำแบบกึ่งคงที่

4.1.1.1 การเสียหายของชิ้นงาน A

จากภาพที่ 4.1 แสดงถึงรูปแบบการเสียหายของชิ้นงาน ที่ได้จากการทดลองภายใต้ภาระกระทำในแนวแกนแบบกึ่งคงที่ ของชิ้นงานที่มีลักษณะการเรียงตัวของเส้นใยตามแนวตั้ง 0 องศา และแนวขวาง คือ 90 องศา พบว่าในช่วงแรกเกิดการยุบตัวของชิ้นงานช้า หลังจากภาระกระทำต่อชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น ชิ้นงานเกิดการยุบตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งการเริ่มต้นการเสียหายเกิดขึ้นที่ปลายด้านบนของชิ้นงาน มีลักษณะแตกละเอียดเป็นชิ้นเล็กและบานออกเป็นพุ่ม หลังจากนั้นชิ้นงานเริ่มแยกและบานออกเป็นสองส่วน ได้แก่ ส่วนแรกเส้นใยแยกและยุบเข้าด้านในของชิ้นงาน และส่วนที่สองเส้นใยแยกและบานออกด้านนอกของชิ้นงาน จนกระทั่งสิ้นสุดการยุบตัว

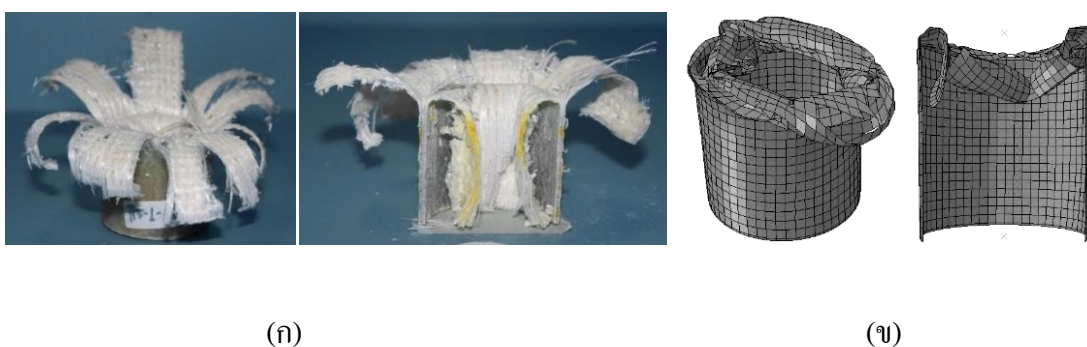


S = 10 mm S = 20 mm S = 30 mm S = 40 mm S = 50 mm S = 60 mm

ภาพที่ 4.1 การเสียหายภายใต้ภาระกระทำในแนวแกนแบบกึ่งคงที่ของชิ้นงาน A ที่ระยะยุบตัวต่างๆ (S)

ภาพที่ 4.2 แสดงการเสียหายสุดท้ายของชิ้นงาน โดยแสดงผลการทดลองเทียบกับแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยภาพที่ 4.2 (ก) เป็นผลการทดลองซึ่งจะสังเกตเห็นว่าชิ้นงานมีลักษณะบานออกเป็นแฉกซึ่งเกิดจากอิทธิพลของเส้นใยในแนวตั้ง ที่สามารถรับภาระในแนวแกน

โดยตรง และอิทธิพลเส้นใยในแนวขวางทำหน้าที่ประคองให้เส้นใยในแนวตั้งให้รับภาระแนวแกนได้ดีขึ้น การเสียหายเกิดขึ้นที่ปลายด้านบน มีลักษณะบานออกและแตกละเอียดเป็นชิ้นเล็ก ส่วนผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ ในภาพที่ 4.2 (ข) เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองซึ่งมีลักษณะการเริ่มต้นเสียหายด้านบนคล้ายกัน แต่ในส่วนการบิดขาดของชิ้นงาน การทดลองมีลักษณะบานออกเป็นแฉกและเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองมีลักษณะแตกและยุบตัวในชิ้นงาน ซึ่งมีลักษณะค่อนข้างแตกต่างกัน

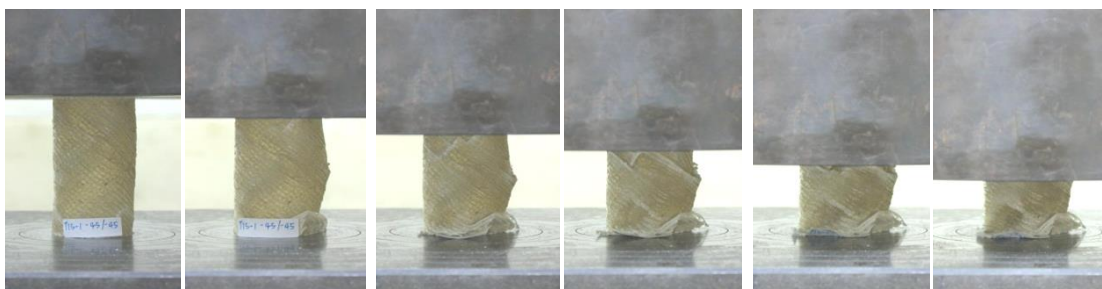


ภาพที่ 4.2 การเสียหายสุดท้ายของชิ้นงาน A ภายใต้แรงกึ่งคงที่ (ก) การทดลอง
(ข) แบบจำลองทาง FEA

4.1.1.2 การเสียหายของชิ้นงาน B

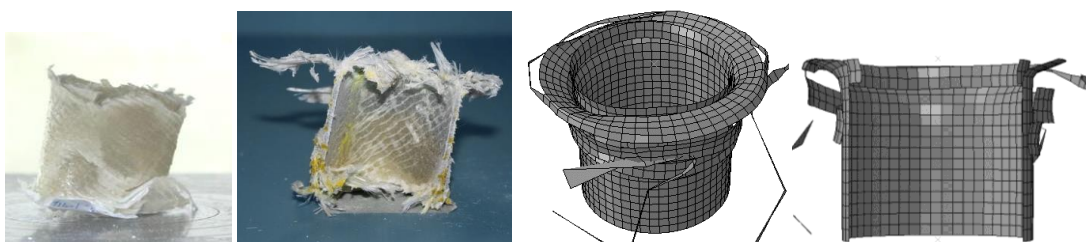
จากภาพที่ 4.3 และ 4.4 (ก) แสดงรูปแบบการเสียหายของชิ้นงานที่มีลักษณะมุมไขว้โดยการจัดเรียงตัวของเส้นใยในแนวเฉียง คือ (45/-45) จากการทดลองพบว่าการเริ่มต้นการเสียหายเกิดขึ้นที่ด้านล่างของชิ้นงาน มีลักษณะการเสียหายตามแนวเฉียงของเส้นใย หลังจากนั้นจึงเกิดการเสียหายด้านบนของชิ้นงาน มีการเสียหายยุบตัวและซ้อนกันภายในชิ้นงาน ซึ่งเกิดจากการเรียงตัวของเส้นใยในแนวเฉียง เมื่อรับภาระในแนวแกนทำให้เส้นใยเกิดการแตกหักตลอด จนสิ้นสุดการยุบตัว

ในส่วนของแบบจำลองพบว่า ลักษณะการเสียหายเกิดขึ้นที่ปลายด้านบนของชิ้นงาน จากนั้นยุบตัวลงและซ้อนกัน ดังภาพที่ 4.4 (ข) ซึ่งคล้ายกับที่ได้จากการทดลอง พิจารณารูปแบบการเสียหายสุดท้ายของชิ้นงานจากการทดลองเปรียบเทียบกับแบบจำลองทาง FEA พบว่าการเริ่มต้นการเสียหายของการทดลองเริ่มเสียหายจากด้านบนและมีลักษณะแตกออกตามแนวเฉียงของเส้นใย ซึ่งมีลักษณะคล้ายกันกับแบบจำลอง



$S = 10 \text{ mm}$ $S = 20 \text{ mm}$ $S = 30 \text{ mm}$ $S = 40 \text{ mm}$ $S = 50 \text{ mm}$ $S = 60 \text{ mm}$

ภาพที่ 4.3 การเสียหายภายใต้ภาระกระทำในแนวแกนแบบกึ่งคงที่ของชิ้นงาน B ที่ระยะยวบตัว
ต่างๆ (S)



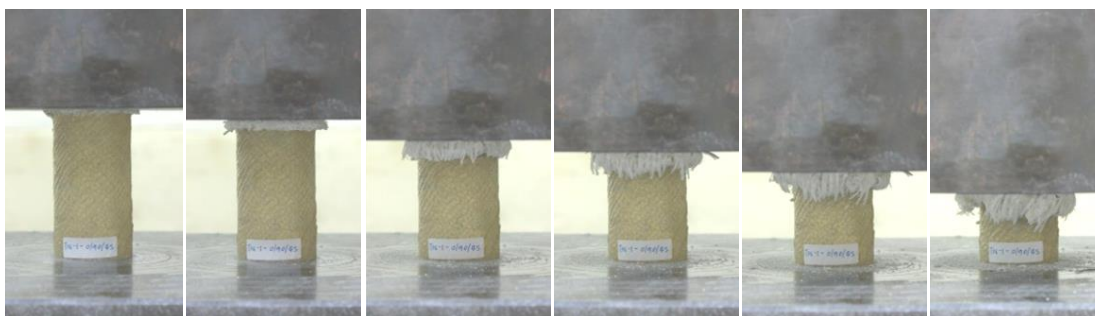
(ก)

(ข)

ภาพที่ 4.4 การเสียหายสุดท้ายของชิ้นงาน B ภายใต้แรงกึ่งคงที่ (ก) การทดลอง
(ข) แบบจำลองทาง FEA

4.1.1.3 การเสียหายของชิ้นงาน C

จากภาพที่ 4.5 การเริ่มต้นของการเสียหายของชิ้นงาน C เกิดขึ้นที่ปลายด้านบนของชิ้นงาน มีลักษณะแตกละเอียดเป็นฟุ้ง หลังจากนั้นเส้นใยแบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ ส่วนแรกยุบเข้าด้านในของชิ้นงาน ส่วนที่สองแยกออกด้านนอกชิ้นงาน จนกระทั่งสิ้นสุดการยุบตัวจากการสังเกตการเสียหายสุดท้ายของชิ้นงานในภาพที่ 4.6 (ก) พบว่ามีลักษณะบานออกเป็นฟุ้ง ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของเส้นใยในแนวตั้ง 0 องศา ทำให้รับภาระในแนวแกนโดยตรง และอิทธิพลของเส้นใยในแนวเฉียง ทำหน้าที่ประคองเส้นใยในแนวตั้งและรับภาระในแนวแกนด้วย ในส่วนของแบบจำลองพบว่า ลักษณะการเสียหายเกิดขึ้นที่ปลายด้านบนของชิ้นงาน จนสิ้นสุดการยุบตัว



S = 10 mm S = 20 mm S = 30 mm S = 40 mm S = 50 mm S = 60 mm

ภาพที่ 4.5 การเสียหายภายใต้การกระทำในแนวแกนแบบกึ่งคงที่ของชิ้นงาน C ที่ระยะยุบตัวต่างๆ (S)

จากภาพที่ 4.6 (ข) ส่วนของด้านบนมีลักษณะแตกละเอียด เมื่อเปรียบเทียบการทดลองกับแบบจำลองพบว่า การเริ่มต้นความเสียหายมีลักษณะการเสียหายจากด้านบนของชิ้นงานที่คล้ายกัน และในส่วนของ การแตกและบานออกของเส้นใยมีลักษณะที่สอดคล้องกันกับการทดลอง



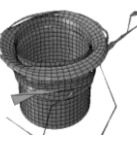
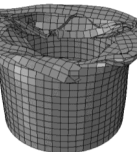
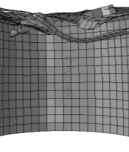
(ก)

(ข)

ภาพที่ 4.6 การเสียหายสุดท้ายของชิ้นงาน C ภายใต้แรงกึ่งคงที่ (ก) การทดลอง
(ข) แบบจำลองทาง FEA

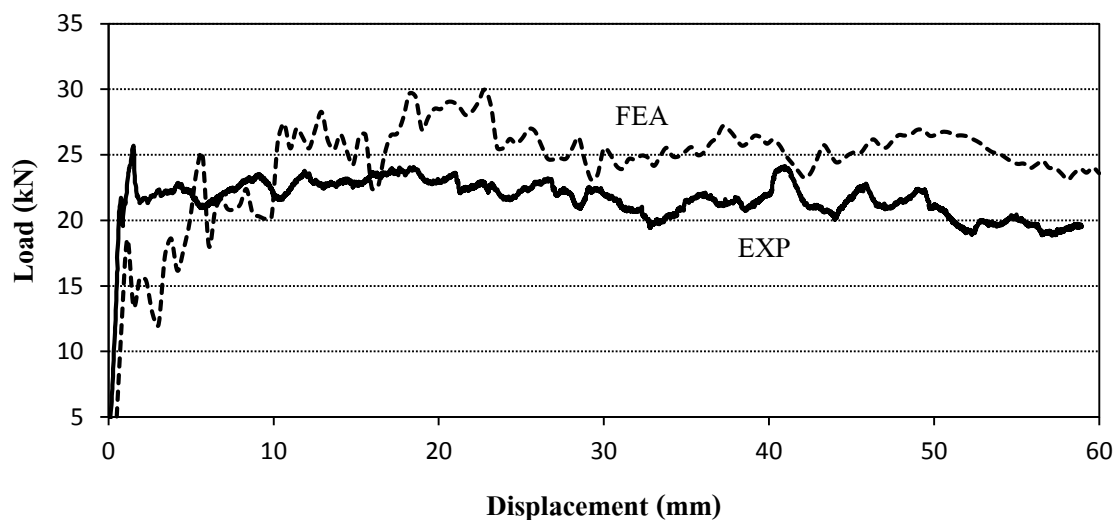
ทั้งนี้เพื่อให้่ายต่อการเปรียบเทียบ จึงได้นำภาพการเสียหายของชิ้นงานจากการทดลองและจากแบบจำลองเปรียบเทียบกันดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สรุปผลการทดลองและแบบจำลองการเสียหายของชิ้นงานภายใต้แรงแบบกึ่งคงที่

ชิ้นงาน	รูปแบบการเสียหาย จากการทดลอง		รูปแบบการเสียหาย จากแบบจำลอง	
A				
B				
C				

4.1.1.4 การตอบสนองของชิ้นงาน A

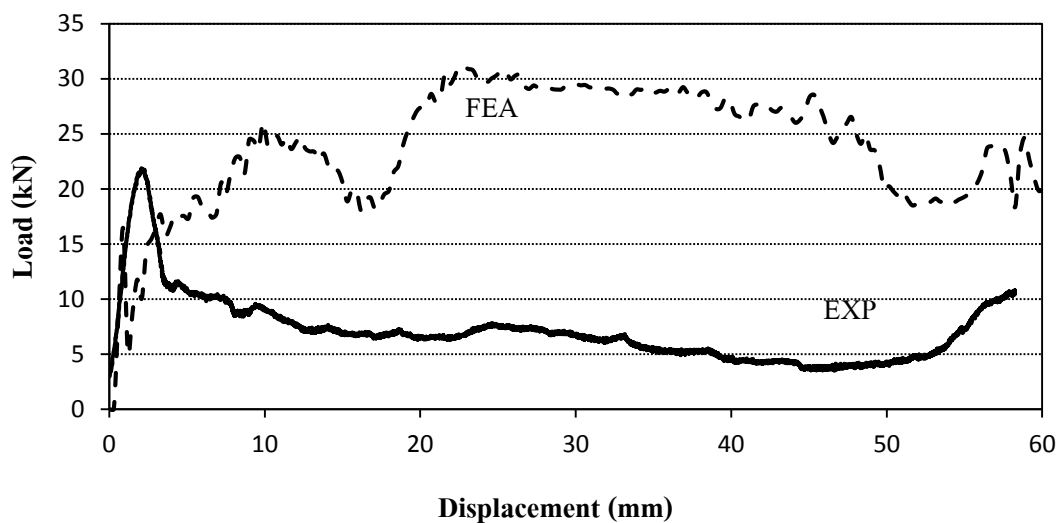
จากภาพที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาระกับระยะยวบของชิ้นงานที่ทดสอบภายใต้ภาระกระทำกึ่งคงที่ในแนวแกน โดยเส้นประเป็นผลจากแบบจำลอง ส่วนเส้นทึบเป็นผลจากการทดลอง จากการสังเกตพบว่ากราฟของแบบจำลองสูงกว่าการทดลอง ซึ่งลักษณะของกราฟในช่วงแรกที่มีความชันมาก ซึ่งถือว่าชิ้นงานยังไม่เสียรูป หลังจากนั้นกราฟมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็ว และมีลักษณะแกว่งตัวเป็นคลื่นสลับไปมาจากแรงดันและแรงกดต่อชิ้นงาน จนกระทั่งชิ้นงานสิ้นสุดการยวบตัว จากการสังเกตพบว่าผลการทดลองจริงสามารถรับภาระสูงสุดเท่ากับ 28.74 kN และค่าภาระเฉลี่ยเท่ากับ 25.32 kN ในส่วนผลของแบบจำลอง สามารถรับภาระสูงสุดเท่ากับ 29.98 kN ค่าภาระเฉลี่ยเท่ากับ 24.29 kN โดยค่าภาระเฉลี่ยจะนำไปคำนวณความสามารถดูดซับพลังงานต่อไป ทั้งนี้สังเกตได้ว่าลักษณะกราฟของการทดลองและแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน และไม่แตกต่างกันมากนัก



ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระและระยะยุบตัวภายใต้แรงกระทำถึงคงที่ของชิ้นงาน A

4.1.1.5 การตอบสนองของชิ้นงาน B

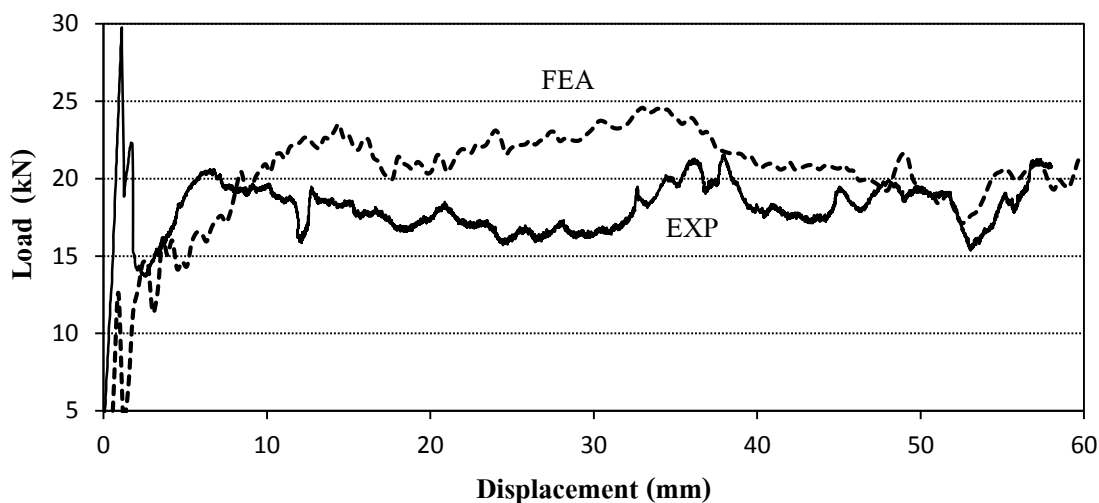
จากภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระและระยะยุบตัวภายใต้แรงกระทำถึงคงที่ พบว่าช่วงแรกของกราฟมีลักษณะความชันสูงสุด หลังจากนั้นกราฟมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็ว และมีลักษณะสลับกันไปมา เนื่องจากแรงต้านและแรงกดต่อชิ้นงานจนสิ้นสุดการยุบตัว จากกราฟพบว่าผลการทดลองจริงค่าภาระสูงสุดเท่ากับ 25.94 kN และมีค่าภาระเฉลี่ยเท่ากับ 8.9 kN ในส่วนแบบจำลองพบว่า ค่าภาระสูงสุดเท่ากับ 30.89 kN ค่าภาระเฉลี่ยเท่ากับ 8.70 kN จากการสังเกตผลการทดลองจริงพบว่ากราฟมีแนวโน้มลดลงอย่างมาก เมื่อชิ้นงานมีการยุบตัวมากๆ ซึ่งเกิดจากลักษณะการเรียงเส้นใยในแนวเฉียง เมื่อรับภาระในแนวแกนทำให้เส้นใยเกิดการแตกหัก ส่งผลให้การรับภาระลดลง เมื่อเปรียบเทียบกราฟที่ได้จากการทดลอง พบว่ามีแนวโน้มสูงกว่าแบบจำลองทาง FEA และพบว่าค่าภาระเฉลี่ยของการทดลองสูงกว่าแบบจำลอง ประมาณ 6.67 %



ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระและระยะยุบตัวภายใต้แรงกระทำกึ่งคงที่ของชิ้นงาน B

4.1.1.6 การตอบสนองของชิ้นงาน C

จากภาพ 4.9 พบว่ากราฟแบบจำลองสูงกว่าผลการทดลองจริงโดยพบว่าเมื่อชิ้นงานรับภาระระกคในแนวแกน จนกระทั่งถึงภาระสูงสุด กราฟจะตกลงอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นกราฟมีลักษณะเป็นคลื่นสลับกัน ซึ่งเกิดจากแรงต้านและแรงกดต่อชิ้นงาน จนกระทั่งชิ้นงานยุบตัวสุดท้าย ลักษณะของกราฟเกิดจากการเรียงตัวของเส้นใยในแนวตั้งคือ 0 องศา ทำให้สามารถรับแรงในแนวแกนโดยตรงในส่วนของการเรียงตัวของเส้นใยแนวเฉียง (45/-45) และแนวขวาง 90 องศา ทำหน้าที่รับภาระและประคองให้เส้นใยแนวตั้งรับภาระแนวแกนได้สูงสุด จากการสังเกตพบว่ากราฟจากผลการทดลองมีค่าภาระสูงสุดเท่ากับ 29.96 kN และมีค่าภาระเฉลี่ยเท่ากับ 18.20 kN ส่วนผลของแบบจำลองค่าภาระสูงสุดเท่ากับ 24.58 kN ค่าภาระเฉลี่ยเท่ากับ 17.98 kN เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทาง FEA พบว่าค่าภาระเฉลี่ยของการทดลองสูงกว่าแบบจำลองเล็กน้อย โดยพบว่ามีค่ามากกว่าประมาณ 1.23 %

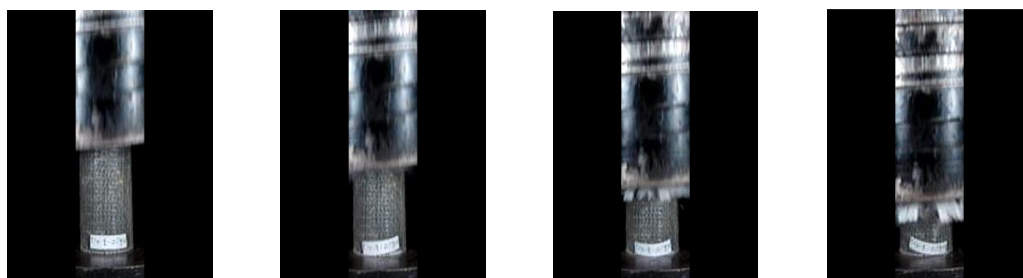


ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระและระยะยุบตัวภายใต้แรงกระทำกึ่งคงที่ของชิ้นงาน C

4.1.2 การตอบสนองของท่อต่อแรงกระแทก

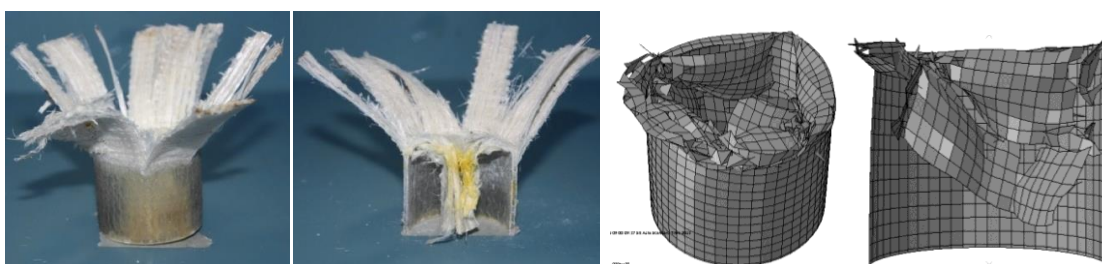
4.1.2.1 การเสียหายของชิ้นงาน A

จากภาพที่ 4.10 และ 4.11 (ก) แสดงรูปแบบการเสียหายของชิ้นงาน ภายใต้แรงกระแทกในแนวแกนของชิ้นงาน ที่มีลักษณะการเรียงตัวของเส้นใยในแนวตั้ง คือ 0 องศา แนวขวาง คือ 90 องศา จากการทดลองพบว่าการเริ่มต้นเสียหายของชิ้นงานเริ่มที่ปลายด้านบน มีลักษณะแตกเป็นชั้นเล็กและแยกออกเป็นสองส่วน ได้แก่ ส่วนแรกเส้นใยยุบเข้าด้านในชิ้นงาน และส่วนที่สองเส้นใยแยกออกด้านนอกและกางออกเป็นแฉก จากการสังเกตพบที่เกิดจากการแยกระหว่างชั้นของเส้นใยที่ปลายด้านบนของชิ้นงานที่มีการเรียงตัวของเส้นใยในแนวตั้ง และแนวขวาง ซึ่งเป็นตัวชั้นระหว่างเส้นใยแนวตั้ง เมื่อรับภาระในแนวแกนจึงมีลักษณะกางออกเป็นแฉก ประมาณ 7 – 8 แฉกของชิ้นงาน



ภาพที่ 4.10 การเสียหายของชิ้นงานภายใต้แรงกระแทกของชิ้นงาน A

ผลจากแบบจำลองลักษณะการเสียหายเกิดขึ้นที่ด้านบนของชิ้นงาน มีลักษณะแตกต่าง เดี่ยวด ดังภาพที่ 4.11 (ข) เมื่อพิจารณารูปแบบการเสียหายสุดท้ายของชิ้นงานเปรียบเทียบระหว่าง การทดลองและแบบจำลองทาง FEA พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองการเริ่มต้นการเสียหาย เกิดขึ้นที่ปลายด้านบนของชิ้นงาน ในส่วนของการฉีกขาดและบานออกเป็นแฉกมีลักษณะค่อนข้าง แตกต่างกัน



(ก)

(ข)

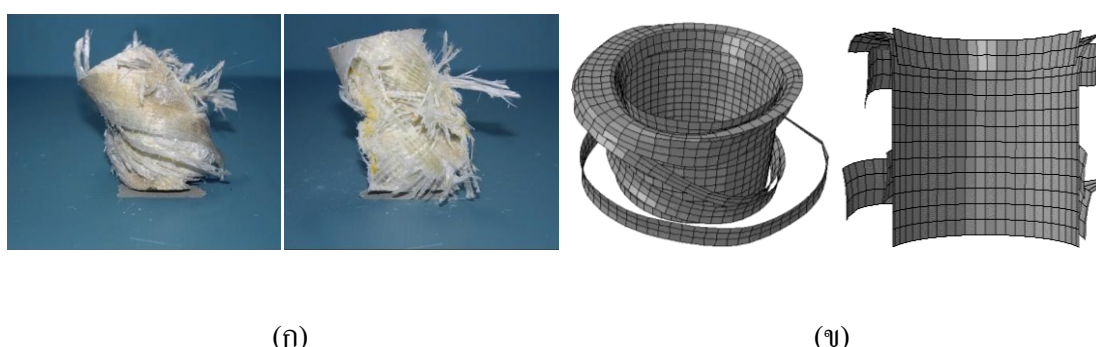
ภาพที่ 4.11 แบบการเสียหายสุดท้ายของชิ้นงาน A ภายใต้แรงกระแทก (ก) การทดลอง
(ข) แบบจำลองทาง FEA

4.1.2.2 การเสียหายของชิ้นงาน B

จากภาพที่ 4.12 และ 4.13 (ก) เป็นการเสียหายของชิ้นงาน B ที่เกิด จากแรงกระแทก ซึ่งจากการทดลองพบว่า การเสียหายของชิ้นงานเกิดขึ้นที่ปลายด้านบนของชิ้นงาน ซึ่งมีลักษณะของเส้นใยแตกหักในแนวเฉียงของชิ้นงานในทิศทาง -45 องศา หลังจากนั้นเมื่อชิ้นงาน รับภาระเพิ่มมากขึ้น เกิดการเสียหายในทิศทาง 45 องศา และยุบตัวลงในลักษณะซ้อนกัน ซึ่ง สาเหตุเกิดจากการเรียงตัวของเส้นใยภายในชิ้นงานมีลักษณะแนวเฉียง เมื่อรับภาระในแนวแกนทำ ให้เส้นใยรับภาระได้ต่ำ ในกรณีของผลจากการจำลองซึ่งแสดงใน ภาพที่ 4.13 (ข) พบว่า การเสียหายมีลักษณะยุบตัวลงซ้อนกันและแตกออกเป็นชิ้น เมื่อพิจารณารูปแบบการเสียหายจากการ ทดลองเทียบกับแบบจำลองทาง FEA พบว่ามีลักษณะการเสียหายที่สอดคล้องกัน



ภาพที่ 4.12 การเสียหายของชิ้นงานภายใต้แรงกระทำของชิ้นงาน B



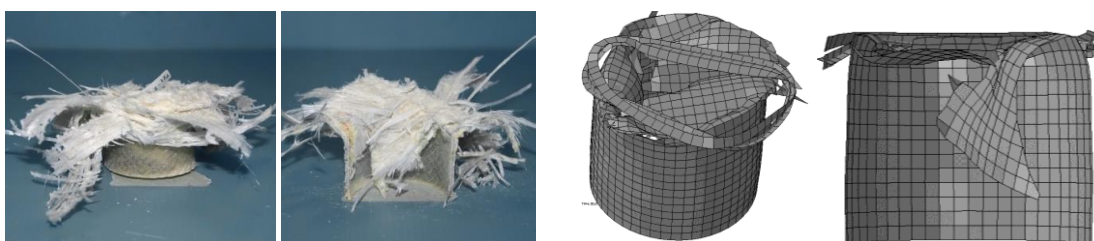
ภาพที่ 4.13 แบบการเสียหายสุดท้ายของชิ้นงาน B ภายใต้แรงกระทำ (ก) การทดลอง
(ข) แบบจำลองทาง FEA

4.1.2.3 การเสียหายของชิ้นงาน C

จากภาพที่ 4.14 และ 4.15 (ก) พบว่าการเริ่มต้นการเสียหายเกิดขึ้นที่ด้านบนของชิ้นงาน ซึ่งมีลักษณะแบนและแยกออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนแรกเส้นใยยุบเข้าด้านในชิ้นงาน และส่วนที่สองเส้นใยแยกออกและกางออกนอกชิ้นงาน สาเหตุเกิดจากการแยกชั้นเส้นใยที่ปลายด้านบนของชิ้นงานเส้นใยแนวเฉียงเกิดการพับเข้าไปในชิ้นงาน และเส้นใยแนวตั้งและแนวเฉียงมีลักษณะแตกกระจาย ผลของแบบจำลองดังภาพที่ 4.15 (ข) พบว่ามีลักษณะแตกออกจากกันและส่วนหนึ่งยุบเข้าด้านในของชิ้นงาน เมื่อพิจารณารูปแบบการเสียหาย จากการทดลองพบว่าชิ้นงานเริ่มต้นการเสียหายที่ปลายด้านบนของชิ้นงานและมีการแตกตามแนวเส้นใย เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลอง FEA พบว่ามีลักษณะที่สอดคล้องกัน



ภาพที่ 4.14 การเสียหายของชิ้นงานภายใต้แรงกระทำของชิ้นงาน C



(ก)

(ข)

ภาพที่ 4.15 แบบการเสียหายสุดท้ายของชิ้นงาน C ภายใต้แรงกระทำ (ก) การทดลอง
(ข) แบบจำลองทาง FEA

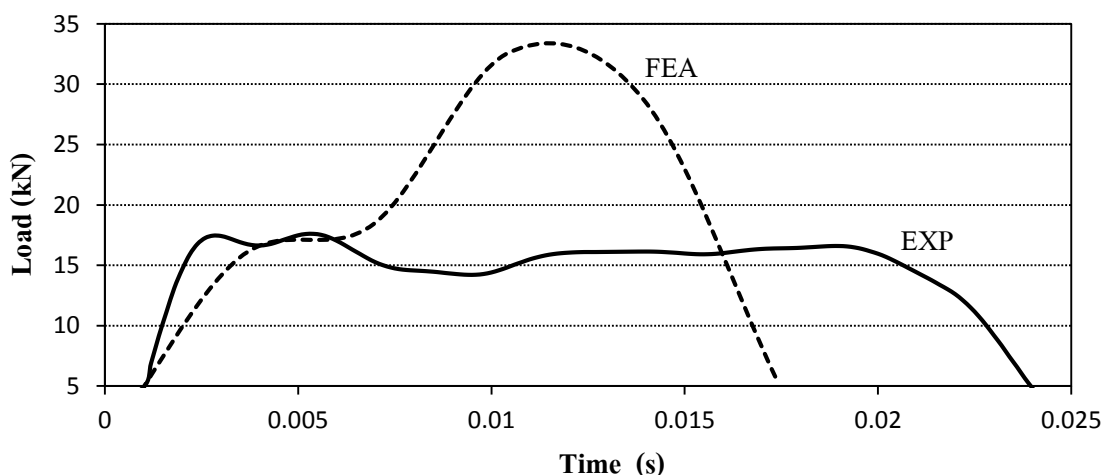
ทั้งนี้เพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบจึงได้นำรูปแบบการเสียหายของชิ้นงาน ภายใต้แรงกระทำ ที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลองดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สรุปผลการทดลองและแบบจำลองการเสียหายของชิ้นงานภายใต้แรงกระทำ

ชิ้นงาน	รูปแบบการเสียหายจากการทดลอง		รูปแบบการเสียหายจากแบบจำลอง	
A				
B				
C				

4.1.2.4 การตอบสนองของชิ้นงาน A

จากภาพที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาระกับเวลาภายใต้แรงกระทำ โดยในแกนตั้งเป็นค่าของภาระและในแกนนอนเป็นเวลาเริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดของการยุบตัว พบว่าในช่วงเริ่มต้นก่อนกราฟเริ่มเปลี่ยนแปลงความชันถือเป็นช่วงที่ชิ้นงานยังไม่เสียรูป ซึ่งผลการทดลองพบว่าชิ้นงานสามารถทนแรงกระทำได้ถึง 17.60 kN และมีค่าภาระเฉลี่ยคือ 14.40 kN ในส่วนของแบบจำลอง พบว่าค่าภาระสูงสุดเท่ากับ 32.60 kN และค่าภาระเฉลี่ยเท่ากับ 16.79 kN แล้วจากนั้นกราฟมีลักษณะแกว่งตัวลดลงจนถึงสิ้นสุดการกระทำ เมื่อทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทาง FEA พบว่าค่าภาระเฉลี่ยของการทดลองต่ำกว่าแบบจำลองประมาณ 16.59 %

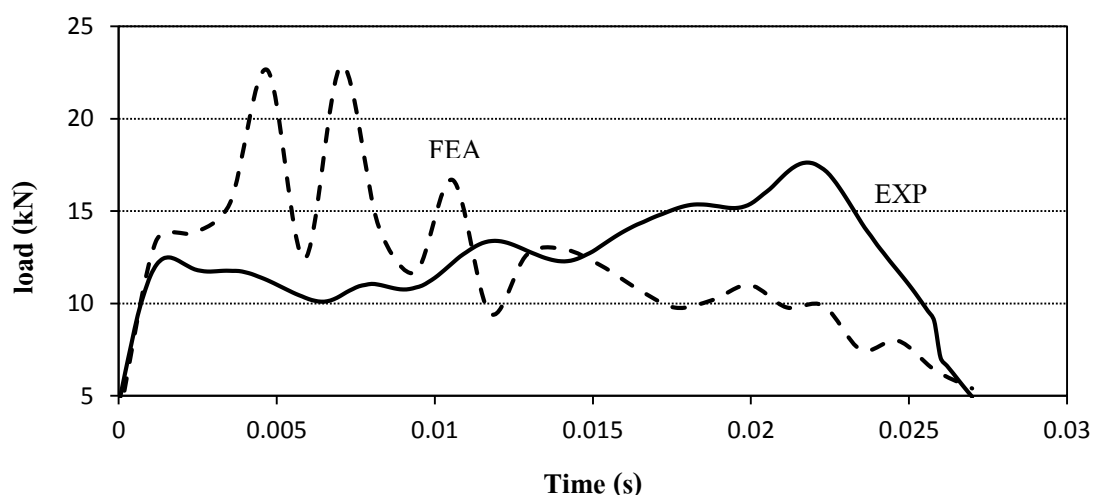


ภาพที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระและเวลาภายใต้แรงกระทำของชิ้นงาน A

4.1.2.5 การตอบสนองของชิ้นงาน B

จากภาพที่ 4.17 ผลการทดลองพบว่าช่วงเริ่มต้นของกราฟไปจนถึงจุดเริ่มเปลี่ยนแปลงความชันถือเป็นช่วงที่ชิ้นงานยังไม่เสียรูป ซึ่งพบว่าชิ้นงานสามารถทนแรงสูงสุดคือ 12.49 kN จากนั้นกราฟมีแนวโน้มลดลงจนถึงในช่วงเวลาประมาณ 0.007 s หลังจากนั้นลักษณะกราฟมีแนวโน้มสูงขึ้นมีลักษณะเป็นคลื่นสลับกันจนถึง 17.63 kN จนถึงสิ้นสุดการกระทำ ซึ่งสาเหตุเกิดจากช่วงระยะเวลา 0 – 0.007 s เป็นช่วงที่ชิ้นงานสามารถทนแรงได้ และหลังจาก 0.007 – 0.027 s เป็นช่วงที่ชิ้นงานไม่สามารถทนแรงได้ และค้อนยังมีแรงเหลืออยู่ ทำให้แรงกระทำกับโหลดเซลล์ จึงทำให้กราฟมีแนวโน้มสูงขึ้น ผลของแบบจำลองพบว่า กราฟจากแบบจำลองมีค่า

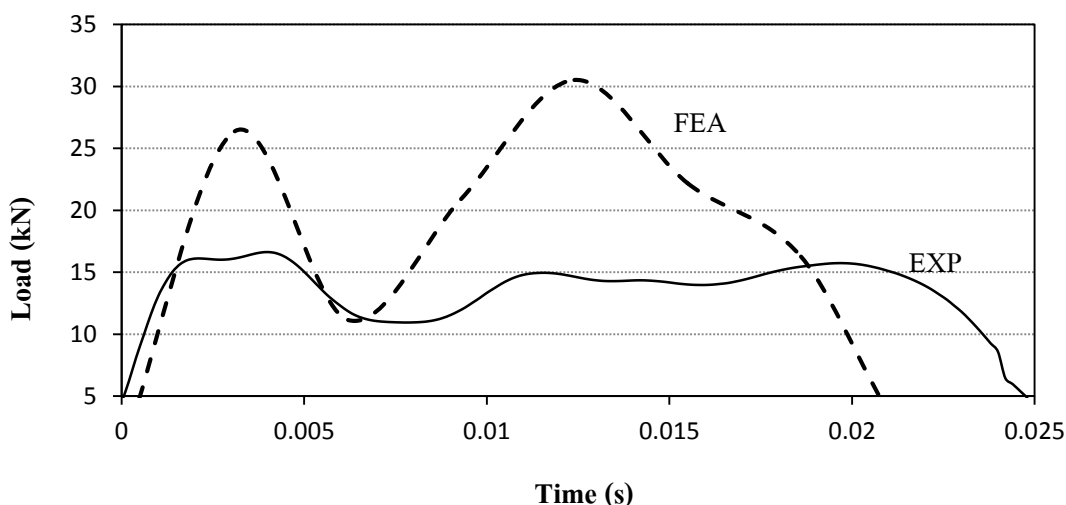
สูงกว่าการทดลอง โดยพบว่ามีค่าภาระสูงสุดช่วงแรกเท่ากับ 13.79 kN และค่าภาระสูงสุดเท่ากับ 22.63 kN ในส่วนลักษณะของกราฟในช่วงแรกขึ้น จากนั้นกราฟเปลี่ยนแปลงความชันและสูงขึ้น สลับฟันปลา ซึ่งเกิดจากแรงต้านและขุดตัวของชิ้นงาน เมื่อพิจารณาภาระเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองพบว่ามีค่าน้อยกว่าแบบจำลองประมาณ 0.42 %



ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระและเวลาภายใต้แรงกระทำของชิ้นงาน B

4.1.2.6 การตอบสนองของชิ้นงาน C

จากภาพที่ 4.18 แสดงกราฟผลการทดลองของชิ้นงาน C ภายใต้ภาระกระทำในแนวแกน พบว่าช่วงแรกของกราฟมีค่าภาระสูงสุดเท่ากับ 15.00 kN หลังจากนั้นกราฟมีลักษณะแกว่งและมีค่าภาระสูงสุดเท่ากับ 16.62 kN จากนั้นกราฟมีลักษณะลดลงอย่างรวดเร็วและแกว่งตัวจนสิ้นสุดการขุดตัว ผลจากแบบจำลองพบว่า กราฟของแบบจำลองสูงกว่าผลการทดลอง ค่าภาระสูงสุดช่วงแรกเท่ากับ 26.37 kN และค่าภาระสูงสุดเท่ากับ 30.51 kN ซึ่งลักษณะของกราฟช่วงแรกมีแนวโน้มสูงขึ้น หลังจากนั้นกราฟตกลงอย่างรวดเร็วและมีลักษณะสลับฟันปลา เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง พบว่ามีค่าภาระเฉลี่ยของแบบจำลองสูงกว่าการทดลองประมาณ 13.20 %



ภาพที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระและเวลาภายใต้แรงกระทำของชิ้นงาน C

4.1.3 ความสามารถในการดูดซับพลังงาน

4.1.3.1 ความสามารถในการดูดซับพลังงานภายใต้แรงกระทำแบบกึ่งคงที่

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการคำนวณที่ได้จากการทดลองของชิ้นงานภายใต้ภาระกระทำกึ่งคงที่ที่มีการเรียงตัวของเส้นใยทั้งหมด 3 แบบ ชิ้นงาน A คือ $[(0/90)/(0/90)/(0/90)]$ ชิ้นงาน B คือ $[(45/-45)/(45/-45)/(45/-45)]$ และชิ้นงาน C $[45/-45]/[0/90]/[45/-45]$ พบว่า ชิ้นงาน A สามารถดูดซับพลังงานได้เท่ากับ 1.52 kN.m ชิ้นงาน B สามารถดูดซับพลังงานได้เท่ากับ 0.48 kN.m และชิ้นงาน C สามารถดูดซับพลังงานเท่ากับ 1.09 kN.m. ดังนั้นจะเห็นว่า ชิ้นงาน A จะสามารถดูดซับพลังงานจากภาระกระทำแบบกึ่งคงที่ ได้ดีกว่าชิ้นงาน B ประมาณ 190.56 % และดีกว่าชิ้นงาน C ประมาณ 46.97 % ในส่วนของความสามารถในการดูดซับพลังงานจำเพาะพบว่า ชิ้นงาน A มีค่าเท่ากับ 29.80 kN.m/kg ชิ้นงาน B เท่ากับ 8.89 kN.m/kg และชิ้นงาน C เท่ากับ 20.56 kN.m/kg ดังนั้นจะเห็นว่า ชิ้นงาน A สามารถดูดซับพลังงานจำเพาะได้มากกว่า ชิ้นงาน B เท่ากับ 235.20 % และชิ้นงาน C เท่ากับ 44.94 % จากตารางดังกล่าวเห็นได้ว่า ชิ้นงาน A จะสามารถดูดซับพลังงานได้ดีกว่าชิ้นงานอื่นๆ เนื่องจากชิ้นงาน A มีเส้นใยในแนว 0 องศา ที่สามารถรับแรงกดได้โดยตรง

ผลของแบบจำลองพบว่า ชิ้นงาน A สามารถดูดซับพลังงานจำเพาะได้ 29.00 kN.m/kg และชิ้นงาน B เท่ากับ 10.44 kN.m/kg และ ชิ้นงาน C เท่ากับ 21.40 kN.m/kg ดังนั้นจะเห็นว่า ชิ้นงาน A มีความสามารถดูดซับพลังงานได้มากกว่าชิ้นงาน B เท่ากับ 177.00 % และ ชิ้นงาน C เท่ากับ 35.51 % ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทาง FEA พบว่าค่าพลังงานดูดซับจำเพาะที่ได้ชิ้นงาน A จากการทดลองสูงกว่าแบบจำลองประมาณ 2.75 % ส่วนชิ้นงาน B และชิ้นงาน C พบว่าผลจากแบบจำลองสูงกว่าการทดลองคือ 17.43 % และ 4.08 % ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองและแบบจำลองทาง FEA พบว่าชิ้นงาน A มีลักษณะการเสียหายจากการทดลองและแบบจำลองที่ค่อนข้างแตกต่างกัน ทำให้ผลการทดลองสูงกว่าแบบจำลอง FEA พบว่าชิ้นงาน A มีค่าพลังงานดูดซับจำเพาะสูงกว่าชิ้นงานอื่นๆ

4.1.3.2 ความสามารถในการดูดซับพลังงานภายใต้แรงกระแทก

จากตารางที่ 4.3 แสดงผลการคำนวณค่าพลังงานดูดซับและพลังงานดูดซับจำเพาะภายใต้การกระแทกในแนวแกน พบว่า ชิ้นงาน A สามารถดูดซับพลังงานเท่ากับ 0.86 kN.m ชิ้นงาน B เท่ากับ 0.47 kN.m และชิ้นงาน C เท่ากับ 0.76 kN.m ดังนั้นจะเห็นว่า ชิ้นงาน A สามารถดูดซับพลังงานได้มากกว่า ชิ้นงาน B และ ชิ้นงาน C เท่ากับ 82.97 % และ 13.15 % ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าพลังงานดูดซับจำเพาะของโครงสร้างพบว่าชิ้นงาน A สามารถดูดซับพลังงานได้ เท่ากับ 17.55 kN.m/kg ชิ้นงาน B เท่ากับ 9.03 kN.m/kg และชิ้นงาน C เท่ากับ 14.60 kN.m/kg จะเห็นได้ว่าชิ้นงาน A สามารถดูดซับพลังงานจำเพาะได้มากกว่าชิ้นงาน B และชิ้นงาน C ประมาณ 94.35% และ 20.12% ตามลำดับ

ผลของแบบจำลองพบว่า ชิ้นงาน A สามารถดูดซับพลังงานจำเพาะได้ 20.14 kN.m/kg และชิ้นงาน B เท่ากับ 9.40 kN.m/kg และ ชิ้นงาน C เท่ากับ 17.20 kN.m/kg ดังนั้นจะเห็นได้ว่าชิ้นงาน A มีความสามารถดูดซับพลังงานจำเพาะได้มากกว่าชิ้นงาน B เท่ากับ 114.24 % และ ชิ้นงาน C เท่ากับ 17.29 % ตามลำดับ

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทาง FEA พบว่าค่าพลังงานดูดซับที่ได้จากแบบจำลองทาง FEA นั้นมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง โดยพบว่ามีค่ามากกว่าประมาณ 4.09 % - 17.72 % และจากการเปรียบเทียบผลการทดลองและแบบจำลองทาง FEA จะเห็นว่า ชิ้นงาน A มีลักษณะการเสียหายค่อนข้างแตกต่างกัน ส่วนชิ้นงาน B และชิ้นงาน C มีลักษณะการเสียหายที่สอดคล้องกัน และเมื่อเปรียบเทียบพลังงานดูดซับจำเพาะพบว่าชิ้นงาน A มีค่าสูงสุด ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของเส้นใยที่มีการวางมุม 0 องศา ทำให้สามารถรับแรงในแนวแกนได้ดีกว่ามุมอื่นๆ

ตารางที่ 4.3 ความสามารถในการดูดซับพลังงานภายใต้ภาระกระทำในแนวแกน

ชิ้นงาน	น้ำหนัก (kg)	ระยะยวบ (m)	ผลจากการทดลอง			ผลจากแบบจำลองทาง FEA		
			ภาระเฉลี่ย (kN)	พลังงานดูดซับ (kN.m)	พลังงานดูดซับจำเพาะ (kN.m/kg)	ภาระเฉลี่ย (kN)	พลังงานดูดซับ (kN.m)	พลังงานดูดซับจำเพาะ (kN.m/kg)
ภาระกึ่งคงที่								
A	0.05	0.06	25.32	1.52	29.80	24.29	1.45	29.00
B	0.05	0.06	8.12	0.48	8.89	8.70	0.52	10.44
C	0.05	0.06	18.20	1.09	20.56	17.98	1.07	21.40
แรงกระแทก								
A	0.05	0.06	14.40	0.86	17.55	16.79	1.01	20.14
B	0.05	0.04	11.72	0.47	9.03	11.77	0.47	9.40
C	0.05	0.06	12.65	0.76	14.61	14.32	0.86	17.20

4.2 ชิ้นงานทรงกรวย

4.2.1 การตอบสนองของชิ้นงานต่อแรงกระทำแบบกึ่งคงที่

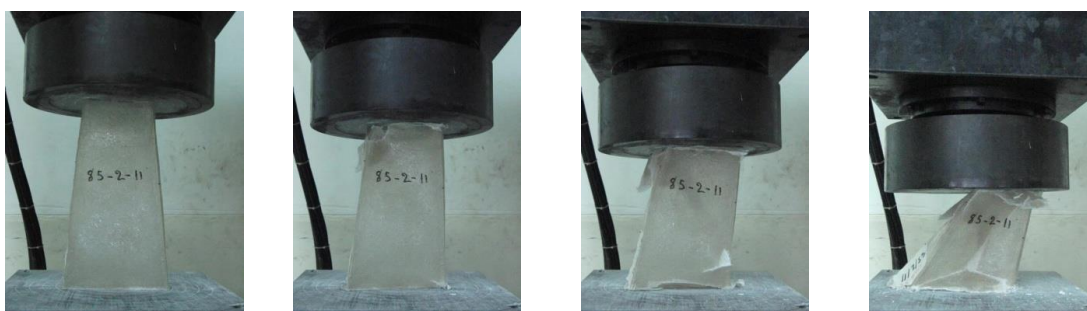
ในส่วนนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบของชิ้นงานทรงกรวยที่มีมุมเอียงและความหนาต่างๆ โดยทำการวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับพลังงาน และกลไกการเสียหายของชิ้นงานตลอดจนการตอบสนองระหว่างแรงและระยะยวบตัวของชิ้นงาน

โครงสร้างใดก็ตามเมื่อถูกแรงกระทำเป็นระยะเวลาหนึ่ง โครงสร้างจะตอบสนองด้วยการเสียรูป โดยยวบตัวในรูปแบบใดรูปแบบหนึ่งออกมา โดยรูปแบบการเสียหายนั้นๆ มักมีลักษณะเฉพาะตัว ซึ่งโดยปกติขึ้นกับลักษณะการต่อ รูปทรงของโครงสร้าง และคุณสมบัติของวัสดุ นอกจากนี้ในระหว่างการเสียรูปของโครงสร้าง โครงสร้างจะดูดซับแรงกระทำและปลดปล่อยแรงปฏิกิริยาออกมาตลอดเวลา โดยแรงปฏิกิริยาที่ปล่อยออกมานั้นสามารถเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์กับระยะยวบตัวได้ เรียกว่ากราฟของภาระและระยะยวบตัว (Load Displacement Curve) หรือกราฟของแรงปฏิกิริยาและระยะยวบตัว ซึ่งนับเป็นการตอบสนองของโครงสร้างอีกรูปแบบหนึ่ง

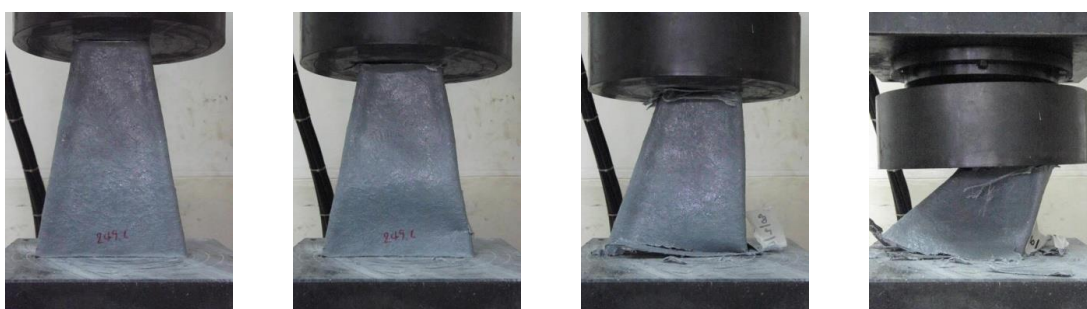
4.2.1.1 การเสียหายของชิ้นงานความหนา 1.5 mm

จากภาพที่ 4.19 แสดงถึงรูปแบบการเสียหายของชิ้นงานที่ได้จากการทดลองภายใต้ภาระกระทำแบบกึ่งคงที่ ที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนาเท่ากับ 1.5 mm ดังภาพ 4.19 (ก) ชิ้นงาน A5-1.5 (ข) ชิ้นงาน B10-1.5 และ (ค) ชิ้นงาน C15-1.5 ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าช่วงแรกเกิดการยวบตัวของชิ้นงานช้าหลังจากภาระกระทำต่อชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น ชิ้นงานเริ่มเสียหายที่ปลายด้านบนและมีลักษณะแตกออกเป็นชั้นเล็ก หลังจากนั้นฐานของชิ้นงานเริ่มเสียหายมีลักษณะแตกและบานออกตลอดจนสิ้นสุดการยวบตัว จากการสังเกตภาพที่ 4.19 (ค) ชิ้นงาน C15-1.5 พบว่าฐานชิ้นงานเสียหายมากกว่าชิ้นงานอื่นๆ ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของมุมเอียงคือ 15 องศา

การเสียหายสุดท้ายของชิ้นงานภายใต้ภาระกระทำในแนวแกนภายใต้ภาระกระทำแบบกึ่งคงที่ ที่มีมุมเอียงต่างกันคือ 5, 10 และ 15 องศา จากภาพที่ 4.20 (ก) ชิ้นงาน A5-1.5 (ข) ชิ้นงาน B10-1.5 จากการทดลองพบว่าชิ้นงานมีลักษณะการเสียหายแบบยวบและแตกเป็นชั้นเล็กที่ปลายด้านบนของชิ้นงาน และฐานของชิ้นงานมีลักษณะการเสียหายแตกเปราะออกเป็นชั้น จากภาพที่ 4.20 (ค) ชิ้นงาน C15-1.5 พบว่า ปลายด้านบนของชิ้นงานมีลักษณะการเสียหายแบบยวบตัวและแตกเป็นชั้นเล็ก ในส่วนของฐานชิ้นงานพบว่าลักษณะมีการเสียหายแบบแตกและบานออก ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของมุมเอียง 15 องศา ทำให้ฐานของชิ้นงานกว้างกว่าชิ้นงานอื่นๆ



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 4.19 การเสียหายภายใต้ภาระกระทำในแนวแกนแบบกึ่งคงที่ของชิ้นงานที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนาคือ 1.5 mm (ก) ชิ้นงาน A5-1.5 (ข) ชิ้นงาน B10-1.5 และ (ค) ชิ้นงาน C15-1.5 ตามลำดับ



(ก)



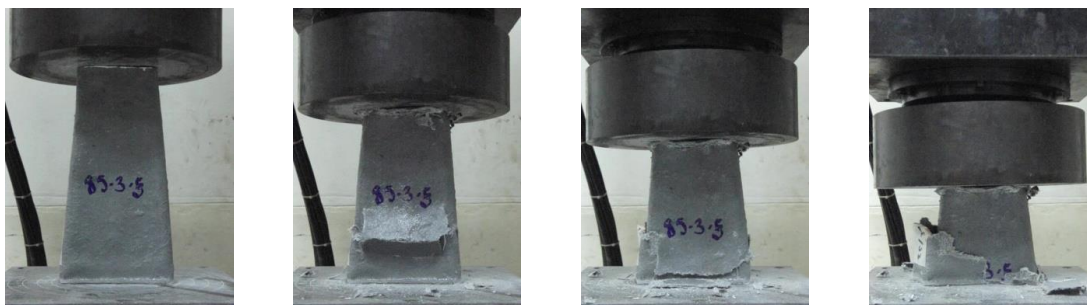
(ข)



(ค)

ภาพที่ 4.20 การเสียหายสุดท้ายของชิ้นงานภายใต้ภาระกระทำในแนวแกนแบบกึ่งคงที่ ที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนาคือ 1.5 mm (ก) ชิ้นงาน A5-1.5 (ข) ชิ้นงาน B10-1.5 และ (ค) ชิ้นงาน C15-1.5 ตามลำดับ

4.2.1.2 การเสียหายของชิ้นงานความหนา 2.0 mm



(ก)

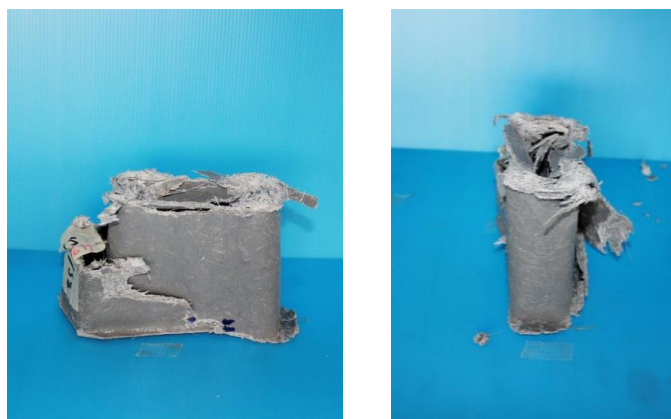


(ข)



(ค)

ภาพที่ 4.21 การเสียหายภายใต้ภาระกระทำในแนวแกนแบบกึ่งคงที่ของชิ้นงานที่มีมุมเอียงแตกต่างกัน ความหนาคือ 2.0 mm (ก) ชิ้นงาน A5-2.0 (ข) ชิ้นงาน B10-2.0 และ (ค) ชิ้นงาน C15-2.0 ตามลำดับ



(ก)



(ข)



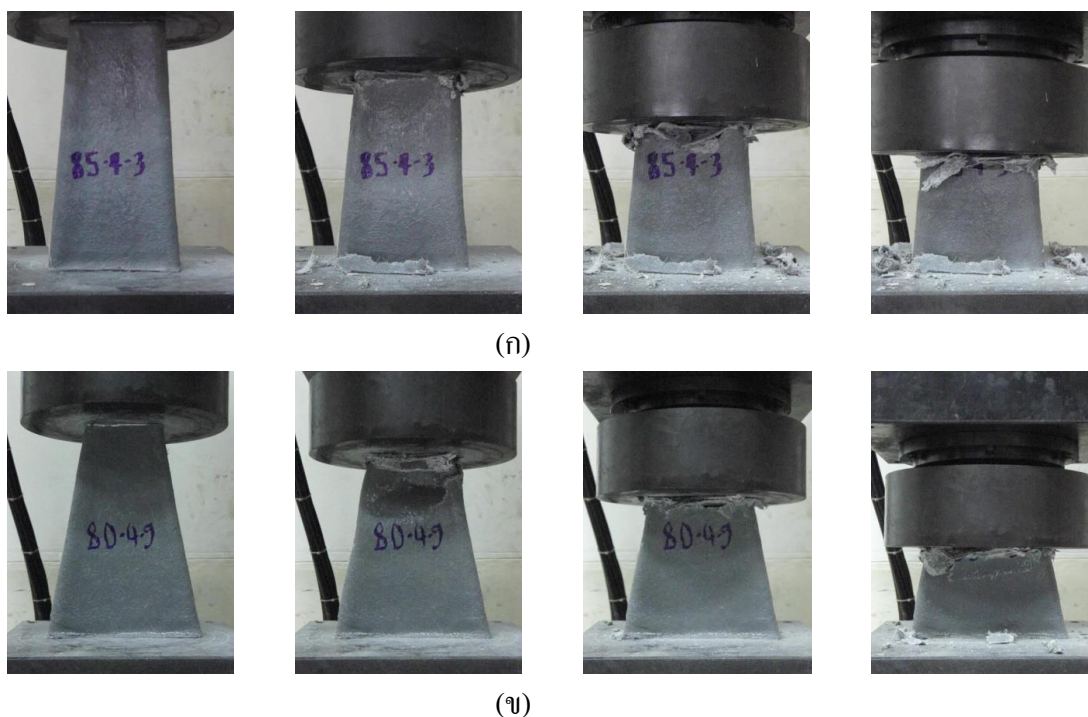
(ค)

ภาพที่ 4.22 การเสียหายสุดท้ายของชิ้นงานภายใต้ภาระกระทำในแนวแกนแบบกึ่งคงที่ ที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนา คือ 2.0 mm (ก) ชิ้นงาน A5-2.0 (ข) ชิ้นงาน B10-2.0 และ (ค) ชิ้นงาน C15-2.0 ตามลำดับ

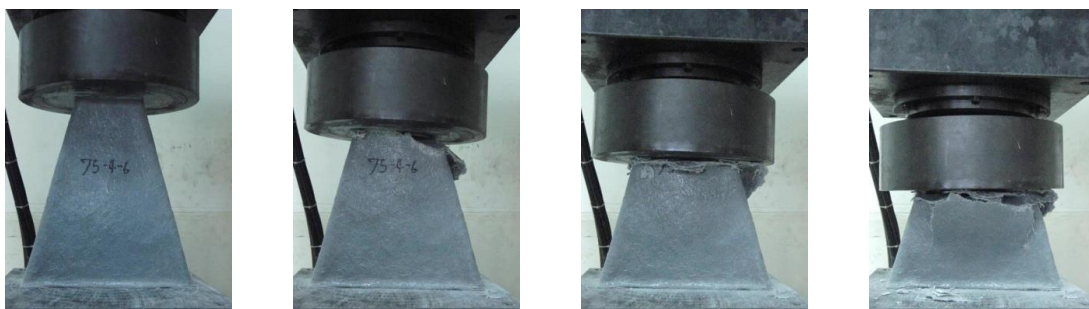
จากภาพที่ 4.21 แสดงถึงขั้นตอนการเสียหายของชิ้นงานที่มีมุมเอียงต่างกันคือ 5, 10 และ 15 องศา ดังภาพ (ก) ชิ้นงาน A5-2.0 และ (ข) ชิ้นงาน B10-2.0 จากการทดลองพบว่าชิ้นงานมีขั้นตอนการเสียหายที่คล้ายกัน กล่าวคือชิ้นงานเริ่มเสียหายที่ปลายด้านบนของชิ้นงาน เมื่อรับภาระเพิ่มมากขึ้นชิ้นงานเกิดการยุบตัวลงอย่างรวดเร็วที่กึ่งกลางตลอดจนสิ้นสุดการยุบตัว จากการสังเกตภาพที่ 4.21 (ค) ชิ้นงาน C15-2.0 พบว่าขั้นตอนการเสียหายของชิ้นงานเกิดขึ้นที่ปลายด้านบนและยุบตัวลงตลอดจนสิ้นสุดการยุบตัว ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของความหนาและมุมเอียงของชิ้นงาน ฐานของชิ้นงานที่กว้างกว่าชิ้นงานอื่นๆ จึงทำให้ภาระกระจายไปยังฐานได้ดีกว่าชิ้นงานอื่นๆ

รูปแบบลักษณะการเสียหายสุดท้ายของชิ้นงานที่มีความหนาเท่ากับ 2.0 mm ดังภาพที่ 4.22 จากการทดลองพบว่า (ก) ชิ้นงาน A5-2.0 และ (ข) ชิ้นงาน B10-2.0 มีลักษณะการเสียหายแบบแตกเปราะและแตกยุบตัวขึ้นเล็กน้อย กล่าวคือเกิดการยุบตัวที่กึ่งกลางและซ้อนกันและที่ปลายของชิ้นงานเสียหายแตกเป็นชิ้นเล็ก จากภาพ ภาพที่ 4.22 (ค) ชิ้นงาน C15-2.0 จากการสังเกตพบว่าชิ้นงานมีลักษณะการเสียหายแตกเป็นชิ้นเล็ก

4.2.1.3 การเสียหายของชิ้นงานความหนา 2.5 mm



ภาพที่ 4.23 การเสียหายภายใต้ภาระกระทำในแนวแกนแบบกึ่งคงที่ของชิ้นงานที่มีมุมเอียงแตกต่างกัน ความหนาคือ 2.5 mm (ก) ชิ้นงาน A5-2.5 และ (ข) ชิ้นงาน B10-2.5

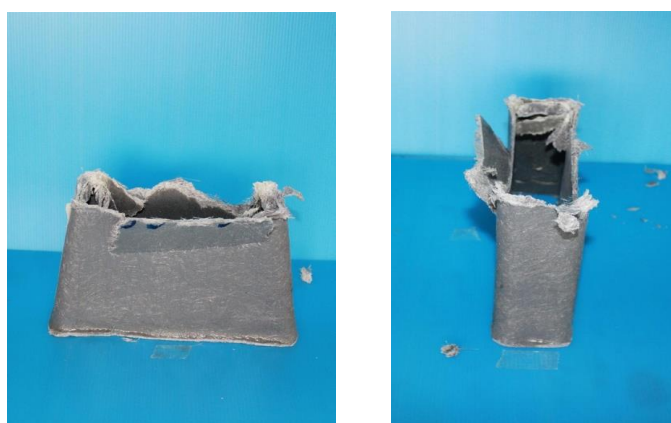


(ค)

ภาพที่ 4.23 การเสียหายภายใต้ภาระกระทำในแนวแกนแบบกึ่งคงที่ของชิ้นงานที่มีมุมเอียงแตกต่าง
(ค) ชิ้นงาน C15-2.5

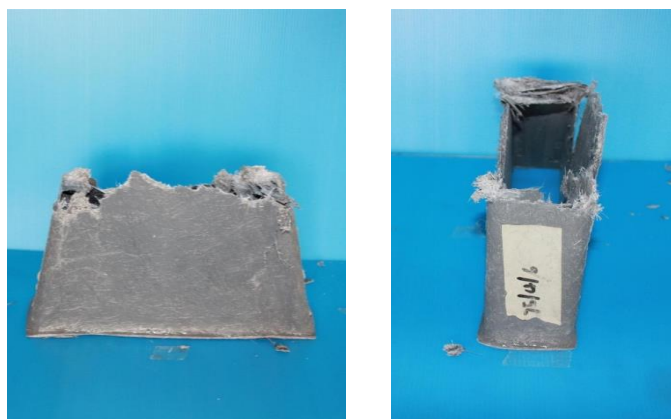


(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.24 การเสียหายสุดท้ายของชิ้นงานภายใต้ภาระกระทำในแนวแกนแบบกึ่งคงที่ ที่มีมุมเอียง
แตกต่างกันและความหนาคือ 2.5 mm (ก) ชิ้นงาน A5-2.5 และ (ข) ชิ้นงาน B10-2.5



(ค)

ภาพที่ 4.24 การเสียหายสุดท้ายของชิ้นงานภายใต้ภาระกระทำในแนวแกนแบบกึ่งคงที่ ที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนาคือ 2.5 mm (ค) ชิ้นงาน C15-2.5

จากภาพที่ 4.23 แสดงถึงขั้นตอนการเสียหายของชิ้นงานที่มีมุมเอียง 5,10 และ 15 องศา ความหนาเท่ากับ 2.5 mm ดังภาพ (ก) ชิ้นงาน A5-2.5 (ข) ชิ้นงาน B10-2.5 และ (ค) ชิ้นงาน C15-2.5 ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าขั้นตอนการเสียหายทั้งหมดคล้ายกัน กล่าวคือช่วงเริ่มต้นชิ้นงานเกิดการเสียหายช้าหลังจากภาระเพิ่มขึ้นชิ้นงานยุบตัวลงอย่างรวดเร็ว โดยที่เกิดจากปลายด้านบนมีลักษณะแตกเป็นชิ้นเล็กตลอดจนสิ้นสุดการยุบตัว

การเสียหายสุดท้ายของชิ้นงาน จากภาพที่ 4.24 พบว่าลักษณะการเสียหายของชิ้นงานทั้งหมดมีการเสียหายที่คล้ายกัน กล่าวคือชิ้นงานมีลักษณะการเสียหายแตกและยุบตัวเป็นชิ้นเล็ก ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของความหนา ทำให้ชิ้นงานสามารถกระจายแรงไปยังฐานและรับภาระในแนวแกนได้ดี

4.2.2 การตอบสนองของชิ้นงานต่อแรงกระแทก

4.2.2.1 การเสียหายของชิ้นงานความหนา 1.5 mm



(ก)



(ข)



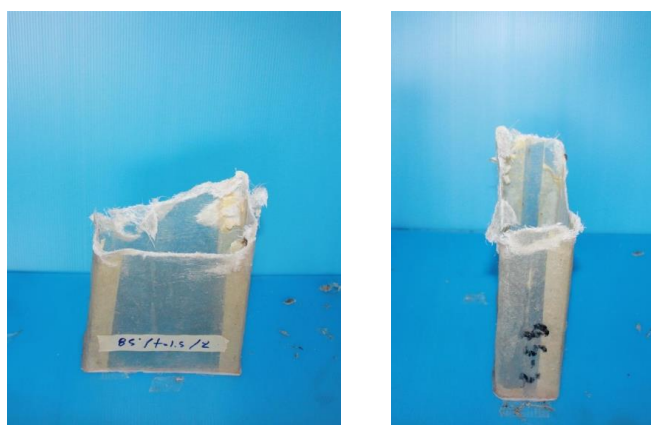
(ค)

ภาพที่ 4.25 การเสียหายภายใต้แรงกระแทกในแนวแกนของชิ้นงานที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนาคือ 1.5 mm (ก) ชิ้นงาน A5-1.5 (ข) ชิ้นงาน B10-1.5 และ (ค) ชิ้นงาน C15-1.5 ตามลำดับ

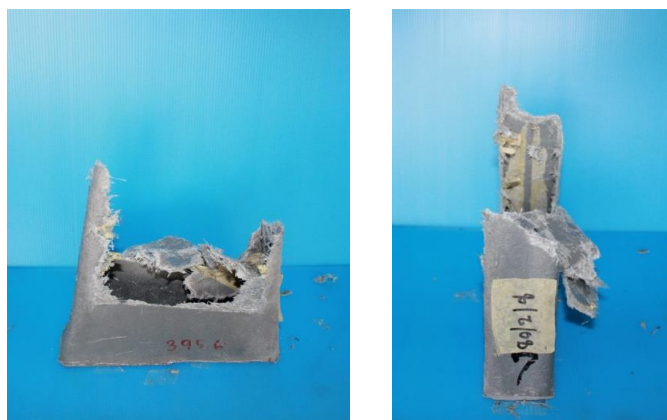
จากภาพที่ 4.25 แสดงรูปแบบการเสียหายของชิ้นงานที่มีมุมเอียง 5, 10 และ 15 องศา และความหนาคือ 1.5 mm จากภาพ (ก) ชิ้นงาน A5-1.5 (ข) ชิ้นงาน B10-1.5 และ (ค)

ชิ้นงาน C15-1.5 ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าการเริ่มต้นการเสียหายของชิ้นงานเริ่มต้นที่ปลายด้านบน มีลักษณะยุบตัวและแตกออกเป็นชิ้นเล็กตลอดในแนวแกน จากการสังเกตชิ้นงาน (ข) ชิ้นงาน B10-1.5 และ (ค) ชิ้นงาน C15-1.5 พบว่า มีการยุบตัวมากกว่าชิ้นงาน A5-1.5 ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของมุมเอียง 10 และ 15 องศา ที่มีฐานขนาดกว้างและชิ้นงานมีขนาดใหญ่กว่าหัวค้อน จึงทำให้ชิ้นงานรับภาระกระแทกได้เพียงบางส่วน

รูปแบบการเสียหายสุดท้ายของชิ้นงาน จากภาพที่ 4.26 ผลจากการทดลองพบว่า ชิ้นงาน A5-1.5 มีลักษณะการเสียหายยุบตัวและแตกเป็นชิ้นเล็ก ในส่วนของชิ้นงาน ชิ้นงาน B10-1.5 และ ชิ้นงาน C15-1.5 จากการสังเกตพบว่าชิ้นงานมีการเสียหายแตกเป็นชิ้นเล็กและบานออกด้านหน้าและหลังของชิ้นงาน ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของมุมเอียง 10 และ 15 องศา กล่าวคือขนาดและฐานของชิ้นงานมีขนาดใหญ่กว่าหัวค้อน ทำให้หน้าตัดหัวค้อนกระแทกชิ้นงานได้เพียงบางส่วน

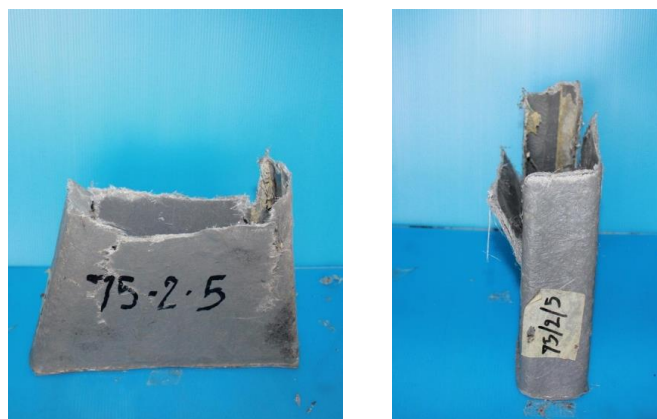


(ก)



(ข)

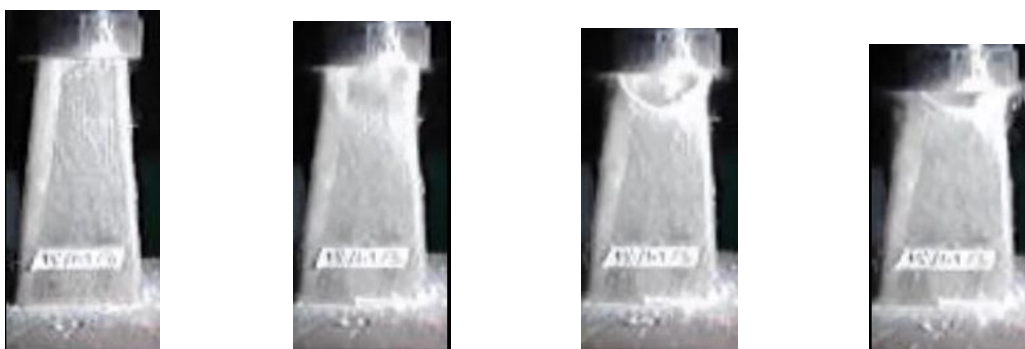
ภาพที่ 4.26 การเสียหายสุดท้ายของชิ้นงานภายใต้แรงกระแทกในแนวแกนของชิ้นงานที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนา คือ 1.5 mm (ก) ชิ้นงาน A5-1.5 และ (ข) ชิ้นงาน B10-1.5



(ค)

ภาพที่ 4.26 การเสียหายสุดท้ายของชิ้นงานภายใต้แรงกระทำในแนวแกนของชิ้นงานที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนาคือ 1.5 mm (ค) ชิ้นงาน C15-1.5

4.2.2.2 การเสียหายของชิ้นงานความหนา 2.0 mm



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.27 การเสียหายภายใต้แรงกระทำในแนวแกนของชิ้นงานที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนาคือ 2.0 mm (ก) ชิ้นงาน A5-2.0 และ (ข) ชิ้นงาน B10-2.0



(ค)

ภาพที่ 4.27 การเสียหายภายใต้แรงกระทำในแนวแกนของชิ้นงานที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนาคือ 2.0 mm (ค) ชิ้นงาน C15-2.0

จากภาพที่ 4.27 แสดงถึงขั้นตอนการเสียหายสุดท้ายของชิ้นงานที่มีมุมเอียง 5, 10 และ 15 องศา และความหนาเท่ากับ 2.0 mm จากการทดลองพบว่า ลักษณะการเสียหายของชิ้นงานเริ่มต้นที่ปลายด้านบน โดยมีลักษณะแตกและยุบตัวเป็นชั้นเล็กตลอดจนสิ้นสุดการยุบตัวจากการสังเกต ชิ้นงาน A5-2.0 มีการยุบตัวน้อยกว่าชิ้นงานอื่นๆ

รูปแบบการเสียหายสุดท้ายของชิ้นงาน จากภาพที่ 4.28 จากการทดลองพบว่า ชิ้นงานมีลักษณะแตกและยุบตัวเป็นชั้น ซึ่งมีลักษณะคล้ายกันในทุกกรณี



(ก)

ภาพที่ 4.28 การเสียหายสุดท้ายของชิ้นงานภายใต้แรงกระทำในแนวแกนของชิ้นงานที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนาคือ 2.0 mm (ก) ชิ้นงาน A5-2.0 และ (ข) ชิ้นงาน B10-2.0



(ข)



(ค)

ภาพที่ 4.28 การเสียหายสุดท้ายของชิ้นงานภายใต้แรงกระแทกในแนวแกนของชิ้นงานที่มีมุมเอียง
แตกต่างกันและความหนา คือ 2.0 mm (ค) ชิ้นงาน C15-2.0

4.2.2.3 การเสียหายของชิ้นงานความหนา 2.5 mm



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 4.29 การเสียหายภายใต้แรงกระทำในแนวแกนของชิ้นงานที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนาคือ 2.5 mm (ก) ชิ้นงาน A5-2.5 (ข) ชิ้นงาน B10-2.5 และ (ค) ชิ้นงาน C15-2.5 ตามลำดับ



(ก)



(ข)



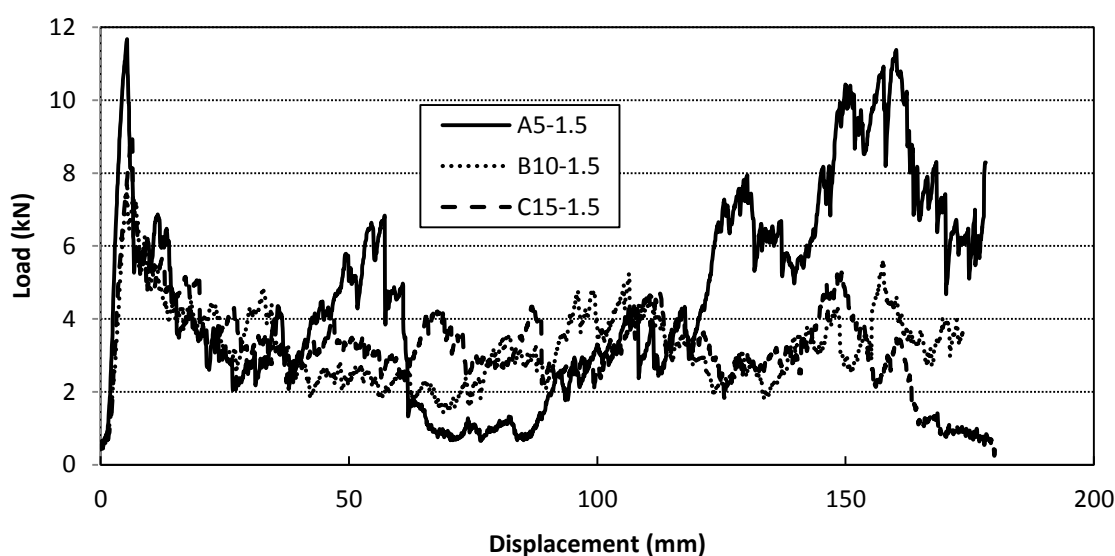
(ค)

ภาพที่ 4.30 การเสียหายสุดท้ายของชิ้นงานภายใต้แรงกระแทกในแนวแกนของชิ้นงานที่มีมุมเอียง
แตกต่างกันและความหนาคือ 2.5 mm (ก) ชิ้นงาน A5-2.5 (ข) ชิ้นงาน B10-2.5 และ
(ค) ชิ้นงาน C15-2.5 ตามลำดับ

จากภาพที่ 4.29 แสดงถึงขั้นตอนการเสียหายของชิ้นงานที่มีมุมเอียง 5, 10 และ 15 องศา และความหนาเท่ากับ 2.5 mm จากการทดลองพบว่า ขั้นตอนการเสียหายเริ่มที่ปลายด้านบนของชิ้นงาน มีลักษณะแตกออกเป็นชิ้นเล็กตลอดจนถึงสิ้นสุดการยุบตัว จากการสังเกตพบว่าการยุบตัวของชิ้นงานทั้งหมดน้อยมาก ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของความหนาคือ 2.5 mm ที่สามารถต้านทานแรงกระแทกได้มากกว่าชิ้นงานอื่นๆ

จากภาพที่ 4.30 จะเห็นได้ว่ารูปแบบการเสียหายที่เกิดจากการทดสอบทั้งหมดส่วนใหญ่ มักจะเสียหายที่ปลายด้านบนของชิ้นงานเป็นหลัก โดยพบว่าชิ้นงาน A5-2.5 มีการยุบตัวน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานอื่นๆ

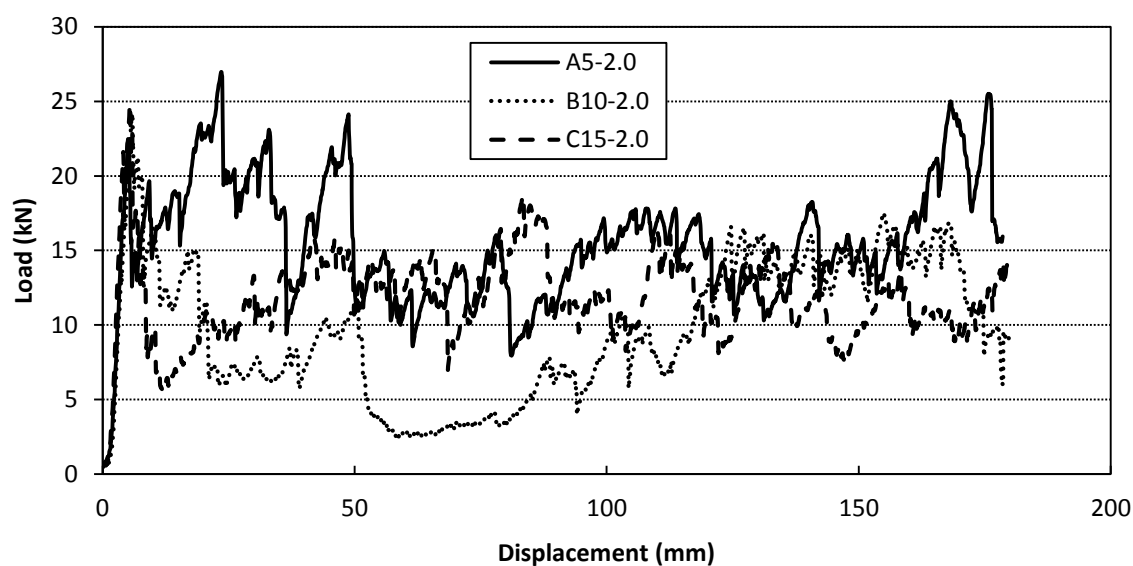
4.2.3 ความสามารถในการดูดซับพลังงาน



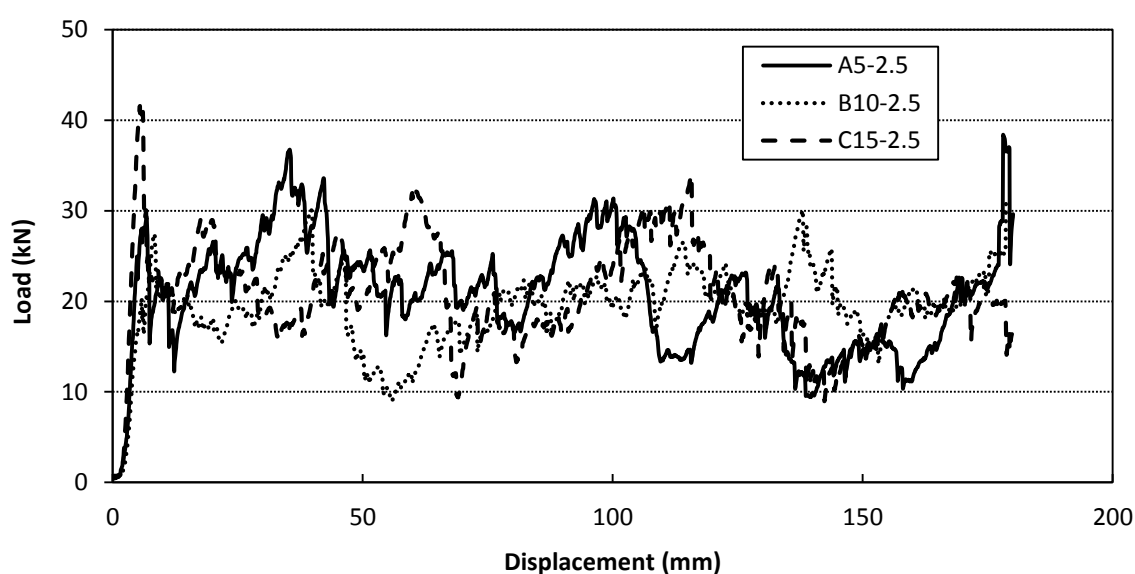
ภาพที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระและระยะยุบตัวภายใต้แรงกระทำกึ่งคงที่ของชิ้นงานที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนา คือ 1.5 mm

จากภาพที่ 4.31 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างภาระกับระยะยุบตัวของชิ้นงานทรงกรวยที่มีมุมเอียงเท่ากับ 5, 10 และ 15 องศา และความหนาเท่ากับ 1.5 mm โดยแกนตั้งเป็นค่าภาระ และในแกนนอนเป็นค่าระยะยุบตัวของชิ้นงาน เริ่มจากต้นจนถึงสิ้นสุดการยุบตัว จากกราฟจะเห็นว่าช่วงเริ่มต้นก่อนการเปลี่ยนแปลงเป็นช่วงที่ชิ้นงานยังไม่เสียรูปอย่างถาวร หลังจากนั้นกราฟจะตกลงมาอย่างรวดเร็วต่อจากนั้นกราฟจะเกิดการแกว่งตัวสลับกันอย่างต่อเนื่องจนถึงสิ้นสุดการยุบตัว ซึ่ง

พบว่าชิ้นงาน A5-1.5 ที่มีมุมเอียงเท่ากับ 5 องศา กราฟมีการแกว่งตัวสูงกว่าชิ้นงาน B10-1.5 และชิ้นงาน C15-1.5



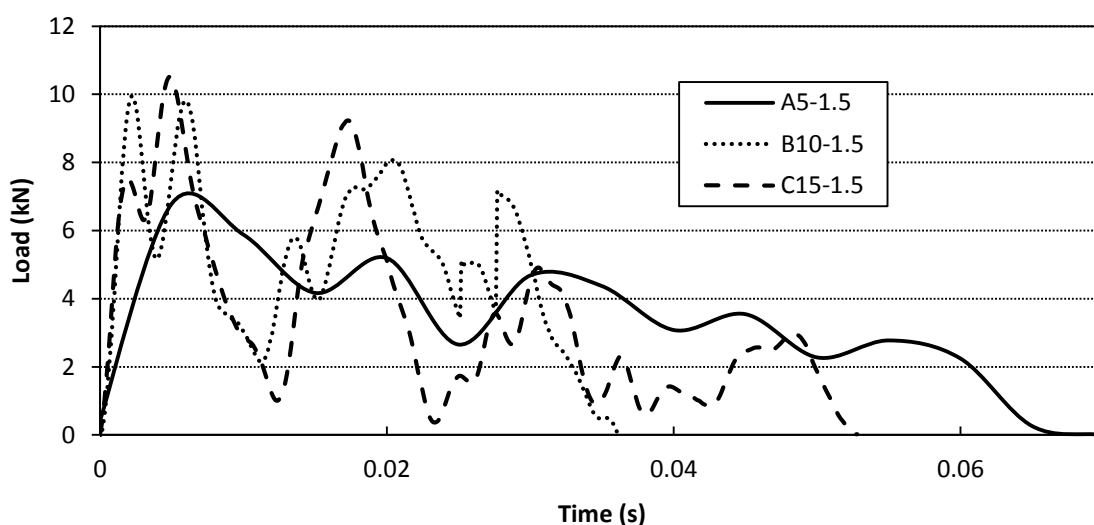
ภาพที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระและระยะยุบตัวภายใต้แรงกระทำถึงคงที่ของชิ้นงานที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนาคือ 2.0 mm



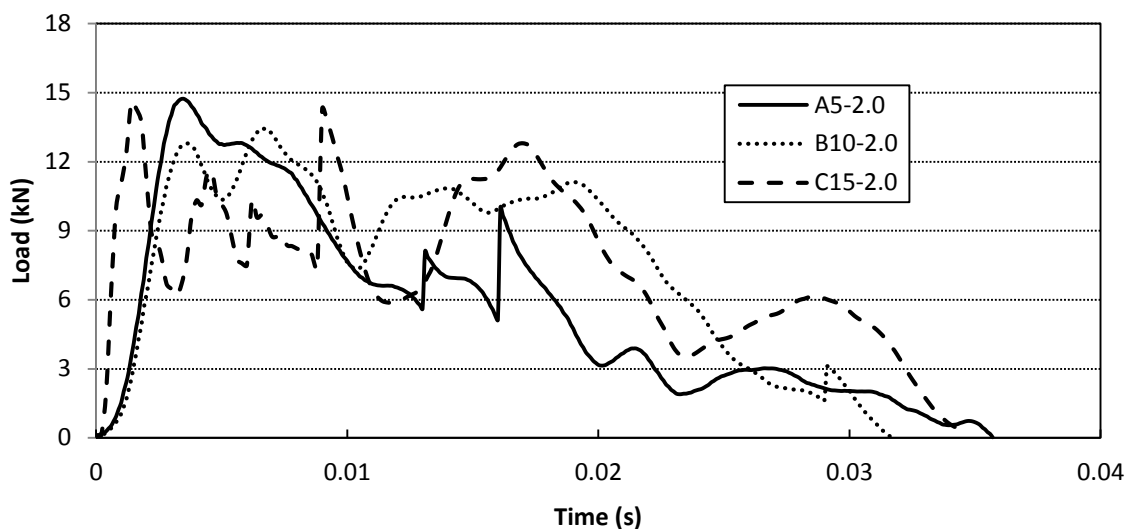
ภาพที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระและระยะยุบตัวภายใต้แรงกระทำถึงคงที่ของชิ้นงานที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนาคือ 2.5 mm

จากภาพที่ 4.32 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงปฏิกิริยา หรือภาระกับระยะยุบตัวของชิ้นงานที่มีความหนา 2.0 mm และมุมเอียงเท่ากับ 5, 10 และ 15 องศา จากกราฟจะเห็นว่าช่วงเริ่มต้นก่อนการเปลี่ยนแปลงเป็นช่วงที่ชิ้นงานยังไม่เสียรูปอย่างถาวร หลังจากนั้นกราฟจะตกลงมาอย่างรวดเร็วต่อจากนั้นกราฟจะเกิดการแกว่งตัวสลับกันอย่างต่อเนื่องจนสิ้นสุดการยุบตัว จากผลการทดลองพบว่า ชิ้นงาน A5-2.0 ลักษณะของกราฟจะมีแนวโน้มสูงกว่าชิ้นงาน B10-1.5 และชิ้นงาน C15-1.5

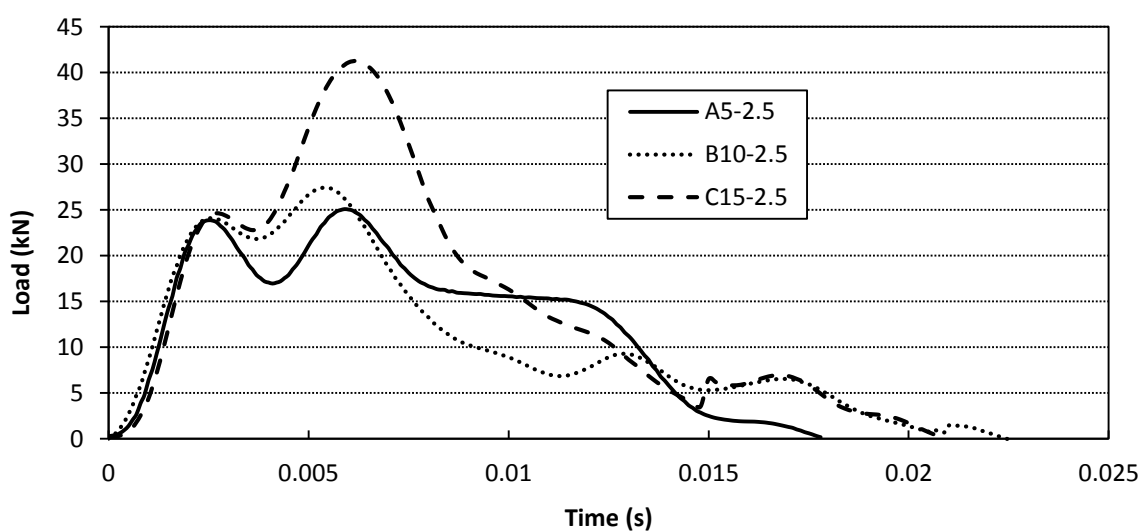
จากภาพที่ 4.33 แสดงกราฟผลการทดลองของชิ้นงานทรงกรวยซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของภาระกับระยะยุบตัวของชิ้นงานที่มีความหนา 2.5 mm และมุมเอียงเท่ากับ 5, 10 และ 15 องศา จากผลการทดลองพบว่าช่วงแรกของกราฟชิ้นงาน C15-2.5 มีค่าภาระวิกฤติสูงกว่าชิ้นงาน A5-2.5 และ B10-2.0 หลังจากจุดนี้เส้นกราฟจะแกว่งตัวขึ้นลงสลับกันจนสิ้นสุดกระบวนการ ซึ่งจากการสังเกตลักษณะเส้นกราฟของชิ้นงาน A5-2.5 จะมีแนวโน้มสูงกว่าชิ้นงานอื่นๆ ส่วนค่าพลังงานดูดซับของชิ้นงานที่สามารถดูดซับได้นั้นจะทำการคำนวณและแสดงไว้ในตารางที่ 4.4 ซึ่งจะอธิบายต่อไป



ภาพที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระและเวลา ภายใต้แรงกระแทกของชิ้นงานที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนาคือ 1.5 mm



ภาพที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระและเวลา ภายใต้แรงกระทำของชิ้นงานที่มีมุมเอียงแตกต่างกัน และความหนาคือ 2.0 mm



ภาพที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระและเวลา ภายใต้แรงกระทำของชิ้นงานที่มีมุมเอียงแตกต่างกัน และความหนาคือ 2.5 mm

จากภาพที่ 4.34 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงปฏิกิริยากับเวลา ของชิ้นงานที่มีมุมเอียงเท่ากับ 5, 10 และ 15 องศา และความหนาเท่ากับ 1.5 mm ผลการทดลองพบว่าช่วงเริ่มต้นของกราฟไปถึงจุดเริ่มต้นเปลี่ยนแปลงความชันถือเป็นช่วงที่ชิ้นงานยังไม่เสียรูป จากนั้นกราฟจะตก

ลงมาและแกว่งตัวต่ำลงจนสิ้นสุดแรงกระทำ จากกราฟพบว่าชิ้นงาน B10-1.5 มีค่าภาระเฉลี่ยเท่ากับ 5.03 kN ซึ่งมีค่าสูงกว่าชิ้นงาน A5-1.5 และ B10-1.5 คือ 3.02 kN และ 3.48 kN ตามลำดับ

จากภาพที่ 4.35 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงปฏิกิริยากับเวลา ของชิ้นงานที่มีมุมเอียงเท่ากับ 5, 10 และ 15 องศา และความหนาเท่ากับ 2.0 mm จากการสังเกตพบว่าเส้นกราฟของชิ้นงาน B10-2.0 มีแนวโน้มค่าภาระสูงกว่าชิ้นงาน A5-2.0 และ C15-2.0 ส่วนลักษณะการแกว่งตัวของกราฟมีลักษณะสลับกันตลอดจนสิ้นสุดการยุบตัว จากกราฟพบว่าค่าภาระเฉลี่ยสูงสุด คือชิ้นงาน B10-2.0 คือ 7.74 kN ในส่วนของค่าภาระสูงสุดคือ ชิ้นงาน A5-2.0 คือ 14.73 kN

จากภาพที่ 4.36 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงปฏิกิริยากับเวลา ของชิ้นงานที่มีมุมเอียงเท่ากับ 5, 10 และ 15 องศา และความหนาเท่ากับ 2.5 mm จากกราฟจะเห็นว่าช่วงเริ่มต้นก่อนกราฟเปลี่ยนแปลงความชันครั้งแรกนั้นถือเป็นช่วงที่ชิ้นงานยังไม่เสียรูป เมื่อชิ้นงานเริ่มเสียหายอย่างถาวรกราฟจะแกว่งตัวเป็นรูปคลื่นเนื่องจากแรงกดและแรงต้านสลับกันอย่างต่อเนื่องจนสิ้นสุดการยุบตัว จากกราฟพบว่า ชิ้นงาน C15-2.5 มีค่าภาระสูงสุดคือ 41.25 kN ซึ่งมากกว่าชิ้นงานอื่นๆ ในส่วนของค่าภาระเฉลี่ยพบว่า ชิ้นงาน C15-2.5 คือ 14.73 kN ชิ้นงาน A5-2.5 คือ 13.10 kN และชิ้นงาน B10-2.5 คือ 10.58 kN ตามลำดับ ส่วนค่าพลังงานดูดซับของชิ้นงานที่สามารถดูดซับได้นั้น จะทำการคำนวณและแสดงไว้ในตารางที่ 4.5 ซึ่งจะอธิบายต่อไป

จากตารางที่ 4.4 แสดงผลการคำนวณที่ได้จากการทดลองของชิ้นงานที่มีมุมเอียงแตกต่างกัน ได้แก่ A5 คือ ชิ้นงานที่มีมุมเอียง 5 องศา B10 คือ ชิ้นงานที่มีมุมเอียง 10 องศา และ C15 คือ ชิ้นงานที่มีมุมเอียง 15 องศา และความหนาเท่ากับ 1.5, 2.0 และ 2.5 mm โดยผลการทดลองพบว่าในกรณีความหนา 1.5 mm ชิ้นงาน A5-1.5 สามารถดูดซับพลังงานได้เท่ากับ 0.84 kN.m ชิ้นงาน B10-1.5 สามารถดูดซับพลังงานได้เท่ากับ 0.59 kN.m และชิ้นงาน C15-1.5 สามารถดูดซับพลังงานได้เท่ากับ 0.58 kN.m ดังนั้นจะเห็นได้ว่าชิ้นงาน A5-1.5 สามารถดูดซับพลังงานได้มากกว่าชิ้นงาน B10-1.5 และ C15-1.5 ประมาณ 29.76 % และ 30.95 % ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาถึงมวลของชิ้นงานพบว่าความสามารถในการดูดซับพลังงานจำเพาะของชิ้นงาน A5-1.5 มากกว่า ชิ้นงาน B10-1.5 และ C15-1.5 ประมาณ 37.93 % และ 46.39 % ตามลำดับ สำหรับผลการทดลองกรณีความหนา 2.0 mm พบว่า ชิ้นงาน A5-2.0 สามารถดูดซับพลังงานได้เท่ากับ 2.78 kN.m ชิ้นงาน B10-2.0 สามารถดูดซับพลังงานได้เท่ากับ 1.74 kN.m และชิ้นงาน C15-2.0 สามารถดูดซับพลังงานได้เท่ากับ 2.13 kN.m ซึ่งหากเปรียบเทียบกันพบว่าชิ้นงาน A5-2.0 สามารถดูดซับพลังงานได้มากกว่าชิ้นงาน B10-2.0 และ C15-2.0 ประมาณ 37.41 % และ 23.38 % ตามลำดับ และชิ้นงาน A5-2.0 สามารถดูดซับพลังงานจำเพาะได้ดีกว่าชิ้นงาน B10-2.0 และ C15-2.0 ประมาณ 42.55 % และ 42.31 % ตามลำดับ ส่วนผลการทดลองของชิ้นงานความหนา 2.5 mm พบว่า ชิ้นงาน A5-2.5 สามารถดูดซับ

ตารางที่ 4.4 ความสามารถในการดูดซับพลังงานภายใต้ภาระกระทำแบบกึ่งคงที่

ชิ้นงาน	น้ำหนัก (kg)	ระยะยุบตัว (mm)	ภาระเฉลี่ย (kN)	ภาระสูงสุด (kN)	พลังงานดูดซับ (kN.m)	พลังงานดูดซับจำเพาะ (kN.m/kg)
ภาระกึ่งคงที่						
ความหนา 1.5 mm						
A5-1.5	0.26	0.18	4.65	11.67	0.84	3.19
B10-1.5	0.30	0.18	3.28	7.73	0.59	1.98
C15-1.5	0.34	0.18	3.21	9.06	0.58	1.71
ความหนา 2.0 mm						
A5-2.0	0.34	0.18	15.45	26.98	2.78	8.13
B10-2.0	0.37	0.18	9.69	24.17	1.74	4.67
C15-2.0	0.45	0.18	11.83	24.87	2.13	4.69
ความหนา 2.5 mm						
A5-2.5	0.41	0.18	20.71	38.41	3.73	9.05
B10-2.5	0.51	0.18	19.34	31.20	3.48	6.83
C15-2.5	0.59	0.18	20.85	41.58	3.75	6.36

พลังงานได้เท่ากับ 3.73 kN.m ชิ้นงาน B10-2.5 สามารถดูดซับพลังงานได้เท่ากับ 3.48 kN.m และ ชิ้นงาน C15-2.5 สามารถดูดซับพลังงานได้เท่ากับ 3.75 kN.m หากเปรียบเทียบกันพบว่าชิ้นงาน C15-2.5 สามารถดูดซับพลังงานได้มากกว่าชิ้นงาน A5-2.5 และ B10-2.5 ประมาณ 0.53 % และ 7.2 % ตามลำดับ หากพิจารณาค่าพลังงานดูดซับจำเพาะ พบว่าชิ้นงาน A5-2.5 สามารถดูดซับพลังงานจำเพาะได้มากกว่า ชิ้นงาน B10-2.5 และ C15-2.5 ประมาณ 24.53 % และ 29.72 % ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 ความสามารถในการดูดซับพลังงานภายใต้แรงกระแทก

ชิ้นงาน	น้ำหนัก (kg)	ระยะยวบตัว (m)	ภาระเฉลี่ย (kN)	ภาระสูงสุด (kN)	พลังงานดูดซับ (kN.m)	พลังงานดูดซับจำเพาะ (kN.m/kg)
แรงกระแทก						
ความหนา 1.5 mm						
A5-1.5	0.26	0.14	3.02	6.79	0.44	1.66
B10-1.5	0.30	0.22	5.03	9.95	1.08	3.63
C15-1.5	0.34	0.10	3.48	10.51	0.35	1.03
ความหนา 2.0 mm						
A5-2.0	0.34	0.06	5.55	14.73	0.31	0.89
B10-2.0	0.37	0.05	7.74	13.46	0.35	0.93
C15-2.0	0.45	0.04	7.42	14.59	0.26	0.57
ความหนา 2.5 mm						
A5-2.5	0.41	0.03	13.10	25.09	0.33	0.80
B10-2.5	0.51	0.02	10.58	27.44	0.21	0.42
C15-2.5	0.59	0.02	14.73	41.25	0.22	0.37

จากตารางที่ 4.5 เป็นผลการคำนวณค่าพลังงานดูดซับและค่าพลังงานดูดซับจำเพาะของชิ้นงานภายใต้แรงกระแทก ผลจากการทดลองกรณีความหนา 1.5 mm พบว่าชิ้นงาน A5-1.5 สามารถดูดซับพลังงานได้เท่ากับ 0.44 kN.m ชิ้นงาน B10-1.5 สามารถดูดซับพลังงานได้เท่ากับ 1.08 kN.m และชิ้นงาน C15-1.5 สามารถดูดซับพลังงานได้เท่ากับ 0.35 kN.m จากการสังเกตพบว่าชิ้นงาน B10-1.5 สามารถดูดซับพลังงานได้มากกว่าและเมื่อเปรียบเทียบ ชิ้นงาน A5-1.5 และ B10-1.5 ประมาณ 59.25 % และ 67.59 % ตามลำดับ เมื่อนำค่าพลังงานดูดซับของแต่ละชิ้นงานมาเปรียบเทียบกับมวล

ของชิ้นงานเองจะเห็นว่า ชิ้นงาน A5-1.5 สามารถดูดซับพลังงานจำเพาะได้มากกว่า ชิ้นงาน B10-1.5 และ B10-1.5 ประมาณ 54.26 % และ 71.62 % ตามลำดับ

สำหรับชิ้นงานที่มีความหนา 2.0 mm จากผลการทดลองพบว่า ชิ้นงาน A5-2.0 สามารถดูดซับพลังงานได้เท่ากับ 0.31 kN.m ชิ้นงาน B10-2.0 สามารถดูดซับพลังงานได้เท่ากับ 0.35 kN.m และชิ้นงาน C15-2.0 สามารถดูดซับพลังงานได้เท่ากับ 0.26 kN.m จากข้อมูลในตารางพบว่า ชิ้นงาน B10-2.0 สามารถดูดซับพลังงานได้มากกว่าและเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงาน A5-2.0 และ C15-2.0 ประมาณ 11.42 % และ 25.71 % ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับมวลของชิ้นงานแต่ละชิ้นแล้ว พบว่าความสามารถในการดูดซับพลังงานจำเพาะของชิ้นงาน B10-2.0 มากกว่าชิ้นงาน A5-2.0 และ C15-2.0 ประมาณ 4.30 % และ 38.70 % ตามลำดับ

ส่วนผลการทดลองของชิ้นงานที่มีความหนา 2.5 mm พบว่าชิ้นงาน A5-2.5 สามารถดูดซับพลังงานได้เท่ากับ 0.33 kN.m เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงาน B10-2.5 และ C15-2.5 สามารถดูดซับพลังงานได้มากกว่าประมาณ 36.36 % และ 33.33 % ตามลำดับ เมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับพลังงานจำเพาะพบว่าชิ้นงาน A5-2.5 สามารถดูดซับพลังงานจำเพาะได้มากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงาน B10-2.5 และ C15-2.5 ประมาณ 47.5 % และ 53.75% ตามลำดับ

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

5.1.1 ชิ้นงานทรงกระบอก

จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า ผลทดลองและแบบจำลองทาง FEA ภายใต้ภาระกระทำแบบกึ่งคงที่ พบว่าชิ้นงานมีลักษณะการเสียหายอยู่สามรูปแบบคือ (1) การเสียหายแบบแตกและบานแยกออกเป็นแฉกซึ่งเกิดจากอิทธิพลของเส้นใยในแนวตั้ง ที่สามารถรับภาระในแนวแกนโดยตรง และอิทธิพลเส้นใยในแนวขวางทำหน้าที่ประคองให้เส้นใยในแนวตั้งให้รับภาระแนวแกน (2) การเสียหายแบบยุบตัวตามแนวเฉียงของเส้นใย ซึ่งเกิดจากการเรียงตัวของเส้นใยในแนวเฉียงเมื่อรับภาระในแนวแกนทำให้เส้นใยเกิดการแตกหักตลอด จนสิ้นสุดการยุบตัว และ (3) การเสียหายแบบแตกและบานออกเป็นพุ่ม ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของเส้นใยในแนวตั้งหรือ มุม 0 องศา ทำให้และอิทธิพลของเส้นใยในแนวเฉียง ทำหน้าที่ประคองเส้นใยใน รับภาระในแนวแกนโดยตรง แนวตั้งและรับภาระในแนวแกน

สำหรับผลทดลองและแบบจำลองทาง FEA ภายใต้แรงกระทำแบบแตก พบว่าชิ้นงานมีลักษณะการเสียหายอยู่สามรูปแบบคือ การเสียหายแบบแตกและบานแยกออกเป็นแฉก การเสียหายแบบยุบตัวตามแนวเฉียงของเส้นใย และ การเสียหายแบบแตกและบานคล้ายกับการทดลอง

ในด้านความสามารถในการดูดซับพลังงานภายใต้ภาระกระทำแบบกึ่งคงที่และภายใต้แรงกระทำแบบแตก พบว่าชิ้นงาน A ที่มีมุมของเส้นใย คือ $[(0/90)/(0/90)/(0/90)]$ สามารถดูดซับพลังงานจำเพาะได้มากกว่าชิ้นงานอื่นๆ ซึ่งเป็นผลมาจากการเรียงเส้นใยของมุม 0 องศา มีทิศทางในการรับแรงในแนวแกนโดยตรง และมุม 90 องศา ทำหน้าที่ประคองให้เส้นใยมุม 0 องศา ไม่ให้แยกออกจากกัน

5.1.2 ชิ้นงานทรงกรวย

จากการศึกษาตัวแปรและการดูดซับพลังงานของท่อทรงเรียวผนังบางโดยใช้วัสดุประกอบเสริมแรงภายใต้แรงกระทำตามแนวแกน กรณีทดสอบชิ้นงานภายใต้แรงกดแบบกึ่งคงที่พบว่ามิลักษณะการเสียหายอยู่ 3 แบบคือ (1) การเสียหายแบบแตกและบานออก ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของความหนา 1.5 mm (2) การเสียหายแบบแตกเปราะ ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของความหนา 2.0 mm

และ (3) การเสียหายแบบแตกเป็นชิ้นเล็กตลอดแนวแกนของชิ้นงาน ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของความหนา 2.5 mm สำหรับความสามารถในการดูดซับพลังงานจำเพาะ พบว่าชิ้นงาน A5 หรือมูมเอียง 5 องศา สามารถดูดซับพลังงานจำเพาะได้มากกว่าชิ้นงานอื่นๆ ในทุกกรณี ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของมุมเอียงของชิ้นงานที่สามารถรับภาระในแนวแกนได้ดีกว่ามูมเอียงอื่นๆ กรณีแรงกระแทก พบว่าลักษณะการเสียหายของชิ้นงานมี 1 แบบ คือ การเสียหายแบบยุบตัวแตกเป็นชิ้นเล็กตลอดแนวแกนของชิ้นงาน ในด้านความสามารถในการดูดซับพลังงานจำเพาะ พบว่าชิ้นงานที่มีมุมเอียง 5 องศา หรือ A5 สามารถในการดูดซับพลังงานจำเพาะได้มากกว่าชิ้นงานอื่นๆ ในทุกกรณี

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการศึกษานี้ทดลองภายใต้ภาระกระทำในแนวแกนเท่านั้น ผู้วิจัยจึงขอเสนอแนวทางวิจัยต่อไปนี้

- 5.2.1 ทดสอบชิ้นงานภายใต้ภาระดัด และภาระบิด
- 5.2.2 เลือกใช้เส้นใยแก้ว และเรซิน ชนิดอื่นๆ
- 5.2.3 สามารถศึกษาด้วยการเติมโฟมโพลียูรีเทน เป็นต้น
- 5.2.4 ศึกษาฟังก์ชันการเรียงตัวของเส้นใยที่มีการเรียงทับซ้อนและลักษณะมุมพันต่างๆ จากโปรแกรมทางโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

เอกสารอ้างอิง

เอกสารอ้างอิง

- [1] วิริยะ ทองเรือง. วิศวกรรมพอลิเมอร์. พิมพ์ครั้งที่ 1. สงขลา : หน่วยเทคโนโลยีการศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2554.
- [2] ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. วัสดุวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2549.
- [3] ขวลิศ ถิ่นวงศ์พิทักษ์, ชาคริต โพธิ์งาม. “การศึกษาการเสียหายของชิ้นส่วนโครงสร้างรถยนต์โดยสารที่ผลิตภายในประเทศ ภายใต้แรงกระแทก” มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ปี 2548-2549. คณะวิศวกรรมศาสตร์ : มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2555.
- [4] C. Thinvongpituk The behavior of non-constant thickness conical shells under axial loading. Doctor’s Thesis Manchester: University of Manchester Institute of Science and Technology (UMIST), 2002.
- [5] ปราโมทย์ เดชะอำไพ. ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [6] G.M. Nagel and D.P. Thambiratnam. “A numerical study on impact response and energy absorption of tapered thin-wall tubes”, Int J Mech Sci. 46 (2): 201-216, 2004.
- [7] G.M. Nagel and D.P. Thambiratnam. “Dynamic simulation and energy absorption of tapered thin-wall tubes under oblique impact loading”, Int J Impact Engng. 32 (10): 1595-1620, 2006.
- [8] G.M. Nagel and D.P. Thambiratnam. “Computer simulation and energy absorption of tapered thin-walled rectangular tubes”, Thin-wall Structures. 43 (8): 1225-1242, 2005.
- [9] S.R. Reid, and T.Y. Reddy. “Static and Dynamic crushing of tapered sheet metal tubes of rectangular crosssection”, Int.J.Mech.csi. 28 (9): 623-637, 1996.
- [10] A.G. Mamalis and et al. “The static and dynamic axial crumbling of thin-walled fiberglass composite square tubes”, Composite Part B. 28 B (4): 439-451, 1997.
- [11] A.G. Mamalis, and et al. “The static and dynamic axial collapse of fiberglass composite automotive frame rails”, Composite Structures. 34 (1): 77-90, 1996.
- [12] A.G. Mamalis. and et al. “Analysis of Failure mechanisms Observed in Axial Collapse of Thin-Walled Circular Fiberglass Composite Tubes”, Composite Structures. 24 (4): 335-352, 1996.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [13] A.G. Mamalis. and et al. “Analytical modeling of the static and dynamic axial collapse of thin-walled fiberglass composite conical shells”, Composite Structures. 19 (5-6): 477-492, 1997.
- [14] N.K. Young and et al. “Impact Collapse Characteristics of CF/Epoxy Composite Tubes for Light-Weights”, KSME International Journal. 17 (1): 48-56, 2003.
- [15] M.R. Bambach. and et al. “Composite steel–CFRP SHS tubes under axial impact”, Composite Structures. 87 (3): 282-292, 2009.
- [16] M. M. Shokrieh. and et al. “Effect of fiber orientation and cross section of composite tubes on their energyabsorption ability axial dynamic loading”, Mechanics of Composite Materials. 45 (6): 567-576, 2009.
- [17] C. Milan and et al. “Finite element calculation of a press fit joint between a composite materials tube and an aluminum cylinder”, Composite material. 6 (6): 369-380, 1999.
- [18] F.B. Paolo and et al. “Crush energy absorption of composite channel section specimens”, Composites : Part A. 40 (8): 1248–1256, 2009.
- [19] S. Solaimurugan, R. Velmurugan. “Influence of fibre orientation and stacking sequence on petalling of glass/polyester composite cylindrical shells under axial compression”, International Journal of Solids and Structures. 44 (21): 6999–7020, 2007.
- [20] พัทธน์ ไฟศาลภูมาศ และวิชัย รุ่งเรืองอนันต์. การศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบการพันกับค่าความต้านทานแรงกระแทกของถังไฟเบอร์กลาส, คณะวิศวกรรมศาสตร์ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2550.
- [21] J.H Lee. and et al. “Experimental characterization of pultruded GFRP bridge deck for light-weight vehicles”, Composite Structures. 80 (1): 141–151, 2007.
- [22] สุรศักดิ์ สุวรรณแดง และคณะ “การจำลองพฤติกรรมไม่เชิงเส้นของคานที่ทำจากวัสดุผสมของพลาสติกกับจี้เหล็ยไม้ด้วยโปรแกรม ABAQUS”, ในการประชุมวิชาการด้านพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : โรงแรมโรงแรมเดอะทวินทาวเวอร์, 2550.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [23] M.Golzar, M.Poorzeinolabedin. “Prototype fabrication of a composite automobile body based on integrated structure”, International Journal manufacturing technology. 49(9-12): 1037-1045, 2010.
- [24] S.M.R. Khalili and et al “Finite element modeling of low-velocity impact on laminated composite platesand cylindrical shells”, Composite Structures. 93 (5): 1363–1375, 2011.
- [25] C.Hua Huang, Y.J. Lee. “Experiments and simulation of the static contact crush of composite laminated plates”, Composite Structures. 61 (3): 265-270, 2003.

ภาคผนวก

ผลงานตีพิมพ์

- [1] วิศิษฐ์ จันทรชื่น, นิรุต อ่อนสูง, ขวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ และ สมญา ภูณะยา. การศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของท่อไฟเบอร์กลาสต่อแรงกดในแนวแกนแบบกึ่งคงที่และแบบไม่คงที่. การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25. 19-21 ตุลาคม 2554: กระบี่. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. Paper no. AMM49
- [2] วิศิษฐ์ จันทรชื่น, ขวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ และ สมญา ภูณะยา. การศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของท่อไฟเบอร์กลาสภายใต้แรงกระทำในแนวแกน. การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26. 24-27 ตุลาคม 2555: เชียงราย. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. Paper no. AMM2012
- [3] วิศิษฐ์ จันทรชื่น, ขวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์, สมญา ภูณะยา และ รัชดา โสภาคะยัง. การศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของท่อไฟเบอร์กลาสภายใต้แรงกดในแนวแกน. วารสารวิศวกรรม มข. ปีที่ 41 ฉบับที่ 3 ประจำเดือน กรกฎาคม-กันยายน 2557.

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25

19-21 ตุลาคม 2554 จังหวัดกระบี่

การศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของท่อไฟเบอร์กลาสต่อแรงกดในแนวแกนแบบกึ่งคงที่และแบบไม่คงที่

The Study of Crashworthiness Behavior of Fiberglass Tube Subjected to Quasi- Static and

Dynamic Axial Compression

วิศิษฐ์ จันทร์ชัน^{1,*}, นิรุศ อ่อนสลุง¹, ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์¹ และ สมญา ญะยา²

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ

จ.อุบลราชธานี 34190

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม กรุงเทพมหานคร 10160

* E-mail: unicorn_ton@hotmail.com โทรศัพท์: 045 353 308, โทรสาร: 045 353 309

บทคัดย่อ

ปัจจุบันการผลิตโครงสร้างของยานพาหนะในด้านอุตสาหกรรมยานยนต์และการบินได้ถูกสร้างจากวัสดุหลากหลาย เช่น เหล็กหรืออะลูมิเนียมเป็นต้น แต่เนื่องจากวัสดุเหล่านี้มีน้ำหนักมากและยังมีปัญหาในการสึกกร่อน ดังนั้นจึงมีความพยายามหาวัสดุอื่น ๆ เพื่อใช้ทดแทน ซึ่งวัสดุประกอบก็เป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่ถูกใช้เป็นโครงสร้างทดแทนกันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากคุณสมบัติด้านการดูดซับพลังงานของวัสดุประกอบนั้น สามารถปรับปรุงและเพิ่มความแข็งแรงได้ จึงสามารถลดแรงกระแทกจากการชนได้ดีและมีความสามารถในการดูดซับพลังงานสูงเมื่อเปรียบเทียบกับมวลของโครงสร้าง งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของท่อไฟเบอร์กลาสต่อแรงกดในแนวแกน ซึ่งแรงที่ใช้ในการศึกษาเป็นแรงกระทำแบบกึ่งคงที่ (Quasi Static Load) และแบบไม่คงที่ (Dynamic Load) ชิ้นงานที่ใช้ในการศึกษาถูกพันด้วยเส้นใยแก้วที่มีการเรียงทับซ้อนและมุมไขว้ที่แตกต่างกัน ขึ้นรูปจาก E-glass/polyester มุมการไขว้ของเส้นใย 3 แบบคือ 0/90, 45/-45 และ 0/90/45 ตามลำดับ ขนาดของท่อมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกคือ 52 mm. ความหนาคือ 3 mm. และความยาวคือ 100 mm. ในการทดสอบชิ้นงานนั้นได้ทำการทดสอบโดยใช้เครื่อง ESH Universal Testing Machine สำหรับการทดสอบแบบกึ่งคงที่ กดที่ความเร็ว 10 mm/min และใช้เครื่อง Vertical Impact Testing Machine สำหรับการทดสอบแบบไม่คงที่โดยใช้ความเร็วในกระแทกคือ 6.8 m/s ผลการศึกษาพบว่า ในกรณีแรงกระทำแบบคงที่ชิ้นงานที่มีมุมไขว้ 45/-45 มีค่าพลังงานดูดซับจำเพาะมากที่สุด ในขณะที่กรณีแรงกระทำแบบไม่คงที่ชิ้นงานที่มีมุมไขว้ 0/90 มีค่าพลังงานดูดซับจำเพาะมากที่สุด นอกจากนี้ในบทความยังได้แสดงลักษณะการเสียหายที่เกิดขึ้นอีกด้วย

คำหลัก: วัสดุประกอบ, การชน, การยุบตัว, การดูดซับพลังงาน

Abstract

Nowaday, the structure of vehicles is made from various materials such as steel or aluminium. As a results of using steel or aluminium, the structure of vehicle is too heavy and has corrosion problem.

So, it is important for the researcher to find new material that is more appropriate for manufacturing vehicle structure. Composite Material is alternative material that is widely used for vehicle structure. Regarding to the properties of energy absorption of composite material that absorb higher energy and can be enstrengthen, so it improve reduce impact performance. Moreover, it can absorb higher energy compare to the structure mass. This research is purposed to study crashworthiness behavior of fiberglass tube subjected to quasi static load and dynamic axial compression. The specimen is made of fiberglass that lay-up in different angles in shape of E-glass/polyester. There are 3 cross angles of fiberglasses, including of 0/90, 45/-45 and 0/90/45. The tube has 52 mm outside diameter, 3 mm wall thickness, and 100 mm length. Quasi-Static Load test was done by ESH Universal Testing Machine and 10 mm/min crushing speed. Dynamic Load test was done by Vertical Impact Testing Machine, the impact speed was 6.8 m/s. The result show that in case of quasi-static load, the specimen with 45/-45 cross angle provides highest specific energy absorption. In case of dynamic Load, the specimen with 0/90 cross angle gives highest specific energy absorption. In addition, the collapse mode and response of specimens are also discussed in the paper.

Keywords: Composite Material, impact, Collapse, Energy absorption

1. บทนำ

ปัจจุบันวัสดุประกอบถูกนำมาประยุกต์เป็นโครงสร้างส่วนหน้าของรถยนต์ในการป้องกันความเสียหายของโครงสร้างภายใต้การชน และ ความปลอดภัยของผู้โดยสาร [1] ความสามารถในการดูดซับพลังงานของวัสดุประกอบมีความสำคัญในการพัฒนาพลังงานที่ดูดซับซึ่งขึ้นอยู่กับตัวแปร คือ ชนิดของเส้นใย เมทริกซ์ การเรียงตัวของมุมไขว้เส้นใย รูปทรง และความเร็วในการทดสอบ [2] โดยทั่วไปโลหะหรืออะลูมิเนียม มีลักษณะการเสียหาย แบบพับ และ แบบงอ ซึ่งพลังงานที่กระจายจะถูกรวมทั้งหมดมาจุดเดียวในแนวแคบๆ เมื่อเปรียบเทียบกับ วัสดุประกอบซึ่งมีลักษณะการเสียหาย แบบแตกเปราะเป็นชิ้นเล็ก ตลอดแนวแกนท่อ ในลักษณะคงที่จึงส่งผลให้เกิดการกระจายตัวของแรงได้มากกว่า [3] นอกจากนี้เนื่องจากมีวัสดุประกอบน้ำหนักเบา ความแข็งแรง และความคงทน วัสดุประกอบเป็นอีกทางเลือกเพื่อทดแทนวัสดุเดิม [4] มีงานวิจัยที่ศึกษาผลของ ลักษณะการเสริมแรง รูปทรง มุมไขว้ของเส้นใย อัตราการกด ที่นำไปสู่ความสามารถของการดูดซับพลังงานของท่อ

วัสดุประกอบ เช่น การศึกษาทดลองพฤติกรรมการเสียหายของโครงสร้างรถยนต์ภายใต้แรงกระทำแบบคงที่และไม่คงที่ โครงสร้างหน้าตัด รูปทรงหน้าพิกาทราบ รูปทรงกระบอก รูปทรงกรวย และรูปทรงสี่เหลี่ยม โดยขึ้นรูปจาก Fiber/vinylester ได้พิจารณา ศึกษา วิธีการเสียหายจากการสังเกต และใช้เครื่องขยายสเกล เพื่อหาคุณลักษณะการดูดซับพลังงานเปรียบเทียบระหว่างการทดลองกับทฤษฎี [5-8] การศึกษาคุณลักษณะการยุบตัวของท่อวัสดุประกอบ ได้พิจารณา ศึกษา ผลกระทบของ โครงสร้างที่อัตราส่วนความหนาต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง การเสริมแรงด้วยเส้นใย และ วิธีการเสียหายทางกลของวัสดุประกอบ [9] การศึกษาผลของกระบวนการขึ้นรูปด้วยระบบสุญญากาศและไม่ใช้สุญญากาศ ในการดูดซับพลังงานของ glass/polyester พบว่าชิ้นงานรูปทรงกระบอก ขึ้นรูปด้วยสุญญากาศ มีค่าดูดซับพลังงานจำเพาะสูงขึ้นสองเท่า [4] การศึกษาอิทธิพลของการดูดซับพลังงาน ของพื้นที่หน้าตัดภายใต้แรงกระทำในแนวแกน ได้พิจารณา ศึกษา อิทธิพลของโย

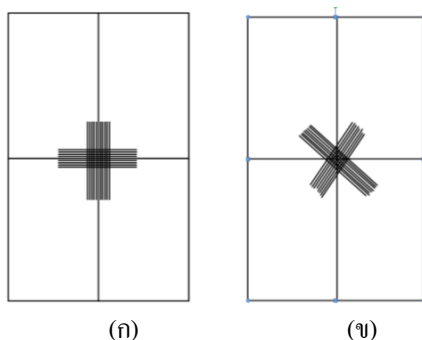
แก้วเสริมแรง พบว่าหน้าตัดทรงกระบอกดูดซับพลังงานได้มากกว่าหน้าตัดสี่เหลี่ยม [10]

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของท่อไฟเบอร์กลาสต่อแรงกดในแนวแกน ซึ่งแรงที่ใช้ในการศึกษาเป็นแรงกระทำแบบกึ่งคงที่ (Quasi-Static Load) และแบบไม่คงที่ (Dynamic Load) ท่อที่ใช้ในการทดสอบเป็นท่อรูปทรงกระบอก โดยศึกษาอิทธิพลของเส้นใยแก้วลักษณะวิธีการเสียหาย และความสามารถในการดูดซับพลังงาน

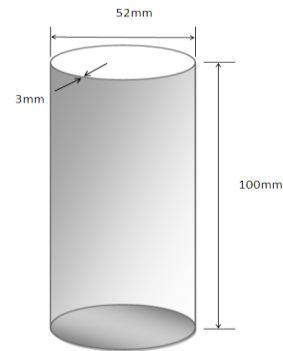
2. ชิ้นงานทดสอบและวิธีการทดลอง

2.1 ชิ้นงานทดสอบ

วัสดุประกอบประกอบด้วยสองส่วนคือ ส่วนเสริมแรงทำหน้าที่รับแรงหลักให้แก่โครงสร้าง ส่วนที่สองคือ เมทริกซ์ ทำหน้าที่ป้องกันการเสียหายของส่วนที่เสริมแรง และทำหน้าที่ส่งถ่ายแรงไปยังส่วนเสริมแรง ในการทดลองได้เลือกใช้พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไอโซพาทาลิก มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี ทนต่อความร้อน และสารเคมี เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิด E-glass มีลักษณะเป็นเส้นยาวเหมือนด้าย ผ่านการพันบิดรวมเส้นแล้วนำไปทอเป็นเส้นใย ในส่วนการขึ้นรูป ขึ้นรูปด้วยวิธี แบบ Filament Winding มีลักษณะพันรอบแม่พิมพ์เป็นท่อเหล็กในแนวนอน จากนั้นเส้นใยแก้วด้าย จะถูกแช่เรซิน แม่พิมพ์จะหมุนให้เส้นใยพันรอบตามมุมไขว้ที่กำหนด และความหนาที่ต้องการ



รูปที่ 1 แสดงถึงลักษณะของมุมไขว้ (ก) มุมไขว้ที่ 0/90 องศา (ข) มุมไขว้ที่ 45/-45 องศา



รูปที่ 2 แสดงถึงขนาดของตัวอย่างชิ้นงาน

ชิ้นงานที่ใช้ในการศึกษาถูกพันด้วยเส้นใยแก้วที่มีการเรียงทับซ้อนและมุมไขว้ที่แตกต่างกัน ขึ้นรูปจาก E-glass/polyester มุมการไขว้ของเส้นใย 3 แบบคือ 0/90, 45/-45 และ 0/90/45 ตามลำดับ ดังแสดงเป็นตัวอย่างในรูปที่ 1 ขนาดของท่อมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกคือ 52 mm. ความหนาคือ 3 mm. และความยาวคือ 100 mm ดังแสดงในรูปที่ 2

2.2. วิธีการทดลอง

2.2.1 การทดสอบแบบกระทำแบบคงที่

การทดสอบนี้ได้ดำเนินการโดยใช้เครื่องทดสอบการกดแบบกระทำแบบคงที่ ซึ่งมีชื่อว่า เครื่อง ESH Testing Limited ซึ่งเป็นเครื่องทดสอบที่ใช้ระบบคอมพิวเตอร์กับระบบไฮดรอลิกส์ (Hydraulic) ในการควบคุมมีความสามารถถึง 2,000 KN และระยะการกดมากที่สุดคือ 200 mm สามารถบันทึกข้อมูลได้ทุกๆ 0.04 mm ผลที่ได้จากการทดสอบเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำ (Load) และระยะทางในการยุบตัว (Displacement) สามารถบันทึกผลการทดสอบ และแสดงเป็นกราฟได้ทันที รูปเครื่องทดสอบแสดงดังรูปที่ 3

ในการทดสอบส่วนนี้ชิ้นงานจะถูกกดในแนวแกนด้วยความเร็วคงที่ 10 mm/min และกดลงมาจนกระทั่งชิ้นงานเกิดการยุบตัว จากนั้นทำการบันทึกค่าภาระและระยะยุบตัวเพื่อไปทำการวิเคราะห์ต่อไป



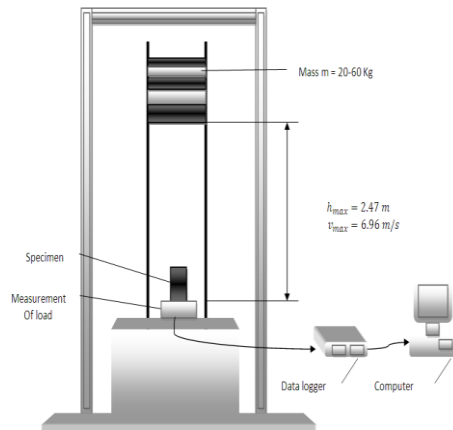
รูปที่ 3 แสดงเครื่องทดสอบการกระแทกแบบกระทำแบบคงที่

2.2.2 การทดสอบการกระแทก

การทดสอบส่วนนี้ได้ดำเนินการโดยใช้เครื่อง Vertical Impact Testing Machine ซึ่งเป็นเครื่องทดสอบที่ใช้ระบบคอมพิวเตอร์กับแรงกระแทกของก้อนจากเครื่องทดสอบ โดยความสูงของเครื่องทดสอบคือ 2.47 m น้ำหนักของมวลที่ใส่ลงในก้อนสามารถใส่ได้ ระหว่าง 20-60 kg ในส่วนด้านการประมวลผลเครื่องจะมี โหลดเซลล์ที่มีความละเอียดในการบันทึกข้อมูล สูงสุดที่ 10,000 ค่าต่อวินาที เมื่อทดสอบโหลดเซลล์จะแปลงค่าของแรงไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า นำผลที่ได้ ไปยัง Data logger เพื่อทำการบันทึกข้อมูล จากนั้นผลที่ได้จะเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อแปลงค่า โดยผลที่ได้จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง แรงกระแทก (Load) และเวลา (Time) ซึ่งสามารถบันทึกผลการทดลอง จากความสัมพันธ์นี้สามารถเขียนกราฟได้ รูปที่ 4 แสดงลักษณะของเครื่องทดสอบแรงกระแทก

ทดสอบภายใต้ภาระกระทำแบบไม่คงที่โดยใช้ความเร็วในกระแทกคือ 6.8 m/s และน้ำหนักของหัวค้อนคือ 45 kg ความสูงของหัวค้อนที่ตกลงมา

กระแทกกับชิ้นงานคือ 2.37 m ทำการบันทึกภาพด้วยกล้องความเร็วสูงและบันทึกแรงเพื่อนำไปวิเคราะห์ผลต่อไป



รูปที่ 4 เครื่องทดสอบการกระแทก

2.3 ตัวแปรที่พิจารณา

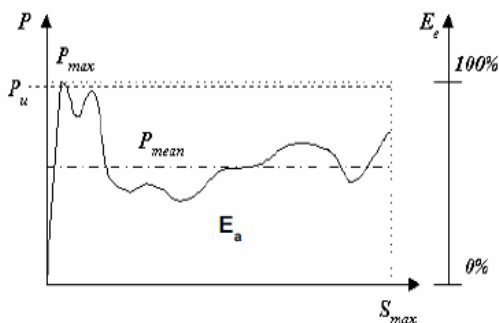
ในการศึกษาทางด้านการเสียหายของโครงสร้างภายใต้การชน (Crashworthiness) มักจะศึกษากราฟภาระและระยะยุบตัวของโครงสร้างดังตัวอย่างกราฟในรูปที่ 5 โดยมีตัวแปรที่สำคัญหลายตัว เช่น ภาระเฉลี่ย (Mean crushing load, P_{mean}) หมายถึง ภาระเฉลี่ยตลอดการเสียรูปของโครงสร้างภายใต้การกระแทกจนถึงสิ้นสุดการยุบตัวค่าพลังงานดูดซับ (Energy absorption, E_u) หมายถึงพลังงานที่โครงสร้างสามารถดูดซับได้ตลอดช่วงเวลาการกระแทกหรือการยุบตัว และพลังงานดูดซับจำเพาะ (Specific energy absorption, E_s) หมายถึง พลังงานที่โครงสร้างสามารถดูดซับได้ เมื่อเทียบกับขนาดน้ำหนักของตัวโครงสร้างเอง โดยในบทความนี้ได้มุ่งเน้นศึกษาค่าพลังงานที่ดูดซับได้และพลังงานดูดซับจำเพาะของชิ้นงานทดสอบ ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญในการบ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานจากการชนของโครงสร้าง โดยการหาค่าพลังงานดูดซับนั้นสามารถหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟของภาระและระยะยุบตัวของโครงสร้าง เมื่อเกิดการชนซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการดังสมการที่ (1)

$$E_a = \int P dS \quad (1)$$

โดยที่ E_a คือค่าพลังงานดูดซับ P คือค่าภาระ S คือค่าระยะการยุบตัว และสามารถหาค่าพลังงานดูดซับจำเพาะได้จากสมการที่ (2)

$$E_s = \frac{\int P dS}{\text{mass}} \approx \frac{P_{\text{mean}} S}{\text{mass}} \quad (2)$$

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



รูปที่ 5 กราฟแสดงภาระและระยะยุบตัวของโครงสร้างพร้อมทั้งแสดงตัวแปรต่างๆที่นิยมใช้ในการศึกษา

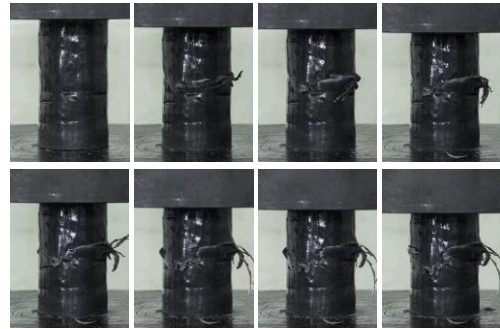
3. ผลการศึกษา

จากการทดสอบภาระกระทำในแนวแกนแบบคงที่และแบบไม่คงที่ของท่อไฟเบอร์กลาส ที่มีลักษณะของมุมไขว้ของเส้นใย 3 แบบคือ 0/90, 45/-45 และ 0/90/45 ตามลำดับ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการตอบสนองของท่อไฟเบอร์กลาสที่มีมุมการไขว้ของเส้นใยต่างๆมีดังนี้

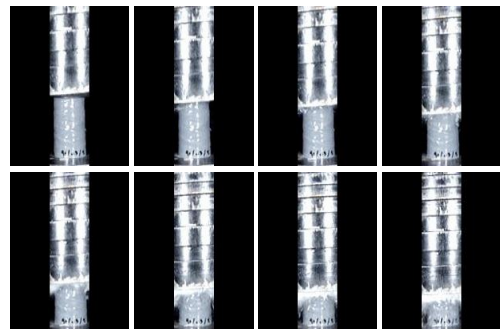
จากรูปที่ 6 แสดงรูปแบบการเสียหายของชิ้นงาน ภายใต้ภาระกระทำแบบคงที่ในแนวแกน ในช่วงแรกจะเกิดการยุบตัวของชิ้นงานช้า หลังจากภาระกระทำเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ชิ้นงานเกิดการยุบตัวลงอย่างรวดเร็ว โดยช่วงการเสียหายจะอยู่ที่กึ่งกลางของชิ้นงาน ซึ่งการเสียหายดังกล่าวเรียกว่าการเสียหายแบบ Brittle Fracture mode ในส่วนการตอบสนองของแรงตลอดความเสียหายได้แสดงในรูปแบบของ

กราฟ ดังแสดงรูปที่ 8 ซึ่งเป็นค่าของภาระและระยะยุบตัวที่เกิดขึ้น ผลการคำนวณหาค่าพลังงานดูดซับและค่าพลังงานดูดซับจำเพาะ ได้แสดงไว้ใน ตารางที่ 1

3.1 ลักษณะการเสียหาย



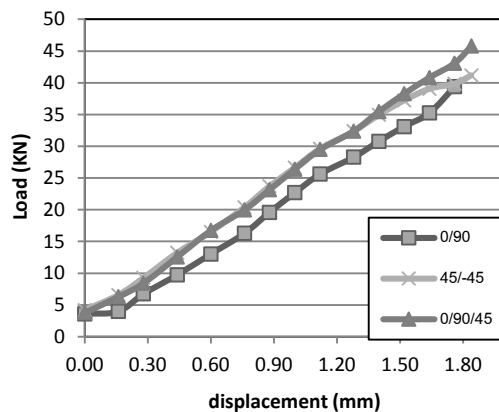
รูปที่ 6 แสดงรูปแบบการเสียหายของชิ้นงาน ภายใต้ภาระกระทำในแนวแกนแบบคงที่



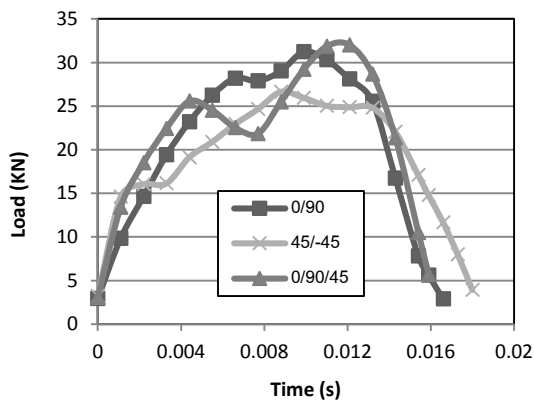
รูปที่ 7 แสดงรูปแบบการเสียหายของชิ้นงานใต้ภาระกระทำแบบไม่คงที่ในแนวแกน

จากรูปที่ 7 เป็นรูปแบบการเสียหายภายใต้ภาระกระทำในแนวแกนของชิ้นงาน ซึ่งเป็นภาพที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยความเร็วสูง โดยหน้าตัดของหัวค้อนถูกกระทบกับหน้าตัดด้านบนของท่อ ซึ่งลักษณะการเสียหายพบว่ามีมุมการไขว้ที่ 45/-45 และ 0/90/45 มีลักษณะการยุบตัวแบบแตกเปราะ หรือเรียกว่าการเสียหายแบบ Brittle Fracture mode โดยยุบตัวลงระหว่างกึ่งกลางของท่อ และ มุมการไขว้ที่ 0/90 มีลักษณะการยุบตัวแบบแตกเป็นชิ้นเล็กตลอดแนวแกนท่อ ซึ่งการเสียหายดังกล่าวเรียกว่าเป็นการเสียหาย

แบบ Crush mode สำหรับการตอบสนองของแรงตลอดการกระแทกแสดงในรูปที่ 9 ซึ่งเป็นค่าของภาระกระทำกับและเวลา ผลการคำนวณหาค่าพลังงานดูดซับและค่าพลังงานดูดซับจำเพาะ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1



รูปที่ 8 กราฟแสดงผลการทดสอบของชิ้นงานภายใต้ภาระกระทำแบบคงที่ในแนวแกน



รูปที่ 9 กราฟแสดงผลการทดสอบของชิ้นงานภายใต้ภาระกระทำแบบไม่คงที่ในแนวแกน

จากรูปที่ 8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงปฏิกิริยากับระยะยุบตัวของชิ้นงาน จากการทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบคงที่ในแนวแกน โดย แกนตั้งเป็นค่าของภาระและแกนนอนเป็นค่าระยะยุบตัวของชิ้นงาน จากการสังเกตว่าค่าภาระของชิ้นงานที่มุมไขว้ 0/90/45 และ 45/-45 มีค่าใกล้เคียงกัน

ตลอดการเสียหาย และส่วนชิ้นงานที่มุมไขว้ 0/90 มีค่าภาระต่ำกว่าชิ้นงานอื่นๆ

รูปที่ 9 กราฟแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างภาระกับเวลา ของแต่ละชิ้นงานตลอดการทดสอบ จากการทดสอบภายใต้ภาระกระทำแบบไม่คงที่ในแนวแกน โดยแกนตั้งเป็นค่าของภาระและแกนนอนเป็นเวลาที่กระทำต่อชิ้นงาน จากกราฟพบว่ากรณีการกระแทกแบบไม่คงที่นั้น ลักษณะกราฟมีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ โดยมีคลื่นของกราฟในช่วงบน เนื่องจากการแตกหักของโครงสร้าง นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่า ชิ้นงานที่มีมุมไขว้ 45/-45 มีค่าของภาระค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานอื่นๆ

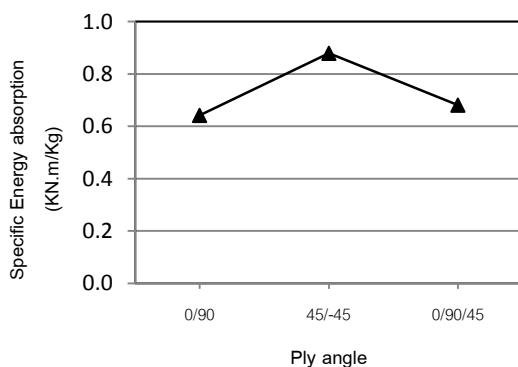
3.2 ความสามารถในการดูดซับพลังงาน

จากการทดสอบของชิ้นงาน ภายใต้ภาระกระทำแบบในแนวแกนแบบคงที่และแบบไม่คงที่ โดยมุมการไขว้ของเส้นใย 3 แบบ จากกราฟ รูปที่ 8 - 9 ดังกล่าว สามารถคำนวณหาค่าภาระเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจากการทดสอบ และสามารถคำนวณหาค่าพลังงานดูดซับและพลังงานดูดซับจำเพาะของชิ้นงานดังตารางที่ 1

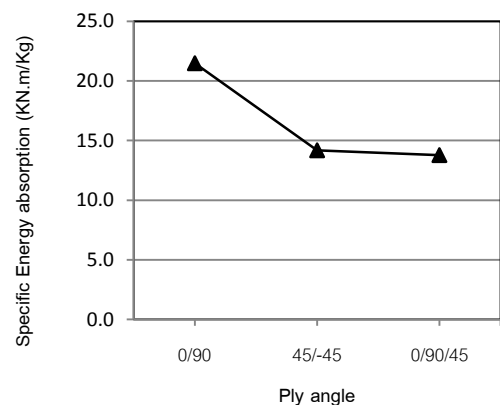
ตารางที่ 1 ผลการคำนวณที่ได้จากการทดสอบ

มุมไขว้เส้นใย (องศา)	ภาระเฉลี่ย (kN)	ระยะยุบตัว (mm)	E_u (kN.m)	น้ำหนัก (kg)	E_u (kN.m/kg)
Quasi-Static Load					
0/90	22.35	1.80	0.04	0.06	0.64
45/-45	24.80	1.96	0.05	0.06	0.87
0/90/45	24.56	2.00	0.05	0.07	0.68
Dynamic Load					
0/90	21.25	56.61	1.20	0.06	21.46
45/-45	19.52	46.73	0.91	0.06	14.16
0/90/45	22.65	43.13	0.98	0.07	13.76

จากตารางที่ 1 แสดงผลการทดสอบของชิ้นงาน ภายใต้ภาระกระทำแบบคงที่และไม่คงที่ โดยมีมุมการไขว้ของเส้นใย 3 แบบคือ 0/90, 45/-45 และ 0/90/45 ตามลำดับ พิจารณาจากการทดสอบภายใต้ภาระกระทำแบบคงที่ พบว่าค่าพลังงานดูดซับจากชิ้นงาน มุมไขว้ที่ 45/-45 และ สามารถดูดซับพลังงานจากการกระทำแบบคงที่ได้ดีกว่า มุมไขว้ที่ 0/90/45 และ 0/90 ตามลำดับ ผลจากการคำนวณค่าพลังงานดูดซับจำเพาะ มุมไขว้ที่ 45/-45 สามารถดูดซับพลังงานจำเพาะคือ 878.46 N.m/Kg ได้ดีกว่ามุมไขว้แบบอื่นๆ พิจารณาจากการทดสอบภายใต้ภาระกระทำแบบไม่คงที่ พบว่าค่าพลังงานดูดซับ ที่มุมไขว้ที่ 0/90 สามารถดูดซับพลังงานได้มากกว่ามุมไขว้ 0/90/45 และ 45/-45 ตามลำดับ แต่ผลจากการคำนวณค่าพลังงานดูดซับจำเพาะ มุมไขว้ที่ 0/90 สามารถดูดซับพลังงานจำเพาะได้มากกว่ามุมไขว้ 45/-45 และ 0/90/45 ตามลำดับ



รูปที่ 10 แสดงกราฟค่าความสามารถดูดซับพลังงานจำเพาะภายใต้ภาระกระทำแบบคงที่



รูปที่ 11 แสดงกราฟค่าความสามารถดูดซับพลังงานจำเพาะภายใต้ภาระกระทำแบบไม่คงที่

จากรูปที่ 10 - 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถดูดซับพลังงานจำเพาะและลักษณะของมุมไขว้ พิจารณาภายใต้ภาระกระทำแบบคงที่พบว่ามุมไขว้ที่ 45/-45 สามารถดูดซับพลังงานจำเพาะมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับมุมไขว้ที่ 0/90/45 และ 0/90 มากกว่าประมาณ 29.03% และ 36.80% ตามลำดับ พิจารณาภายใต้ภาระกระทำแบบไม่คงที่พบว่ามุมไขว้ที่ 0/90 สามารถดูดซับพลังงานจำเพาะได้มากที่สุดและเมื่อเปรียบเทียบกับ มุมไขว้ที่ 45/-45 และ 0/90/45 ที่มีค่ามากกว่าประมาณ 51.49% และ 55.89% ตามลำดับ

4. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของท่อไฟเบอร์กลาส ภายใต้แรงกระทำในแนวแกนแบบคงที่และไม่คงที่ ที่มีลักษณะของมุมไขว้ต่างกัน 3 แบบ จากการทดสอบชิ้นงานสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ในกรณีลักษณะการเสียหายของท่อไฟเบอร์กลาส ภายใต้ภาระกระทำแบบคงที่ ลักษณะการเสียหายของชิ้นงานทั้งหมด เสียหายแบบแตกเปราะ ซึ่งการเสียหายดังกล่าวเรียกว่าเป็นการเสียหายแบบ brittle fracture mode ส่วนภายใต้ภาระกระทำแบบไม่คงที่ พบว่าลักษณะการเสียหายของชิ้นงาน มีการเสียหายอยู่ 2 ลักษณะ คือ แตกแบบเปราะ และ แตกเป็นชิ้น

เล็กตลอดแนวแกน การเสียหายดังกล่าวเรียกว่าเป็น การเสียหายแบบ Brittle Fracture mode และ Crush mode ตามลำดับ

2. ความสามารถในการดูดซับพลังงาน จำเพาะพบว่าภายใต้ภาระกระทำแบบคงที่ ลักษณะมุม ไชว์ที่ 45/-45 สามารถดูดซับพลังงานจำเพาะได้ มากกว่าลักษณะมุมไชว์แบบอื่นๆ ในส่วนภายใต้ภาระ กระทำแบบไม่คงที่ พบว่าลักษณะของมุมไชว์ที่ 0/90 สามารถดูดซับพลังงานจำเพาะได้มากกว่าลักษณะมุม ไชว์แบบอื่นๆ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัย แห่งชาติ (วช.) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยนี้ และ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้การสนับสนุน เครื่องมือในการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] M. Abdel-Haq, G.B. Broggiato, G.M. Newaz.,(1999) "Constraint Effects on Energy Absorption in Unidirectional PMC Tubes," Journal of Composite Materials, Vol. 33 pp.774-793.

[2] George C.Jacob, John F. Fellers, Srdan Simunovic, J.Michael Starbuck.,(2001) "Energy absorption in polymer composites for automotive crashworthiness," Journal of Composite Material, Vol. 36 pp.813-850.

[3] Hamidreza Zarei, Matthias Kroger, Henrik Albertsen., (2008), "An experimental and numerical crashworthiness investigation of thermoplastic composite crash boxes," Composite Structures, Vol. 85 pp. 245-257.

[4] Jose Daniel D. Melo, Andre Luiz s. Silva, John Edward N. Villena., (2008), "The effect of processing conditions on the energy absorption capability of composite tubes," Composite Structures, Vol.82, pp. 622-628.

[5] A.G. Mamalis, D.E. Manolakos, G.A. Demosthenous and M.B. Ioannidis., (1997), "The static and dynamic axial crumbling of thin-walled fiberglass composite square tubes," Composite Part B, Vol.28B, pp. 439-451.

[6] A.G. Mamalis, D.E. Manolakos, G.A. Demosthenous and M.B. Ioannidis., (1996), "The static and dynamic axial collapse of fiberglass composite automotive frame rails," Composite Structures, Vol. 34, pp. 77-90.

[7] A.G. Mamalis, D.E. Manolakos, G.A. Demosthenous and M.B. Ioannidis., (1996), "Analysis of Failure mechanisms Observed in Axial Collapse of Thin-Walled Circular Fiberglass Composite Tubes," Composite Structures, Vol. 24, pp. 335-352.

[8] A.G. Mamalis, D.E. Manolakos, G.A. Demosthenous and M.B. Ioannidis., (1997), "Analytical modeling of the static and dynamic axial collapse of thin-walled fiberglass composite conical shells," Composite Structures, Vol. 19, pp. 477-492.

[9] Young Nam Kim, Jae Jung Hwang, Kyung Yun Baek., (2003), "Impact Collapse Characteristics of CF/Epoxy Composite Tubes for Light-Weights," KSME International Journal , Vol. 17, pp.48-56.

[10] M. M. Shokrieh, H. Tozandehjani, and M. J. Omid., (2009), "Effect of fiber orientation and cross section of composite tubes on their energy absorption ability axial dynamic loading," Mechanics of Composite Materials, Vol. 45 pp. 567-576

การศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของท่อไฟเบอร์กลาสภายใต้แรงกระแทกในแนวแกน

The Study of Crashworthiness Behavior of Fiberglass Tube Subjected to Axial Impact Load

วิศิษฐ์ จันทร์ชน^{1*}, ขวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์¹ และ สมญา ภูณะยา¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

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

บทคัดย่อ

วัสดุประกอบเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่ถูกใช้เป็นโครงสร้างทดแทนวัสดุโลหะกันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากคุณสมบัติด้านการดูดซับพลังงานของวัสดุประกอบนั้น สามารถปรับปรุงและเพิ่มความแข็งแรงได้และสามารถลดแรงกระแทกจากการชนได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับมวลของโครงสร้าง งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของท่อไฟเบอร์กลาสภายใต้แรงกระแทกในแนวแกน ชิ้นงานที่ใช้ในการศึกษาเป็นชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยมือ (Hand lay-up) ที่มีการเรียงทับซ้อนและมุมไขว้ที่แตกต่างกัน มุมการไขว้ของเส้นใยมี 3 แบบคือ $[0/90]_3$, $[+45/-45]_3$ และ $[+45/-45]/[0/90]/[+45/-45]$ ตามลำดับ ขึ้นรูปจาก E-glass/polyester ขนาดของท่อมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกคือ 50 mm. ความหนาคือ 2 mm. และความยาวคือ 100 mm. ในการทดสอบชิ้นงานนั้นได้ทำการทดสอบโดยใช้เครื่อง Vertical Impact Testing Machine ตกกระแทกแบบอิสระด้วยความเร็วคงที่จุดสัมผัส 7 m/s ผลการศึกษาพบว่าชิ้นงานที่มีมุมไขว้ $[0/90]_3$ มีค่าพลังงานดูดซับจำเพาะมากที่สุด นอกจากนี้ในบทความยังได้แสดงลักษณะการเสียหายที่เกิดขึ้นอีกด้วย

คำหลัก: วัสดุประกอบ, การกระแทก, การเสียหาย, การดูดซับพลังงาน

Abstract

Composite Material is alternative material that is widely used for vehicle structure. This is due to the properties of energy absorption of composite material that absorb higher energy and can be strengthened. This research is purposed to study crashworthiness behavior of fiberglass tube subjected Impact axial compression. The specimen is made of fiberglass and hand lay-up in different angles in shape of 3 cross angles of fiberglasses, including $[0/90]_3$, $[+45/-45]_3$ and $[+45/-45]/[0/90]/[+45/-45]$. The tube has 50 mm outside diameter, 2 mm wall thickness and 100 mm length. Impact test was done by Vertical Impact Testing Machine with the impact speed was 7 m/s. The result shown that the specimen with $[90/0]_3$ cross angle gives highest specific energy absorption. In addition, the collapse mode and response of specimens to impact are also discussed in the paper.

Keywords: Composite Material, impact, Collapse, Energy absorption

1. บทนำ

วัสดุประกอบถูกนำมาประยุกต์เป็นโครงสร้างส่วนหน้าของรถยนต์ในการป้องกันความเสียหายของโครงสร้างภายใต้การชน และเพื่อเพิ่มความปลอดภัยของผู้โดยสาร [1] โดยใช้ทดแทน โลหะหรืออะลูมิเนียม มีลักษณะการเสียหาย แบบพับ และ แบบงอ ซึ่งพลังงานที่กระจายจะถูกรวมทั้งหมดมาจุดเดียวในแนวแคบๆ ในขณะที่วัสดุประกอบมีลักษณะการเสียหายตลอดแนวแกนท่อในลักษณะคงที่ซึ่งส่งผลให้เกิดการกระจายตัวของแรงได้มากกว่า นอกจากนี้เนื่องจากมีวัสดุประกอบน้ำหนักเบา มีความแข็งแรง และมีความคงทน วัสดุประกอบเป็นอีกทางเลือกเพื่อทดแทนวัสดุเดิม จึงได้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุประกอบโดย[2] ได้ทำการศึกษา การดูดซับพลังงานของท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมที่ทำจากเหล็กภายใต้การกระแทก โดยมีการเพิ่มความแข็งแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน ชิ้นงานทดสอบมี 3 กลุ่มคือ steel , steel – CFRP และ CFRP ทำการทดสอบภายใต้การกระแทกในแนวแกนโดยการปล่อยมวล 574 kg จากความสูง 1.835 m และที่ความเร็วของมวลกระทบ 6 m/s (พลังงานกระทบ 10.3 kJ) ผลของการศึกษาพบว่า ชิ้นงานทดสอบกลุ่ม steel-CFRP มีค่าการดูดซับพลังงานจำเพาะสูงกว่ากลุ่ม steel อยู่ 35% และมากกว่ากลุ่ม CFRP อยู่ 75% [3] ได้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับพลังงานจากการชนของท่อทรงกระบอก FRP โดยสนใจศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการดูดซับพลังงานของท่อ FRP ที่จำนวนชั้นของไฟเบอร์ เป็น 4 และ 6 ชั้น ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงชั้นของไฟเบอร์ที่แตกต่างกันไปชิ้นงานที่ใช้ทดสอบทำจาก Woven roving (WRM) ความหนาแน่นคือ 610 g/m^2 และ Unidirectional (UD) ความหนาแน่นคือ 750 g/m^2 ส่วนเรซินใช้เรซิน โพลีเอสเตอร์ชนิดไอโซพาทาลิก เป็นส่วนประกอบในการขึ้นรูปชิ้นงาน กระบวนการ hand lay-up สลับชั้นกันระหว่าง $[\text{WRM}/(\text{UD})_n/\text{WRM}]$ ตามที่กำหนดไว้คือ 4 และ 6 ชั้น ขนาดอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลาง

ภายในกับความหนา (D/t) ประมาณ 15 และ 25 ตามลำดับ ที่ปลายท่อกลึงขอบทำมุม 30° ใช้โหลด quasi-static ความเร็วคือ 2 mm/min ผลการศึกษาพบว่า จำนวนชั้นที่เพิ่มขึ้นของ FRP มีผลทำให้แนวโน้มการดูดซับพลังงานของ FRP สูงขึ้น

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรม การตอบสนองของท่อไฟเบอร์กลาสภายใต้แรงกระแทกในแนวแกน ท่อชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบเป็นท่อรูปทรงกระบอก โดยศึกษาอิทธิพลของเส้นใยแก้ว ลักษณะวิธีการเสียหาย และความสามารถในการดูดซับพลังงานจำเพาะ

2. ชิ้นงานทดสอบและวิธีการทดลอง

2.1 ชิ้นงานทดสอบ

ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองโดยขึ้นรูปจากเส้นใยแก้วชนิดสองทิศทางกับโพลีเอสเตอร์ชนิดไอโซพาทาลิกเป็นชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยมือ (Hand lay-up) ที่มีการเรียงทับซ้อนและมุมไขว้ที่แตกต่างกัน จากตารางที่ 1 ท่อมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกคือ 50 mm. ความหนาคือ 2 mm. และความยาวคือ 100 mm ดังแสดงในรูปที่ 2

การขึ้นรูปด้วยการทาเรซินลงบนเส้นใยแก้ว เริ่มต้นจากการผสมเรซินและตัวทำให้แข็งลงในแก้วพลาสติก แล้วกวานเรซินในทิศทางเดียวประมาณ 2 ถึง 3 นาที จากนั้นทาเรซินลงใยแก้วจนครบจำนวนชั้นของใยแก้ว ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ใยแก้วทั้งหมด 6 ชั้น จากนั้นใช้ลูกกลิ้งโลหะเกลียว กลิ้งบนชิ้นงานเพื่อไล่อากาศออก



รูปที่ 1 ลักษณะของการหมนแม่แบบชิ้นงาน

หลังจากผ่านการทาสีและรีดอากาศออกด้วยลูกกลิ้งแล้ว เครื่องหมุนแม่แบบหมุนด้วยความเร็วที่ 34 rpm ใช้เวลาในการหมุนประมาณ 180 นาที ดังรูปที่ 1 เพื่อให้เรซินเซ็ทตัวและมีความแข็งแรงพอที่จะถอดแบบออกได้ง่าย



รูปที่ 2 แสดงถึงชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูป

2.2 วิธีการทดลอง

การทดสอบได้ดำเนินการโดยใช้เครื่อง Vertical Impact Testing Machine ซึ่งเป็นเครื่องทดสอบที่ใช้ระบบคอมพิวเตอร์กับแรงกระแทกของค้อนจากเครื่องทดสอบ โดยความสูงของเครื่องทดสอบคือ 2.5 m น้ำหนักของมวลที่ใส่ลงในค้อนสามารถใส่ได้ ระหว่าง 20-60 kg ในส่วนด้านการประมวลผลเครื่องจะมี โหมดเซลล์ที่มีความละเอียดในการบันทึกข้อมูล สูงสุดที่ 10,000 ค่าต่อวินาที เมื่อทดสอบโหมดเซลล์จะแปลงค่าของแรงไปเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่ส่งไปยัง Data logger เพื่อทำการบันทึกข้อมูล จากนั้นผลที่ได้จะเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อแปลงค่า โดยผลที่ได้จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง แรงกระแทก (Load) และเวลา (Time) ซึ่งสามารถบันทึกผลการทดลอง จากความสัมพันธ์นี้สามารถเขียนกราฟได้ รูปที่ 3 แสดงลักษณะของเครื่องทดสอบแรงกระแทก

ในการทดสอบภายใต้ภาระกระแทกในแนวแกนโดยใช้ความเร็วในกระแทกคือ 7 m/s และน้ำหนักของหัวค้อนคือ 45 kg ความสูงของหัวค้อนที่ตกลงมากระแทกกับชิ้นงานคือ 2.5 m ทำการบันทึกภาพด้วยกล้องความเร็วสูงและบันทึกแรงเพื่อนำไปวิเคราะห์ผลต่อไป ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ในทุกกรณี โดยพบว่าค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล ระหว่าง 0.289 ถึง 0.317

2.3 ตัวแปรที่พิจารณา

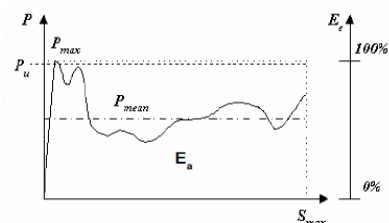
ในการศึกษาทางด้านการเสียหายของโครงสร้างภายใต้การชน (Crashworthiness) มักจะศึกษากราฟภาระและระยะยุบตัวของโครงสร้างดังตัวอย่างกราฟในรูปที่ 3 โดยมีตัวแปรที่สำคัญหลายตัว เช่น ภาระเฉลี่ย (Mean crushing load, P_{mean}) หมายถึง ภาระเฉลี่ยตลอดการเสียรูปของโครงสร้างภายใต้การกระแทกจนสิ้นสุดการยุบตัวค่าพลังงานดูดซับ (Energy absorption, E_s) หมายถึงพลังงานที่โครงสร้างสามารถดูดซับได้ตลอดช่วงเวลาการกระแทกหรือการยุบตัว และพลังงานดูดซับจำเพาะ (Specific energy absorption, E_s) หมายถึงพลังงานที่โครงสร้างสามารถดูดซับได้ เมื่อเทียบกับขนาดน้ำหนักของตัวโครงสร้างเอง โดยในบทความนี้ได้มุ่งเน้นศึกษาค่าพลังงานที่ดูดซับได้และพลังงานดูดซับจำเพาะของชิ้นงานทดสอบ ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญในการบ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานจากการชนของโครงสร้าง โดยการหาค่าพลังงานดูดซับนั้นสามารถหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟของภาระและระยะยุบตัวของโครงสร้าง เมื่อเกิดการชนซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการดังสมการที่ (1)

$$E_s = \int P dS \quad (1)$$

โดยที่ E_s คือค่าพลังงานดูดซับ P คือค่าภาระ S คือค่าระยะการยุบตัว และสามารถหาค่าพลังงานดูดซับจำเพาะได้จากสมการที่ (2)

$$E_s = \frac{\int P dS}{\text{mass}} \approx \frac{P_{mean} S}{\text{mass}} \quad (2)$$

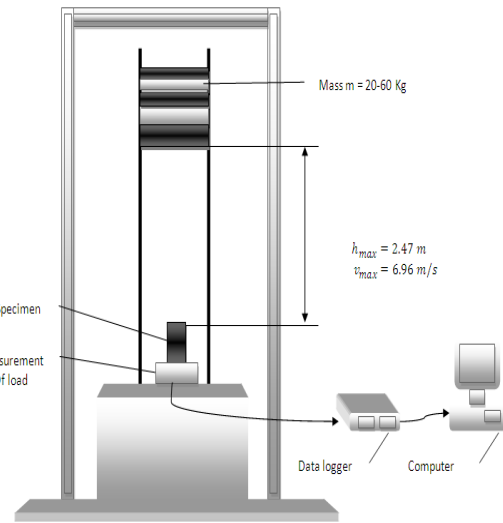
โดยที่ E_s คือค่าพลังงานดูดซับ P_{mean} คือค่าภาระเฉลี่ย S คือค่าระยะการยุบตัว และ mass คือมวลของโครงสร้าง



รูปที่ 3 กราฟแสดงภาระและระยะยุบตัวของโครงสร้างพร้อมกับแสดงตัวแปรต่างๆที่นิยมใช้ในการศึกษา



(ก)



(ข)

รูปที่ 4 เครื่องทดสอบการกระแทก (ก) เครื่องทดสอบจริง (ข) โปรแกรมของเครื่องทดสอบ

ตารางที่ 1 ขนาดและมุมไขว้เส้นใยของชิ้นงานทดสอบ

ลำดับ	เส้นผ่านศูนย์กลาง mm	ความยาว mm	หนา mm	มุมไขว้เส้นใย (องศา)
1.	50	100	2	$[0/90]_3$
2.	50	100	2	$[+45/-45]_3$
3.	50	100	2	$[+45/-45]/[0/90]/[+45/-45]$

3. ผลการศึกษา

ผลของการศึกษาแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรม การตอบสนองของท่อไฟเบอร์กลาส ได้แก่ ลักษณะ การเสียหาย และ ความสามารถในการดูดซับพลังงาน ดังนี้

3.1 ลักษณะการเสียหาย

รูปที่ 8 เป็นรูปแบบการเสียหายภายใต้ภาระ การชนในแนวแกนของชิ้นงาน ซึ่งเป็นภาพที่ได้จากการถ่ายด้วยกล้องความเร็วสูง โดยหน้าตัดของหัวค้อน ถูกกระแทกกับหน้าตัดด้านบนของท่อ ซึ่งลักษณะการเสียหายพบว่ามุมการไขว้ที่ $[+45/-45]_3$ รูปที่ 5 มี ลักษณะการเสียหายแบบแตกเปราะ โดยเริ่มจาก

ด้านบนของชิ้นงานและตามแนวของเส้นใยหรือ เรียกว่าการเสียหายแบบ Brittle mode มุมไขว้ที่ $[0/90]_3$ ดังรูปที่ 6 มีลักษณะการยุบตัวจากด้านบนของ ชิ้นงาน ซึ่งมีลักษณะบานออกและแยกออกเป็น 8 ถึง 9 แฉก โดยเรียกลักษณะการเสียหายแบบนี้ว่า Spay mode ในส่วนของมุมไขว้ $[+45/-45]/[0/90]/[+45/-45]$ ดังรูปที่ 7 ซึ่งลักษณะเสียหายเริ่มจากด้านบนของ ชิ้นงานแตกและบานออกเป็นชิ้นเล็กตลอดแนวแกน ท่อ ซึ่งลักษณะการเสียหายเรียกว่า Crush mode สำหรับการตอบสนองของแรงตลอดการกระแทก แสดงใน ดังรูปที่ 9 ซึ่งเป็นค่าของภาระกระทำกับและ เวลา ผลการคำนวณหาค่าพลังงานดูดซับและค่า พลังงานดูดซับจำเพาะ ได้แสดงไว้ใน ตารางที่ 2

จากรูปที่ 9 กราฟแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างภาระกับเวลา ของแต่ละชิ้นงานตลอดการทดสอบ จากการทดสอบภายใต้ภาระกระแทกในแนวแกน โดยแกนตั้งเป็นค่าของภาระและแกนนอนเป็นเวลาที่ทำต่อชิ้นงาน จากกราฟพบว่ากรณีการกระแทกในแนวแกนนั้น ลักษณะกราฟมีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ โดยมีคลื่นของกราฟในช่วงบน เนื่องจากการแตกหักของโครงสร้าง นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าชิ้นงานที่มีมุมไขว้ $[+45/-45]_3$ มีค่าของภาระค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานอื่นๆ

3.2 ความสามารถในการดูดซับพลังงาน

จากการทดสอบของชิ้นงาน ภายใต้แรงกระแทกในแนวแกน โดยมีมุมการไขว้ของเส้นใย 3 แบบ จากกราฟ รูปที่ 9 ดังกล่าว สามารถคำนวณหาค่าภาระ

เฉลี่ยที่เกิดขึ้น จากการทดสอบ และสามารถคำนวณหาค่าพลังงานดูดซับและพลังงานดูดซับจำเพาะของชิ้นงานดังตารางที่ 2

จากตารางที่ 2 แสดงผลการทดสอบของชิ้นงาน ภายใต้แรงกระแทกในแนวแกน โดยมีมุมการไขว้ของเส้นใย 3 แบบคือ $[0/90]_3$, $[+45/-45]_3$ และ $[+45/-45]/[0/90]/[+45/-45]$ ตามลำดับ จากการทดสอบภายใต้แรงกระแทกในแนวแกน พบว่าค่าพลังงานดูดซับ ที่มีมุมไขว้ที่ $[+45/-45]/[0/90]/[+45/-45]$ สามารถดูดซับพลังงานได้มากกว่ามุมไขว้ $[0/90]_3$ และ $[+45/-45]_3$ ตามลำดับ แต่ผลจากการคำนวณค่าพลังงานดูดซับจำเพาะ มุมไขว้ที่ $[0/90]_3$ สามารถดูดซับพลังงานจำเพาะได้มากกว่ามุมไขว้ $[+45/-45]_3$ และ $[+45/-45]/[0/90]/[+45/-45]$ ตามลำดับ



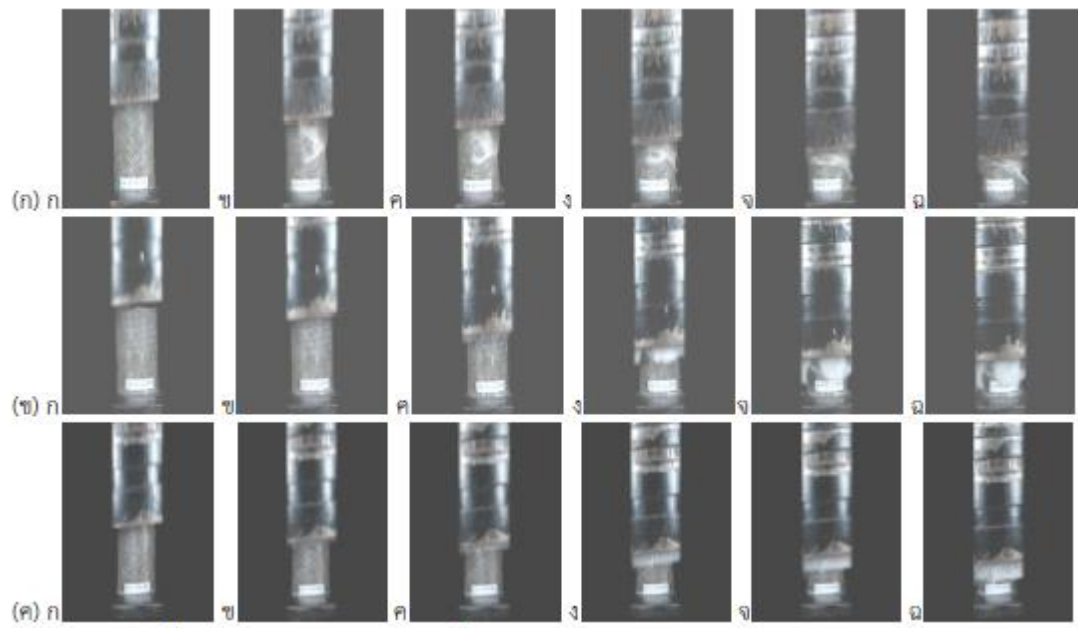
รูปที่ 5 การเสียหายสุดท้ายของโครงสร้างที่เสียหายของชิ้นงาน $[+45/-45]_3$



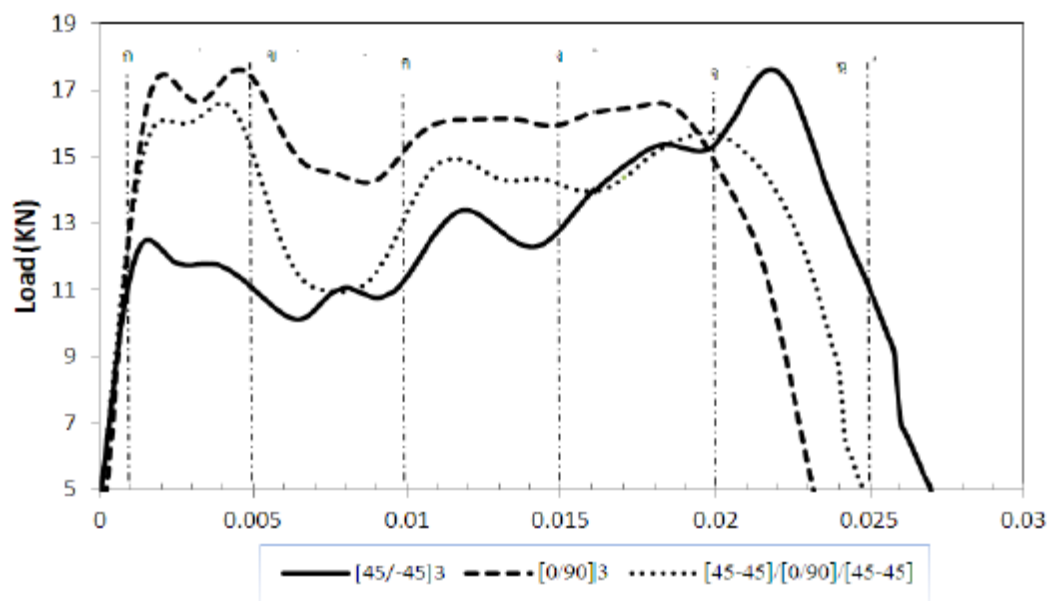
รูปที่ 6 การเสียหายสุดท้ายของโครงสร้างที่เสียหายของชิ้นงาน $[0/90]_3$



รูปที่ 7 การเสียหายสุดท้ายของโครงสร้างที่เสียหายของชิ้นงาน $[+45/-45]/[0/90]/[+45/-45]$



รูปที่ 8 ขั้นตอนกระบวนการเสียหายของชิ้นงาน (ก) [+45/-45]₃ (ข) [0/90]₃ (ค) [+45/-45]/[0/90]/[+45/-45]



รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาระ-เวลา ของชิ้นงานภายใต้แรงกระทำ

ตารางที่ 2 ผลการคำนวณที่ได้จากการทดสอบ

มุมการไขว้ (องศา)	ภาระเฉลี่ย (kN)	ระยะยุบตัว (m)	พลังงานดูดซับ (kN.m)	น้ำหนัก (g)	พลังงานจำเพาะ (kN.m/kg)
[0/90] ₃	14.40	0.06	0.85	49.46	17.28
[45/-45] ₃	12.47	0.04	0.55	52.78	10.45
[45/-45]/[0/90]/[45/-45]	13.49	0.07	0.88	52.93	16.64

4. สรุป

จากการศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของท่อไฟเบอร์กลาสภายใต้แรงกระแทกใน โดยศึกษาอิทธิพลของการเรียงทับซ้อนและมุมไขว้ที่แตกต่างกัน คือ [0/90]₃, [+45/-45]₃ และ [+45/-45]/[0/90]/[+45/-45] ตามลำดับ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. พบว่าค่าพลังงานดูดซับ ที่มุมไขว้ที่ [+45/-45]/[0/90]/[+45/-45] สามารถดูดซับพลังงานได้มากกว่ามุมไขว้ [0/90]₃ และ [+45/-45]₃ คือ 3.40 เปอร์เซ็นต์ และ 37.50 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในส่วนผลจากการคำนวณค่าพลังงานดูดซับจำเพาะ มุมไขว้ที่ [0/90]₃ สามารถดูดซับพลังงานจำเพาะได้มากกว่ามุมไขว้ [+45/-45]₃ และ [+45/-45]/[0/90]/[+45/-45] คือ 39.52 เปอร์เซ็นต์ และ 3.73 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

2. พบว่าลักษณะการเสียหายพบว่ามีมุมการไขว้ที่ [+45/-45]₃ มีลักษณะการเสียหายแบบแตกเปราะหรือเรียกว่าการเสียหายแบบ Brittle mode มุมไขว้ที่ [0/90]₃ ซึ่งมีลักษณะบานออกแยกออกเป็น 8 ถึง 9 แฉก โดยเรียกลักษณะการเสียหายแบบนี้ว่า Spay mode ในส่วนของมุมไขว้ [+45/-45]/[0/90]/[+45/-45] ซึ่งลักษณะการเสียหายเรียกว่า Crush mode

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยนี้ และ ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือในการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] George C.Jacob, John F. Fellers, Srdan Simunovic, J.Michael Starbuck.,(2001) "Energy absorption in polymer composites for automotive crashworthiness," Journal of Composite Material, Vol. 36 pp.813-850
- [2] M.R. Bambach, M. Elchalakani, X.L. Zhao., Composite steel-CFRP SHS tubes under axial impact., Composite Structures, Volume 87, Issue 3, February 2009, Pages 282-292
- [3] S. Solaimurugan, R. Velmurugan. Influence of fiber orientation and stacking sequence on petal ling of glass/polyester composite cylindrical shells under axial compression. International Journal of Solids and Structures 44 (2007) 6999–7020



การศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของท่อไฟเบอร์กลาสภายใต้แรงกดในแนวแกน

The Study of Crashworthiness Behavior of Fiberglass Tube Subjected Axial Load

วิศิษฐ์ จันทรชื่น, ชาวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์*, สมญา ปูนายา และ รัชดา โสภาคะยัง

Visit Junchuan, Chawalit Thinvongpituk*, Somya Poonaya and Ratchada Sopakayang

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี 34190

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubonratchathani University, Ubonratchathani, 34190, Thailand.

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับพลังงานจำเพาะของท่อไฟเบอร์กลาส ภายใต้แรงกระทำในแนวแกน ชิ้นงานที่ใช้ในการศึกษาเป็นชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยมือ (Hand lay-up) ที่มีการเรียงทับซ้อนและมุมไขว้ที่แตกต่างกัน 3 ชิ้นงานคือ ชิ้นงาน A มีมุมไขว้ [(0/90)/(0/90)/(0/90)] ชิ้นงาน B มีมุมไขว้ [(45/-45)/(45/-45)/(45/-45)] และ ชิ้นงาน C มีมุมไขว้ [(45/-45)/(0/90)/(45/-45)] ตามลำดับ ขึ้นรูปจาก E-glass/polyester ขนาดของท่อมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกคือ 50 mm. ความหนาคือ 2 mm. และความยาวคือ 100 mm. ในการทดสอบชิ้นงานนั้นได้ทำการทดสอบโดยใช้เครื่อง ESH Universal Testing Machine สำหรับการทดสอบแบบกึ่งคงที่ กดที่ความเร็ว 10 mm/min และใช้เครื่อง Vertical Impact Testing Machine ในการทดสอบแบบกระแทกด้วยความเร็วกระแทก 7 m/s ผลการศึกษาพบว่าชิ้นงาน A มีค่าพลังงานดูดซับจำเพาะมากที่สุด ซึ่งเป็นผลจากการเรียงเส้นใยในแนวตั้ง นอกจากนี้ในบทความยังได้แสดงลักษณะการเสียหายที่เกิดขึ้นอีกด้วย

คำสำคัญ : วัสดุประกอบ การยุบตัว พลังงานดูดซับ พลังงานดูดซับจำเพาะ

Abstract

This research is purposed to study crashworthiness behavior of fiberglass tube subjected axial compression. The specimens are made of fiberglass and hand lay-up in different ply angles which are; specimen A ply angle is [(0/90)/(0/90)/(0/90)] specimen B ply angle is [(45/-45)/(45/-45)/(45/-45)] and specimen C ply angle is [(45/-45)/(0/90)/(45/-45)]. The tube has 50 mm outside diameter, 2 mm wall thickness and 100 mm length. Quasi-static test is done by ESH Universal Testing Machine with 10 mm/min of crushing speed. Impact test is done by Vertical Impact Testing Machine with the impact speed of 7 m/s. The result showed that specimen A gives highest specific energy absorption due to the vertical fiber orientation. In addition, the collapse mode and response of specimens to impact are also discussed in the paper.

* Corresponding author. Tel. : (045)353383; fax: (045)353309
Email address: chawalit@rocketmail.com

Keywords : Composite, Collapse, Energy absorption, specific energy absorption

1. บทนำ

ปัจจุบันการพัฒนาวัสดุได้เป็นไปอย่างต่อเนื่องซึ่งวัสดุประกอบเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายทั้งในอุตสาหกรรมการบิน อวกาศ และรถยนต์ เนื่องจากคุณสมบัติทางกลของวัสดุประกอบมีค่าอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง (high strength weight ratio) สามารถปรับความแข็งแรงตามทิศทางที่รับภาระได้ จึงทำให้วัสดุประกอบถูกนำมาประยุกต์เป็นโครงสร้างร่วมส่วนหน้าของรถยนต์ ในการป้องกันความเสียหายของโครงสร้างห้องผู้โดยสารภายใต้การชน ซึ่งบริเวณดังกล่าวเป็นบริเวณที่สร้างอันตรายแก่ผู้โดยสารรถยนต์จากการกระแทกที่อาจเกิดขึ้น ซึ่งพลังงานที่เกิดจากการชนจะทำให้โครงสร้างเกิดการยุบตัว และพลังงานจะถูกถ่ายเทมายังห้องผู้โดยสารตามโครงสร้างที่ยุบตัวเข้ามา กระแทก สร้างอันตรายต่อผู้โดยสารมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับพลังงานที่เหลืออยู่ จึงได้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุประกอบโดย S. Solaimurugan และคณะ [1] ได้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับพลังงานจากการชนของท่อทรงกระบอกพลาสติกเสริมแรงด้วยใยแก้ว โดยใช้จำนวนชั้นของไฟเบอร์คือ 4 และ 6 ชั้น ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงชั้นของไฟเบอร์ที่แตกต่างกันไป ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบทำจาก Woven roving (WRM) ความหนาแน่น 610 g/m^2 และ Unidirectional (UD) ความหนาแน่น 750 g/m^2 ส่วนเรซิน ใช้เรซิน ชนิด ไอโซพทาไลเกรซิน เป็นส่วนประกอบ ในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการ hand lay-up สลับชั้นกันระหว่าง [WRM/(UD)_m/WRM] ตามที่กำหนดไว้คือ 4 และ 6 ชั้น ขนาดอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางภายในกับความหนา (D/t) ประมาณ 15 และ 25 ตามลำดับ ที่ปลายท่อกลึงขอบทำมุม 30 องศา ทดสอบภายใต้

โหลดแบบกึ่งคงที่ ความเร็วคือ 2 mm/min ผลการศึกษาพบว่าจำนวนชั้นที่เพิ่มขึ้นของพลาสติกเสริมแรงด้วยใยแก้ว มีผลทำให้แนวโน้มการดูดซับพลังงานของพลาสติกเสริมแรงด้วยใยแก้วมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ได้มีการศึกษาทดลองพฤติกรรมการเสียหายของโครงสร้างรถยนต์ภายใต้แรงกระทำแบบคงที่และไม่คงที่ โครงสร้างหน้าตัด รูปทรงนาฬิกาทราย รูปทรงกระบอก รูปทรงกรวยและรูปทรงสี่เหลี่ยม โดยขึ้นรูปจาก Fiber/vinylester โดยได้ศึกษารูปแบบการเสียหายจากการสังเกต และใช้เครื่องขยายสเกล เพื่อหาคุณลักษณะการดูดซับพลังงาน เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับพลังงานระหว่างการทดลองกับทฤษฎี [2-5] M. M. Shokrieh และคณะ [6] พบว่าหน้าตัดทรงกระบอกสามารถดูดซับพลังงานได้มากกว่าหน้าตัดสี่เหลี่ยม Jose Daniel D. Melo และคณะ [7] ได้ทำการศึกษาในการดูดซับพลังงานของ glass/polyester พบว่าชิ้นงานทรงกระบอก ขึ้นรูปด้วยสูญญากาศ มีค่าดูดซับพลังงานจำเพาะสูงขึ้น มากกว่าการขึ้นรูปไม่มีสูญญากาศถึงสองเท่า M. Golzar และคณะ [8] ศึกษาการสร้างต้นแบบชิ้นส่วนวัสดุประกอบเพื่อประกบกับด้านข้างโครงสร้างรถยนต์ โดยศึกษาการสร้างวัสดุประกอบเพื่อประกบโครงสร้างเพื่อใช้แทนที่เหล็ก บริเวณด้านข้างของโครงสร้างรถยนต์ แผ่นวัสดุประกบได้มีการสร้างเรียงทับซ้อนกันของเส้นใยดังนี้ [0/90] และ [+/-45] เป็นมุมไขว้ของใยแก้ว การศึกษานี้ยังใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการสร้างแบบจำลองแผ่นเปลือก ผลจากแบบจำลองพบว่าแผ่นวัสดุประกอบเส้นใยแก้วเรียงทับซ้อนกันที่ [0/90] สามารถดูดซับพลังงานดีกว่า [+/-45] และเมื่อได้เปรียบเทียบกับน้ำหนักกับวัสดุเดิมพบว่าวัสดุประกอบมีน้ำหนักเบากว่าถึง 42% ในการรับแรงในแนวแกนเท่านั้น Young Nam Kim และคณะ [9] ได้

ศึกษาคุณลักษณะการยุบตัวของท่อวัสดุประกอบได้พิจารณา ผลกระทบของโครงสร้างที่อัตราส่วนความหนาต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง การเสริมแรงด้วยเส้นใย และรูปแบบการเสียหายทางกลของวัสดุประกอบ

สำหรับการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์โดยมุ่งศึกษาอิทธิพลของเส้นใยแก้วและความสามารถในการดูดซับพลังงาน ภายใต้แรงกระทำแบบกึ่งคงที่และกระแทกในแนวแกน สำหรับชิ้นงานที่ใช้ในการศึกษานี้ถูกขึ้นรูปด้วยมือ (Hand lay-up) โดยมีลักษณะมุมไขว้ที่แตกต่างกัน โดยการศึกษาแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของเส้นใยแก้วต่อความสามารถในการดูดซับพลังงานจำเพาะ และลักษณะการเสียหาย

2. ตัวแปรที่พิจารณา

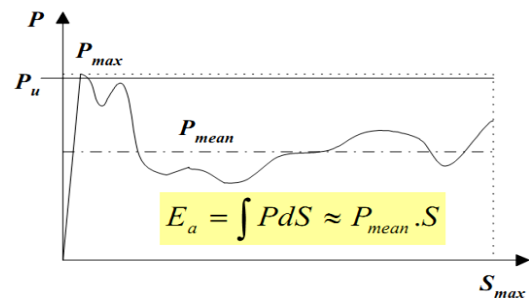
ในการศึกษาทางด้านการเสียหายของโครงสร้างภายใต้การชน (Crashworthiness) มักศึกษาจากกราฟภาระและระยะยุบตัวของโครงสร้าง ดังตัวอย่างกราฟใน รูปที่ 1 โดยมีตัวแปรที่สำคัญหลายตัว เช่น ภาระเฉลี่ย (Mean crushing load, P_{mean}) หมายถึง ภาระเฉลี่ยตลอดการเสียรูปของโครงสร้างภายใต้การกระแทกจนสิ้นสุดการยุบตัว ค่าพลังงานดูดซับ (Energy absorption, E_a) หมายถึงพลังงานที่โครงสร้างสามารถดูดซับได้ตลอดช่วงเวลาการกระแทกหรือการยุบตัว และพลังงานดูดซับจำเพาะ (Specific energy absorption, E_s) หมายถึง พลังงานที่โครงสร้างสามารถดูดซับได้ เมื่อเทียบกับขนาดน้ำหนักของตัวโครงสร้างเอง โดยในบทความนี้ได้มุ่งเน้นศึกษาค่าพลังงานที่ดูดซับได้และพลังงานดูดซับจำเพาะของชิ้นงานทดสอบ ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญในการบ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานจากการชนของโครงสร้าง โดยการหาค่าพลังงานดูดซับนั้นสามารถหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟของภาระและระยะยุบตัวของโครงสร้าง เมื่อเกิดการชนซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการดังสมการที่ (1)

$$E_a = \int P ds = P_{mean} \times S \quad (1)$$

โดยที่ E_a คือค่าพลังงานดูดซับ P คือค่าภาระ S คือค่าระยะการยุบตัว และสามารถหาค่าพลังงานดูดซับจำเพาะได้จากสมการที่ (2)

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

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



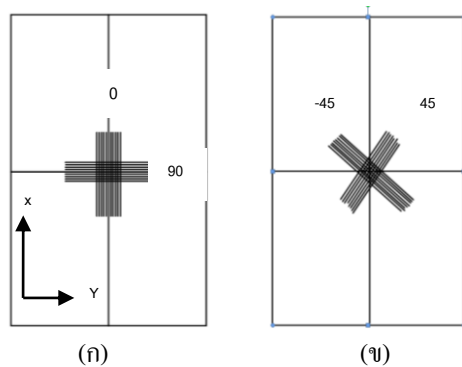
รูปที่ 1 กราฟแสดงภาระและระยะยุบตัวของโครงสร้าง พร้อมกับแสดงตัวแปรต่างๆที่นิยมใช้ในการศึกษา

3. ขั้นตอนการศึกษา

3.1 ชิ้นงานทดสอบ

วัสดุประกอบประกอบด้วยสองส่วนคือ ส่วนเสริมแรงทำหน้าที่รับแรงหลักให้แก่โครงสร้าง ส่วนที่สองคือ เมทริกซ์ ทำหน้าที่ป้องกันการเสียหายของส่วนที่เสริมแรง และทำหน้าที่ส่งถ่ายแรงไปยังส่วนเสริมแรง ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองขึ้นรูปจากเส้นใยแก้วชนิดสองทิศทางกับ โพลีเอสเตอร์ชนิดไอโซพทาลิก เป็นชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยมือ (Hand lay-up) ที่มีการเรียงทับซ้อนและมุมไขว้ที่แตกต่างกัน 3 ชิ้นงาน ดังรูปที่ 2 แสดงถึงตัวอย่างลักษณะของมุมไขว้ (ก) มุมไขว้ที่ 0/90 องศา (ข) มุมไขว้ที่ 45/-45 องศา จาก

รูปที่ 3 แสดงชิ้นงานจริงสำหรับการใช้ในการทดสอบ โดยชิ้นงาน A มีมุมไขว้ [(0/90)/(0/90)/(0/90)] ชิ้นงาน B มีมุมไขว้ [(45/-45)/(45/-45)/(45/-45)] และชิ้นงาน C มีมุมไขว้ [(45/-45)/(0/90)/(45/-45)] ตามลำดับ ตารางที่ 1 แสดงขนาดและมุมไขว้เส้นใยของชิ้นงานทดสอบ ท่อที่ขึ้นรูปเพื่อทดลองมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกคือ 50 mm. ความหนาคือ 2 mm. และความยาวคือ 100 mm ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ ในทุกกรณี แล้วนำผลการทดสอบมาเฉลี่ย



รูปที่ 2 แสดงถึงลักษณะของมุมไขว้

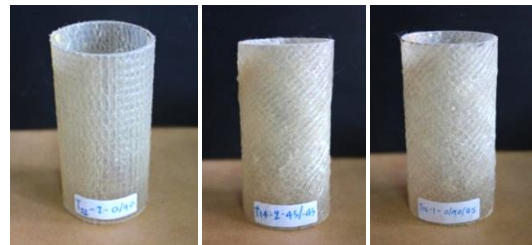
(ก) มุมไขว้ที่ 0/90 องศา (ข) มุมไขว้ที่ 45/-45 องศา

3.2 การขึ้นรูปชิ้นงาน

การขึ้นรูปชิ้นงานเป็นการขึ้นรูปแบบทอด้วยมือ เป็นกระบวนการขึ้นรูปที่ทำได้ง่าย ไม่ต้องใช้ความดันและอุณหภูมิที่สูงมากนัก ใช้เครื่องมือและแม่พิมพ์ที่ติดตั้งขึ้นเองได้ สำหรับการขึ้นรูปสามารถทำได้โดยวางเส้นใยแก้วลงบนแม่พิมพ์ที่มีลักษณะเป็นเหล็กทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 48 mm ความยาว คือ 500 mm จากนั้นทาทับด้วยเรซินพร้อมกับใช้ลูกกลิ้งรีดให้ซึมผ่านลงในช่องว่างของเส้นใย สำหรับการศึกษานี้ใช้เส้นใยแก้วทั้งหมด 6 ชั้น หลังจากนั้นกำหนดให้แม่พิมพ์หมุนด้วยความเร็วรอบที่ 34 rpm ใช้เวลาในการหมุนเท่ากับ 180 นาที เพื่อให้เรซินกระจายสม่ำเสมอทั่วแม่พิมพ์

ตารางที่ 1 ขนาดและมุมไขว้เส้นใยของชิ้นงาน

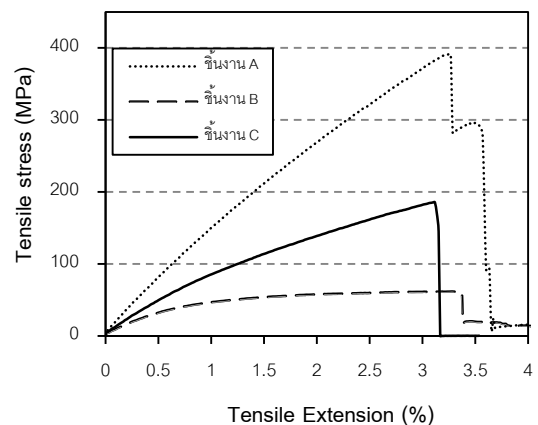
ชิ้นงาน	เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)	ความยาว (mm)	ความหนา (mm)	มุมไขว้เส้นใย (องศา)
A	50	100	2	[(0/90)/(0/90)/(0/90)]
B	50	100	2	[(45/-45)/(45/-45)/(45/-45)]
C	50	100	2	[(45/-45)/(0/90)/(45/-45)]



(ก) ชิ้นงาน A (ข) ชิ้นงาน B (ค) ชิ้นงาน C

รูปที่ 3 ตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

3.3 คุณสมบัติของวัสดุ



รูปที่ 4 ความเค้น – ระยะยืดตัว ของวัสดุทดสอบ

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานต่างๆ

ชิ้นงาน	ความเค้น	มอดูลัส	การยืดตัว
	สูงสุด	ความ	ณ จุดขาด
	(MPa)	ยืดหยุ่น	(%)
		(GPa)	
A	391.33	15.53	3.67
B	61.85	7.30	3.44
C	185.42	9.49	3.20

การทดสอบหาคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน ใช้วิธีทดสอบแรงดึงตามมาตรฐานอ้างอิง ASTM 3039 รูปที่ 4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะยืดตัว โดยทดสอบชิ้นงานจำนวน 5 ชิ้นงาน แล้วนำมาเฉลี่ย จากกราฟพบว่าความเค้นสูงสุดคือ 391.33 MPa และจากตารางที่ 2 แสดงผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานต่างๆ โดยชิ้นงาน A มีความเค้นสูงสุด คือ 391.33 MPa ค่ามอดูลัสคือ 15.53 GPa ซึ่งมีค่าสูงกว่าชิ้นงาน 2 แบบที่เหลือ

4.วิธีการทดลอง

4.1 การทดสอบแบบแรงกระทำแบบกึ่งคงที่

การทดสอบนี้ได้ดำเนินการโดยใช้เครื่องทดสอบการกดด้วยแรงกระทำแบบกึ่งคงที่ ซึ่งมีชื่อว่าเครื่อง ESH Testing Limited ซึ่งเป็นเครื่องทดสอบที่ใช้ระบบคอมพิวเตอร์กับระบบไฮดรอลิกส์ ในการควบคุมเครื่องมีความสามารถถึง 2,000 KN และระยะการกดมากที่สุดคือ 200 mm สามารถบันทึกข้อมูลได้ทุกๆ 0.04 mm ผลที่ได้จากการทดสอบเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำ (Load) และระยะทางในการยุบตัว (Displacement) เครื่องสามารถบันทึกผลการทดสอบและแสดงเป็นกราฟได้ทันที ลักษณะเครื่องทดสอบแสดงดังรูปที่ 5 ในการทดสอบส่วนนี้ชิ้นงานจะถูกกดในแนวแกนด้วยความเร็วคงที่ 10 mm/min และกดลงมาจนกระทั่งชิ้นงานเกิดการยุบ 60 mm จากนั้นทำการ

บันทึกค่าภาระและระยะยุบตัวเพื่อไปทำการวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 5 เครื่องทดสอบการกดแบบแรงกระทำกึ่งคงที่

4.2 การทดสอบการกระแทก

การทดสอบส่วนนี้ได้ดำเนินการโดยใช้เครื่อง Vertical Impact Testing Machine ซึ่งเป็นเครื่องทดสอบที่ใช้การกระแทกของค้อนจากเครื่องทดสอบ ความสูงของเครื่องทดสอบคือ 3 m น้ำหนักของมวลที่ใส่ลงในค้อนสามารถใส่ได้ ระหว่าง 20 - 60 kg ในส่วนด้านการประมวลผลจะมี โพลีเซลล์ที่มีความละเอียดในการบันทึกข้อมูล สูงสุดที่ 10,000 ค่าต่อวินาที เมื่อทดสอบโพลีเซลล์จะแปลงค่าของแรงไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า นำผลที่ได้ ไปยัง Data logger เพื่อทำการบันทึกข้อมูล จากนั้นผลที่ได้จะเข้าสู่เครื่อง

คอมพิวเตอร์ เพื่อแปลงค่า โดยผลที่ได้จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง ภาระกระแทก (Load) และเวลา (Time) รูปที่ 6 แสดงลักษณะของเครื่องทดสอบภาระกระแทก โดยในการทดสอบภายใต้ภาระกระแทก ใช้ความเร็วในกระแทกคือ 7 m/s และน้ำหนักของหัวค้อนคือ 45 kg ความสูงของหัวค้อนที่ตกลงมากระแทกกับชิ้นงานคือ 2.47 m ทำการบันทึกภาพด้วยกล้องความเร็วสูงและบันทึกแรงเพื่อนำไปวิเคราะห์ผลต่อไป



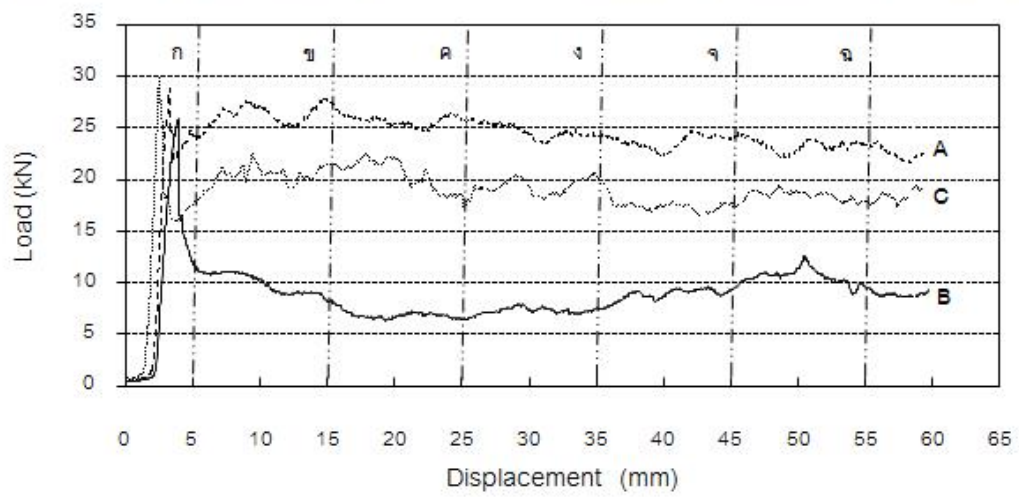
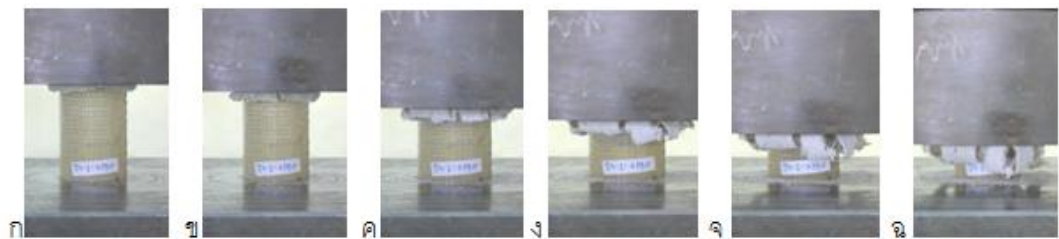
รูปที่ 6 เครื่องทดสอบการกระแทก

5. ผลการศึกษา

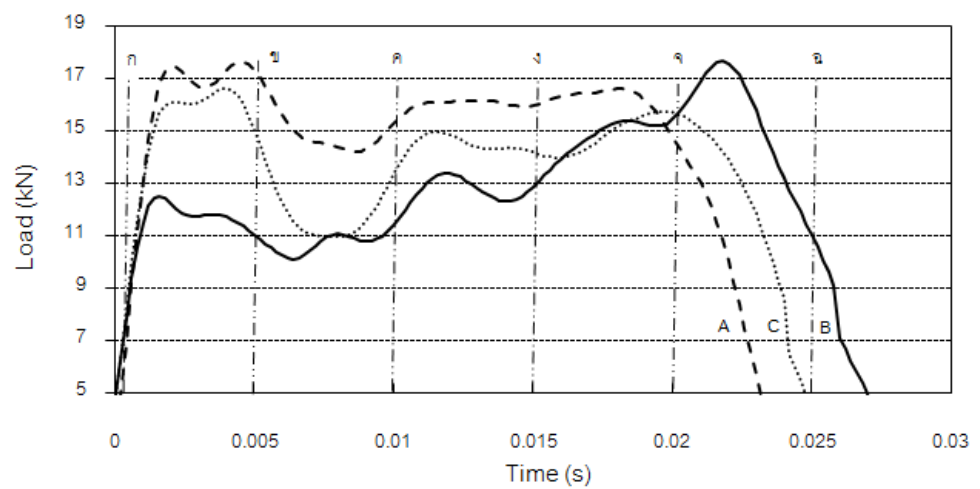
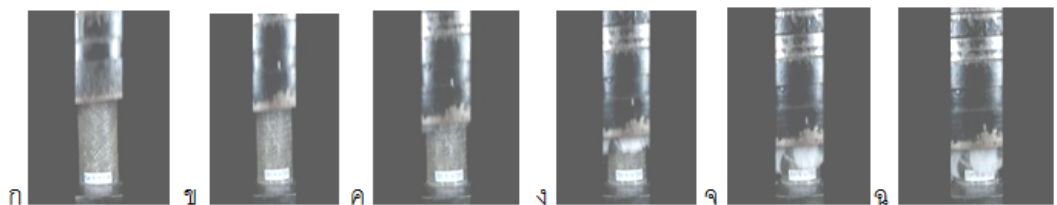
5.1 การตอบสนองต่อภาระกระทำ

โครงสร้างเมื่อถูกแรงกระทำเป็นระยะเวลาหนึ่ง โครงสร้างจะตอบสนองด้วยการเสียรูป โดยยวบยในรูปแบบใดรูปแบบหนึ่งออกมา นอกจากนี้ในระหว่างการเสียรูปของโครงสร้าง โครงสร้างจะดูดซับแรงกระทำและปลดปล่อยแรงปฏิกิริยาออกมาตลอดเวลา

โดยแรงปฏิกิริยาที่ปล่อยออกมานั้นสามารถเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์กับระยะยวบยได้ เรียกว่ากราฟของภาระและระยะยวบย (Load Displacement Curve) หรือกราฟของแรงปฏิกิริยาและระยะยวบย ซึ่งนับเป็นการตอบสนองของโครงสร้างอีกรูปแบบหนึ่ง จากรูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงปฏิกิริยาและระยะยวบยของโครงสร้างที่ทดสอบภายใต้ภาระการกดในแนวแกน เมื่อเป็นแรงกระทำแบบกึ่งคงที่ โดยในแกนนอนแสดงระยะยวบยของโครงสร้างตลอดการทดสอบและแกนตั้งแสดงค่าแรงปฏิกิริยาที่ได้จากการทดสอบ จากกราฟของการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า ชิ้นงาน A มีค่าภาระเฉลี่ยสูงกว่าชิ้นงานทั้ง 2 แบบที่เหลือ หลังจากนั้นกราฟทุกเส้นจะแกว่งตัวขึ้นลงสลับกันไปเรื่อยๆ ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปของกราฟที่ได้จากการทดสอบภายใต้การชน ค่าพลังงานดูดซับของโครงสร้างก็คำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟและมีผลดังแสดงในตารางที่ 4 จากรูปที่ 8 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงปฏิกิริยากับเวลาของชิ้นงานภายใต้ภาระกระแทกในแนวแกน พบว่าชิ้นงาน A มีค่าแรงปฏิกิริยาสูงกว่าชิ้นงาน 2 แบบ เช่นกัน สำหรับการทดลองด้วยความเร็วสูงนั้นไม่สามารถวัดค่าการยวบยของโครงสร้างในระหว่างการเสียหายได้ เนื่องจากการยวบยเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงมักนิยมเขียนกราฟของค่าภาระและเวลา มากกว่ากราฟของค่าภาระและระยะยวบยดังที่ใช้ในการศึกษาแบบแรงกระทำกึ่งคงที่



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์กันระหว่างภาระและระยะขยับตัวภายใต้แรงกระทำกึ่งคงที่

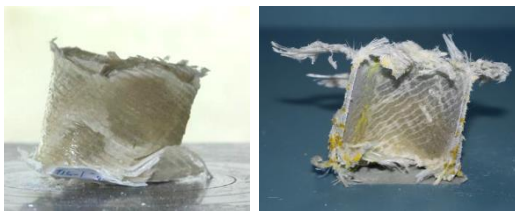


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์กันระหว่างภาระและเวลาภายใต้ภาระกระแทก

5.2 ลักษณะการเสียหาย



รูปที่ 9 การเสียหายสุดท้ายของชิ้นงาน A ภายใต้ภาระกระทำกึ่งคงที่



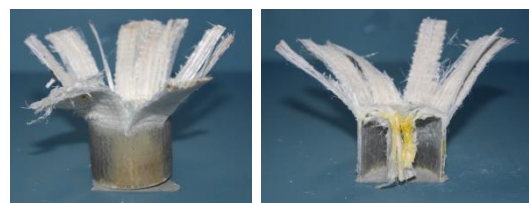
รูปที่ 10 การเสียหายสุดท้ายของชิ้นงาน B ภายใต้ภาระกระทำกึ่งคงที่



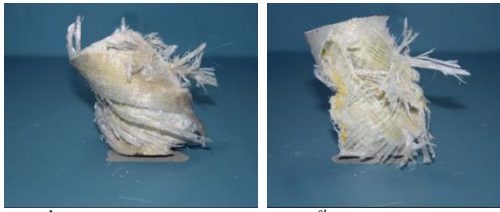
รูปที่ 11 การเสียหายสุดท้ายของชิ้นงาน C ภายใต้ภาระกระทำกึ่งคงที่

จากรูปที่ 9 แสดงถึงรูปแบบการเสียหายของชิ้นงาน ที่ได้จากการทดลองภายใต้ภาระกระทำกึ่งคงที่ในแนวแกน ของชิ้นงานที่มีลักษณะการเรียงตัวของเส้นใยตามแนวตั้งคือ 0 องศา และแนวขวางคือ 90 องศาของชิ้นงาน พบว่าในช่วงแรกเกิดการยุบตัวของชิ้นงานช้า หลังจากภาระกระทำต่อชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น ชิ้นงานเกิดการยุบตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งการเริ่มต้นการเสียหายเกิดขึ้นที่ปลายด้านบนของชิ้นงาน มีลักษณะแตกละเอียดเป็นชิ้นเล็กและบานออกเป็นพุ่มหลังจากนั้นชิ้นงานเริ่มแยกและบานออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนแรกเส้นใยแยกและยุบเข้าด้านในของชิ้นงาน และส่วนที่

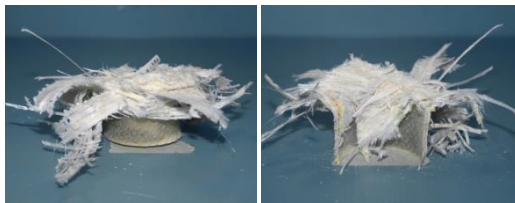
สองเส้นใยแยกและบานออกด้านนอกของชิ้นงาน จนกระทั่งสิ้นสุดการยุบตัว จากการสังเกตการเสียหายสุดท้ายของชิ้นงาน พบว่ามีลักษณะบานออกเป็นแฉกซึ่งเกิดจากอิทธิพลของเส้นใยในแนวตั้ง ที่สามารถรับภาระในแนวแกนโดยตรง และอิทธิพลเส้นใยในแนวขวางทำหน้าที่ประคองให้เส้นใยในแนวตั้งได้รับการรับภาระในแนวแกน จากรูปที่ 10 แสดงรูปแบบการเสียหายของชิ้นงานที่มีลักษณะไขว้ โดยการจัดเรียงตัวของเส้นใยในแนวเฉียง จากการทดลองพบว่าการเริ่มต้นการเสียหายเกิดขึ้นที่ด้านล่างของชิ้นงาน มีลักษณะการเสียหายตามแนวเฉียงของเส้นใย หลังจากนั้นด้านบนของชิ้นงาน มีการเสียหายยุบตัวและซ้อนกันภายในชิ้นงาน ซึ่งเกิดจากการเรียงตัวของเส้นใยในแนวเฉียง เมื่อรับภาระในแนวแกนทำให้เส้นใยเกิดการแตกหักตลอดจนสิ้นสุดการยุบตัว จากรูปที่ 11 พบว่าการเริ่มต้นของการเสียหายเกิดขึ้นที่ปลายด้านบนของชิ้นงาน มีลักษณะแตกละเอียดเป็นพุ่ม หลังจากนั้นเส้นใยแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนแรกยุบเข้าด้านในของชิ้นงาน ส่วนที่สองแยกออกด้านนอกชิ้นงาน จนกระทั่งสิ้นสุดการยุบตัว จากการสังเกตการเสียหายของชิ้นงาน พบว่ามีลักษณะบานออกเป็นพุ่ม ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของเส้นใยในแนวตั้งคือ 0 องศา ทำให้รับภาระในแนวแกนโดยตรงและอิทธิพลของเส้นใยในแนวเฉียง ทำหน้าที่ประคองเส้นใยในแนวตั้งและรับภาระในแนวแกน



รูปที่ 12 การเสียหายสุดท้ายของชิ้นงาน A ภายใต้ภาระกระทำ



รูปที่ 13 การเสียหายสุดท้ายของชิ้นงาน B ภายใต้ภาระกระแทก



รูปที่ 14 การเสียหายสุดท้ายของชิ้นงาน C ภายใต้ภาระกระแทก

จากรูปที่ 12 แสดงรูปแบบการเสียหายของชิ้นงานภายใต้ภาระกระแทกในแนวแกนของชิ้นงาน ที่มีลักษณะการเรียงตัวของเส้นใยในแนวตั้ง คือ 0 องศา แนวขวาง คือ 90 องศา ของชิ้นงาน จากการทดลองพบว่า การเริ่มต้นเสียหายของชิ้นงานเริ่มที่ปลายด้านบน มีลักษณะแตกเป็นชิ้นเล็กและแยกออกเป็นสองส่วน ได้แก่ ส่วนแรกเส้นใยบุบเข้าด้านในชิ้นงาน และส่วนที่สองเส้นใยแยกออกด้านนอกและกางออกเป็นแฉก จากการสังเกตพบว่าการเกิดจากการแยกระหว่างชั้นของเส้นใยที่ปลายด้านบนของชิ้นงานที่มีการเรียงตัวของเส้นใยในแนวตั้ง และแนวขวาง ซึ่งเป็นตัวขึ้นระหว่างเส้นใยแนวตั้ง เมื่อรับภาระในแนวแกนจึงมีลักษณะกางออกเป็นแฉก ประมาณ 7 – 8 แฉก จากรูปที่ 13 จากการทดลองพบว่าการเสียหายของชิ้นงานเกิดขึ้นที่ปลายด้านบนของชิ้นงาน ซึ่งมีลักษณะของเส้นใยแตกหักในแนวเฉียงของชิ้นงานในทิศทาง 45 องศา หลังจากนั้นเมื่อชิ้นงานรับภาระเพิ่มมากขึ้น เกิดการเสียหายในทิศทาง -45 องศา และบุบตัวลงในลักษณะซ้อนกัน ซึ่งสาเหตุเกิดจากการเรียงตัวของเส้นใยภายในชิ้นงานมีลักษณะแนวเฉียง เมื่อรับภาระในแนวแกนทำให้เกิดความเสียหายตามแนวเฉียงของชิ้นงาน จากรูปที่ 14 พบว่าการเริ่มต้นการเสียหายเกิดขึ้นที่ด้านบนของ

ชิ้นงาน ซึ่งมีลักษณะบานและแยกออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนแรกเส้นใยบุบเข้าด้านในชิ้นงาน และส่วนที่สองเส้นใยแยกออกและกางออกนอกชิ้นงาน จากการสังเกตพบว่าการเกิดจากการแยกชั้นเส้นใยที่ปลายด้านบนของชิ้นงานเส้นใยแนวเฉียงเกิดการพับเข้าไปในชิ้นงาน และเส้นใยแนวตั้งและแนวเฉียงมีลักษณะแตกกระจาย

5.3 ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของภาระเฉลี่ย

ตารางที่ 3 ผลคำนวณค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ชิ้นงาน	ค่าภาระเฉลี่ย (kN)	ค่าภาระเฉลี่ยสูงสุด (kN)	ค่าภาระเฉลี่ยต่ำสุด (kN)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของภาระเฉลี่ย
ภาระกึ่งคงที่				
A	25.32	25.59	24.26	0.95
B	8.12	8.77	6.75	1.19
C	18.20	18.92	17.48	0.72
ภาระกระแทก				
A	14.40	14.76	14.28	0.32
B	11.72	12.03	11.46	0.29
C	12.65	12.88	12.76	0.30

ตารางที่ 5.3 แสดงผลการคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของจำนวนชิ้นงานที่ทดสอบทั้งหมดสามชิ้นงานแล้วนำมาเฉลี่ย ในทุกกรณี พบว่าค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานในกรณีภายใต้ภาระกึ่งคงที่มีค่าเท่ากับ 0.72 – 1.19 และในกรณีภายใต้ภาระกระแทกมีค่าเท่ากับ 0.29 – 0.32 ซึ่งจากตัวเลขการกระจายตัวของข้อมูล พบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานภาระเฉลี่ยทั้งสองกรณี มีค่าเข้าใกล้ศูนย์

5.4 ความสามารถในการดูดซับพลังงาน

ตารางที่ 4 ผลการคำนวณที่ได้จากการทดสอบ

ชิ้นงาน	มุมไขว้ (องศา)	ภาระเฉลี่ย (kN)	พลังงานดูดซับ (kJ)	พลังงานจำเพาะ (kJ/kg)
ภาระกึ่งคงที่				
A	[0/90]/[0/90]/[0/90]	25.32	1.52	29.80
B	[45/-45]/[45/-45]/[45/-45]	8.12	0.48	8.89
C	[45/-45]/[0/90]/[45/-45]	18.20	1.09	20.56
ภาระกระแทก				
A	[0/90]/[0/90]/[0/90]	14.40	0.86	17.55
B	[45/-45]/[45/-45]/[45/-45]	11.72	0.47	9.03
C	[45/-45]/[0/90]/[45/-45]	12.65	0.76	14.61

จากตารางที่ 4 แสดงผลการทดสอบชิ้นงาน ภายใต้ภาระกดแบบกึ่งคงที่ในแนวแกน พบว่าชิ้นงาน A สามารถดูดซับพลังงานจำเพาะได้ 29.80 kJ/kg ส่วนชิ้นงาน B และ C สามารถดูดซับพลังงานได้เท่ากับ 8.89 kJ/kg และ 20.56 kJ/kg ตามลำดับ โดยชิ้นงาน A สามารถดูดซับพลังงานจำเพาะได้มากกว่าชิ้นงาน B และ C เท่ากับ 235.20 % และ 44.94 % ตามลำดับ สำหรับการทดสอบภายใต้ภาระกระแทกในแนวแกน พบว่าชิ้นงาน A สามารถดูดซับพลังงานจำเพาะได้ 17.55 kJ/kg ในขณะที่ชิ้นงาน B และ C สามารถดูดซับพลังงานได้เท่ากับ 9.03 kJ/kg และ 14.61 kJ/kg ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าชิ้นงาน A สามารถดูดซับพลังงานจำเพาะได้ มากกว่าชิ้นงาน B และ C เท่ากับ 94.35 % และ 20.12 % ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าชิ้นงาน A ที่มีมุมของเส้นใย [(0/90)/(0/90)/(0/90)] มีความสามารถในการดูดซับพลังงานได้มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงาน B และ C ซึ่งสาเหตุเกิดจากการเรียงตัวของของเส้นใยแก้วที่มีทิศทาง 0 องศา สามารถต้านทานต่อแรงกระทำที่เกิดขึ้นในแนวแกนได้สูง เนื่องจากหน้าตัดของเส้นใยรับแรงหรือความเค้นโดยตรง เมื่อเปรียบเทียบกับทิศทางของเส้นใยแบบอื่นๆ และการเรียงตัวของเส้นใยที่มีทิศทางแนวขวางคือ 90

องศา ทำหน้าที่ประคองเส้นใยในแนวตั้งและรับภาระในแนวแกน

6. สรุป

จากการศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของท่อไฟเบอร์กลาส ภายใต้แรงกระทำแบบกึ่งคงที่และภาระกระแทก โดยมุ่งศึกษาอิทธิพลของเส้นใยแก้วและความสามารถในการดูดซับพลังงาน ในกรณีภายใต้แรงแบบกึ่งคงที่ พบว่า ชิ้นงาน A สามารถดูดซับพลังงานจำเพาะได้ดีกว่า ชิ้นงาน B และ C ประมาณ 44.94 – 235.20 % ในกรณีภายใต้ภาระกระแทก ชิ้นงาน A สามารถดูดซับพลังงานจำเพาะได้ประมาณ 20.12 – 94.35 % สามารถสรุปได้ว่าชิ้นงานที่มีมุมของเส้นใย คือ [(0/90)/(0/90)/(0/90)] มีความเหมาะสมต่อการออกแบบในด้านความสามารถในการดูดซับพลังงาน

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยนี้ และภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือในการวิจัย

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Solaimurugan, R. Velmurugan., (2007), “Influence of fibre orientation and stacking sequence on petalling of glass/polyester composite cylindrical shells under axial compression,” International Journal of Solids and Structures 44: 6999–7020

- [2] A.G. Mamalis, D.E. Manolakos, G.A. Demosthenous and M.B. Ioannidis., (1997), "The static and dynamic axial crumbling of thin-walled fiberglass composite square tubes," *Composite Part B*, Vol.28B, pp. 439-451.
- [3] A.G. Mamalis, D.E. Manolakos, G.A. Demosthenous and M.B. Ioannidis., (1996), "The static and dynamic axial collapse of fiberglass composite automotive frame rails," *Composite Structures*, Vol. 34, pp. 77-90.
- [4] A.G. Mamalis, D.E. Manolakos, G.A. Demosthenous and M.B. Ioannidis., (1996), "Analysis of Failure mechanisms Observed in Axial Collapse of Thin-Walled Circular Fiberglass Composite Tubes," *Composite Structures*, Vol. 24, pp. 335-352.
- [5] A.G. Mamalis, D.E. Manolakos, G.A. Demosthenous and M.B. Ioannidis., (1997), "Analytical modeling of the static and dynamic axial collapse of thin-walled fiberglass composite conical shells," *Composite Structures*, Vol. 19, pp. 477-492.
- [6] M. M. Shokrieh, H. Tozandehjani, and M. J. Omid., (2009), "Effect of fiber orientation and cross section of composite tubes on their energy absorption ability axial dynamic loading," *Mechanics of Composite Materials*, Vol. 45 pp.567-576
- [7] Jose Daniel D. Melo, Andre Luiz s. Silva, John Edward N. Villena., (2008), "The effect of processing conditions on the energy absorption capability of composite tubes," *Composite Structures*, Vol.82, pp. 622-628.
- [8] M.Golzar, M.Poorzeinolabedin. (2010) , "Prototype fabrication of a composite automobile body based on integrated structure, " *International Journal manufacturing technology* 49:1037-1045.
- [9] Young Nam Kim, Jae Jung Hwang, Kyung Yun Baek., (2003), "Impact Collapse Characteristics of CF/Epoxy Composite Tubes for Light-Weights," *KSME International Journal* , Vol. 17, pp.48-56.