กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยการให้ความร่วมมือ การสนับสนุน และความอนุเคราะห์จากบุคลากรหลายฝ่าย ซึ่งคณะผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้ดังนี้

ขอขอบคุณ อาจารย์ ที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ที่อำนวยความสะดวกในการทดสอบ Universal Testing Machine และขอขอบคุณบุคลากรของภาควิชาภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ 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 งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาตัวแปรและการดูดซับพลังงานของท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมทรงเรียวและท่อทรงกระบอก ที่ทำด้วยวัสดุประกอบเสริมแรง โดยชิ้นงานทดลองคือท่อทรงกรวยหน้าตัดสี่เหลี่ยม ทำด้วยวัสดุประกอบเสริมแรง FRP ประเภท เส้นใยแก้ว (Fiber glass) ผสมเรซิ่นโพลีเอสเตอร์ ซึ่งเป็นวัสดุประกอบที่นิยมใช้ในทางวิศวกรรมการขึ้นรูปของท่อที่ทำด้วยวัสดุประกอบเสริมแรง จะทำโดยใช้มือ (Hand lay-up technique) ท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมมีขนาด ความกว้างคือ 50 มิลลิเมตร ความยาวคือ 100 มิลลิเมตร ความสูงคือ 300 มิลลิเมตร ความหนาคือ 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)] และชิ้นงาน C มีมุมไขว้ [(45/-45)/(0/90)/(45/-45)] ขึ้นรูปจาก E-glass/polyester ขนาดของท่อมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกคือ 50 มิลลิเมตร ความหนาคือ 2 มิลลิเมตร และความยาวคือ 100 มิลลิเมตร

ผลจากการศึกษาตัวแปรและการดูดซับพลังงานของท่อทรงเรียวผนังบางโดยใช้วัสดุประกอบเสริมแรงภายใต้แรงกระทำตามแนวแกน 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 กรณีแรงกระแทก พบว่าลักษณะการเสียหายของชิ้นงานมี 1 แบบ คือ การเสียหายแบบยุบตัวแตกเป็นชิ้นเล็กตลอดแนวแกนของชิ้นงาน ในด้านความสามารถในการดูดซับพลังงานจำเพาะ พบว่าชิ้นงานที่มีมุมเอียง 5 องศา หรือ A5 สามารถในการดูดซับพลังงานจำเพาะได้มากกว่าชิ้นงานอื่นๆในทุกกรณี

ผลทดลองและแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของชิ้นงานท่อทรงกระบอก ภายใต้ภาระกระทำแบบกึ่งคงที่ พบว่าชิ้นงานมีลักษณะการเสียหายอยู่สามรูปแบบคือ (1) การเสียหายแบบแตก

และบานแยกออกเป็นแฉก ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของเส้นใยในแนวตั้ง ที่สามารถรับภารระในแนวแกนโดยตรง และอิทธิพลเส้นใยในแนวขวางทำหน้าที่ประคองให้เส้นใยในแนวตั้งให้รับภาระแนวแกน (2) การเสียหายแบบยุบตัวตามแนวเฉียงของเส้นใย ซึ่งเกิดจากการเรียงตัวของเส้นใยในแนวเฉียงเมื่อรับภาระในแนวแกนทำให้เส้นใยเกิดการแตกหักตลอด จนสิ้นสุดการยุบตัว และ (3) การเสียหายแบบแตกและบานออกเป็นพุ่ม ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของเส้นใยในแนวตั้ง 0 องศา ทำให้รับภาระในแนวแกนโดยตรง และอิทธิพลของเส้นใยในแนวเฉียง ทำหน้าที่ประคองเส้นใยในแนวตั้งและรับภาระในแนวแกน สำหรับผลทดลองและแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ภายใต้แรงกระแทก พบว่าชิ้นงานมีลักษณะการเสียหายอยู่สามรูปแบบคือ การเสียหายแบบแตกและบานแยกออกเป็นแฉก การเสียหายแบบยุบตัวตามแนวเฉียงของเส้นใย และ การเสียหายแบบแตกและบานเช่นกัน

ในด้านความสามารถในการดูดซับพลังงานภายใต้ภาระกระทำแบบกึ่งคงและภายใต้แรงกระแทก 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	**ฎ**
สารบัญภาพ	**ฏ**
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	**ต**
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.3.1 กรณีแรงที่กระทำแบบคงที่	3
1.3.2 กรณีแรงกระแทก	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 การขึ้นรูปแบบทาด้วยมือ	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 ภาระวิกฤติหรือภาระเสียหาย	21
2.7.2 ภาระสูงสุด	22
2.7.3 ภาระเฉลี่ย	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 การกำหนดคุณสมบัติของท่อชิ้นงาน	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 การทดสอบการต้านทานแรงดึงของเส้นใยแบบสุ่มหลายทิศทางความหนา 2.5 mm 59
3.5.3 วิธีการทดสอบชิ้นงานภายใต้แรงกด 60
3.5.3.1 การทดสอบการต้านทานแรงกดตามแนวเส้นใยในทิศทางเดียว 0 องศา 61
3.5.3.2 การทดสอบการต้านทานแรงกดตามแนวเส้นใยในทิศทางเดียว 90 องศา 62
3.5.3.3 การทดสอบการต้านทานแรงกดตามแนวเส้นใยแบบสุ่มหลายทิศทาง 63
3.5.4 วิธีการทดสอบชิ้นงานภายใต้แรงเฉือน 64
3.5.4.1 การทดสอบแรงเฉือนนอกระนาบในทิศทางเดียว 0 องศา 65
3.5.4.2 การทดสอบแรงเฉือนนอกระนาบของเส้นใยแก้วแบบสุ่มหลายทิศทางความหนา 1.5 mm 66
3.5.4.3 การทดสอบแรงเฉือนนอกระนาบของเส้นใยแก้วแบบสุ่มหลายทิศทางความหนา 2.0 mm 67
3.5.4.4 การทดสอบแรงเฉือนนอกระนาบของเส้นใยแก้วแบบสุ่มหลายทิศทางความหนา 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 สรุปผลกาศึกษา	111
5.1.1 ชิ้นงานทรงกระบอก	111
5.1.2 ชิ้นงานทรงกรวย	111
5.2 ข้อเสนอแนะ	112
เอกสารอ้างอิง	**113**
ภาคผนวก	**117**

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	เปรียบเทียบช่วงของสมบัติระหว่างเทอร์โมเซ็ตและเทอร์มอพลาสติก	6
2.2	เปรียบเทียบสมบัติของเทอร์มอเซ็ตต่างๆ	6
3.1	ขนาดของชิ้นงานไฟเบอร์กลาสแบบทรงกรวยที่ใช้ในการทดลอง	34
3.2	น้ำหนักของเรซิ่นและน้ำหนักของเส้นใยแก้ว	38
3.2	น้ำหนักของเรซิ่นและน้ำหนักของเส้นใยแก้ว (ต่อ)	39
3.3	ขนาดของท่อไฟเบอร์กลาสที่ใช้ในการทดลอง	42
3.4	ผลทดสอบคุณสมบัติของชิ้นงาน	68
4.1	สรุปผลการทดลองและแบบจำลองการเสียหายของชิ้นงานภายใต้แรงแบบกึ่งคงที่	76
4.2	สรุปผลการทดลองและแบบจำลองการเสียหายของชิ้นงานภายใต้แรงกระแทก	82
4.3	ความสามารถในการดูดซับพลังงานภายใต้ภาระกระทำในแนวแกน	87
4.4	ความสามารถในการดูดซับพลังงานภายใต้ภาระกระทำแบบกึ่งคงที่	108
4.5	ความสามารถในการดูดซับพลังงานภายใต้แรงกระแทก	109

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1.1	แสดงตัวดูดซับพลังงานทำหน้าที่ดูดซับพลังงานของโครงสร้างจากแรงกระแทก	1
2.1	เปรียบเทียบเส้นใยเสริมแรงชนิดต่างๆ	7
2.2	ความแข็งแรงและความแข็งเกร็งจำเพาะของวัสดุที่ทำจากเส้นใยชนิดต่างๆ	8
2.3	การขึ้นรูปแบบทาด้วยมือและตัวอย่างชิ้นงาน	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) เรซิ่นและ (ข) Hardener (ตัวทำให้แข็ง) ที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน	35
3.5	เส้นใยแก้วแบบสุ่มหลายทิศทาง	35
3.6	อุปกรณ์ที่ใช้ขึ้นรูปชิ้นงาน	36
3.7	แม่แบบของชิ้นงาน	37
3.8	เส้นใยแก้วที่ตัดตามลักษณะของชิ้นงาน สำหรับใช้ในการขึ้นรูป	38
3.9	ตวงปริมาณเรซิ่นสำหรับใช้ในการขึ้นรูป	38
3.10	ขั้นตอนการเตรียมสารและผสมสาร Hardener	39
3.11	ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงาน โดยทาเรซิ่นและวางเส้นใยแก้วบนแม่แบบ	40
3.12	ชิ้นงานเริ่มแข็งตัว	41
3.13	ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ	41

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

3.14 (ก) เรซิ่นและ (ข) ตัวทำให้แข็งที่ใช้ในการขึ้นรูปท่อไฟเบอร์ 43
3.15 เส้นใยแก้วทอเป็นผืนที่มีลักษณะมุมไขว้กัน 0/90 องศา 43
3.16 (ก) การทาเรซิ่นลงบนเส้นใยแก้วที่พันแม่แบบ
(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 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะการยืดตัวภายใต้แรงดึงของ
ชิ้นงาน A 51
3.25 ชิ้นงาน B ที่มีการเรียงตัวของเส้นใยคือ [(45/-45)/(45/-45)/(45/-45)]
สำหรับการทดลองแรงดึง 52
3.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะการยืดตัวภายใต้แรงดึงของชิ้นงาน B 52
3.27 ชิ้นงาน C ที่มีการเรียงตัวของเส้นใยคือ [45/-45]/ [0/90]/ [45/-45]
สำหรับการทดลองแรงดึง 53
3.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะการยืดตัวภายใต้แรงดึงของชิ้นงาน C 53
3.29 ชิ้นงานที่มีการเรียงตัวของเส้นใยทิศทางเดียว สำหรับการทดลองแรงดึง 54
3.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงานภายใต้แรงดึง
ตามแนวเส้นใยในทิศทางเดียว 0 องศา 54
3.31 ชิ้นงานที่มีการเรียงตัวของเส้นใยทิศทางเดียว สำหรับการทดลองแรงดึง 55
3.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงานภายใต้แรงดึง
ตามแนวเส้นใยในทิศทางเดียว 90 องศา 55
3.33 ชิ้นงานที่มีการเรียงตัวของเส้นใยทิศทางเดียว สำหรับการทดลองแรงดึง 56

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

3.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงานภายใต้แรงดึง ตามแนวเส้นใยในทิศทางเดียว 45 องศา 56

3.35 ชิ้นงานที่มีการเรียงตัวของเส้นใยแบบสุ่มหลายทิศทาง สำหรับการทดลองแรงดึง 57

3.36 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงานภายใต้แรงดึง เส้นใยแบบสุ่มหลายทิศทางความหนา 1.5 mm 57

3.37 ชิ้นงานที่มีการเรียงตัวของเส้นใยแบบสุ่มหลายทิศทาง สำหรับการทดลองแรงดึง 58

3.38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงานภายใต้แรงดึง เส้นใยแบบสุ่มหลายทิศทางความหนา 2.0 mm 58

3.39 ชิ้นงานที่มีการเรียงตัวของเส้นใยแบบสุ่มหลายทิศทาง สำหรับการทดลองแรงดึง 59

3.40 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงานภายใต้แรงดึง เส้นใยแบบสุ่มหลายทิศทางความหนา 2.5 mm 59

3.41 (ก) เครื่องทดสอบกด (ข) ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบแรงกด 60

3.42 ชิ้นงานที่มีการเรียงตัวของเส้นใยตามแนวยาวของชิ้นงาน สำหรับการทดลองแรงกด 61

3.43 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงานภายใต้แรงกด ตามแนวเส้นใยในทิศทางเดียว 0 องศา 61

3.44 ชิ้นงานที่มีการเรียงตัวของเส้นใยตามแนวขวางของชิ้นงานสำหรับการทดลองแรงกด 62

3.45 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงานภายใต้แรงกด ตามแนวเส้นใยในทิศทางเดียว 90 องศา 62

3.46 ชิ้นงานที่มีการเรียงตัวของเส้นใยตามแนวขวางของชิ้นงานสำหรับการทดลองแรงกด 63

3.47 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงานภายใต้แรงกด เส้นใยแบบสุ่มหลายทิศทาง 63

3.48 อุปกรณ์การทดสอบแรงเฉือน 64

3.49 ชิ้นงานที่มีการเรียงตัวของเส้นใยตามแนวขวางของชิ้นงานสำหรับการทดลอง แรงเฉือน 65

3.50 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงาน ตามแนวเส้นใยทิศทางเดียว 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 ที่ระยะยุบตัวต่างๆ (S) 72

4.2 แบบการเสียหายสุดท้ายของของชิ้นงาน A 73

4.3 การเสียหายภายใต้ภาระกระทำในแนวแกนแบบกึ่งคงที่ของชิ้นงาน B ที่ระยะยุบตัวต่างๆ (S) 74

4.4 แบบการเสียหายสุดท้ายของชิ้นงาน B 74

4.5 การเสียหายภายใต้ภาระกระทำในแนวแกนแบบกึ่งคงที่ของชิ้นงาน C ที่ระยะยุบตัวต่างๆ (S) 75

4.6 แบบการเสียหายสุดท้ายของชิ้นงาน C 75

4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระและระยะยุบตัวภายใต้แรงกระทำกึ่งคงที่ของชิ้นงาน A 77

4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระและระยะยุบตัวภายใต้แรงกระทำกึ่งคงที่ของชิ้นงาน B 78

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระและระยะยุบตัวภายใต้แรงกระทำกึ่งคงที่ของชิ้นงาน 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 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระและระยะยุบตัวภายใต้แรงกระแทกของชิ้นงาน A 83

4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระและระยะยุบตัวภายใต้แรงกระแทกของชิ้นงาน B 84

4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระและระยะยุบตัวภายใต้แรงกระแทกของชิ้นงาน C 85

4.19 การเสียหายภายใต้ภาระกระทำในแนวแกนแบบกึ่งคงที่ของชิ้นงานที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนาคือ 1.5 mm 89

4.20 การเสียหายสุดท้ายของชิ้นงานภายใต้ภาระกระทำในแนวแกนแบบกึ่งคงที่ที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนาคือ 1.5 mm 90

4.21 การเสียหายภายใต้ภาระกระทำในแนวแกนแบบกึ่งคงที่ของชิ้นงานที่มีมุมเอียงแตกต่างกัน ความหนาคือ 2.0 mm 91

4.22 การเสียหายสุดท้ายของชิ้นงานภายใต้ภาระกระทำในแนวแกนแบบกึ่งคงที่ที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนาคือ 2.0 mm 92

4.23 การเสียหายภายใต้ภาระกระทำในแนวแกนแบบกึ่งคงที่ของชิ้นงานที่มีมุมเอียงแตกต่างกัน ความหนาคือ 2.5 mm 93

4.24 การเสียหายสุดท้ายของชิ้นงานภายใต้ภาระกระทำในแนวแกนแบบกึ่งคงที่ที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนาคือ 2.5 mm 94

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

4.25 การเสียหายภายใต้แรงกระแทกในแนวแกนของชิ้นงานที่มีมุมเอียงแตกต่างกัน และความหนาคือ 1.5 mm 96
4.26 การเสียหายสุดท้ายของชิ้นงานภายใต้แรงกระแทกในแนวแกนของชิ้นงาน ที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนาคือ 1.5 mm 98
4.27 การเสียหายภายใต้แรงกระแทกในแนวแกนของชิ้นงานที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและ ความหนาคือ 2.0 mm 99
4.28 การเสียหายสุดท้ายของชิ้นงานภายใต้แรงกระแทกในแนวแกนของชิ้นงาน ที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนาคือ 2.0 mm 100
4.29 การเสียหายภายใต้แรงกระแทกในแนวแกนของชิ้นงานที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและ ความหนาคือ 2.5 mm 101
4.30 การเสียหายสุดท้ายของชิ้นงานภายใต้แรงกระแทกในแนวแกนของชิ้นงาน ที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนาคือ 2.5 mm 102
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระและระยะยุบตัวภายใต้แรงกระทำกึ่งคงที่ของชิ้นงาน ที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนาคือ 1.5 mm 103
4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระและระยะยุบตัวภายใต้แรงกระทำกึ่งคงที่ของชิ้นงาน ที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนาคือ 2.0 mm 104
4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระและระยะยุบตัวภายใต้แรงกระทำกึ่งคงที่ของชิ้นงาน ที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนาคือ 2.5 mm 104
4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระและเวลา ภายใต้แรงกระแทกของชิ้นงาน ที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนาคือ 1.5 mm 105
4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระและเวลา ภายใต้แรงกระแทกของชิ้นงาน ที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนาคือ 2.0 mm 106
4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระและเวลา ภายใต้แรงกระแทกของชิ้นงาน ที่มีมุมเอียงแตกต่างกันและความหนาคือ 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}	ค่าอัตราป๋วซอง ระนาบ 1-2	-
ν_{13}	ค่าอัตราป๋วซอง ระนาบ 1-3	-
ν_{23}	ค่าอัตราป๋วซอง 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	ระยะยุบตัวของชิ้นงานตั้งแต่เริ่มต้นจนสิ้นสุดการยุบตัว	[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)	-