รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

ผลของชนิดเส้นใยและโครงสร้างการทอต่อการลดพลังงานพุ่งชน

(Effects of Fiber Type and Weaving Structure on the Reduction of Impact Energy)

ผู้วิจัย ผศ.ดร. วิริยะ ทองเรือง
ผศ.ดร. เจริญยุทธ เดชวายุกุล
นาย บุญสม จันทร์ทอง
นาย ชินดิษฐ์ สองนาม

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย จากเงินรายได้
คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ 2552-2553

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถต้านทานการเจาะทะลุของเส้นใยทอเสริมแรงในอีพ๊อกซี่ โดยเส้นใยถูกนำมาทอตามโครงสร้างการทอสามมิติแบบ 3-D orthogonal weave และ 3-D angle-interlock weave ชิ้นงานวัสดุผสมเตรียมขึ้นโดยวิธี Hand lay-up โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 4833 จากนั้นเปรียบเทียบผลจากค่าต้านทานการเจาะทะลุจำเพาะและค่าพลังงานดูดซับจำเพาะของชิ้นทดสอบ พบว่า โครงสร้างการทอแบบ 3-D orthogonal weave มีความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุได้สูงกว่าแบบ 3-D angle-interlock weave จึงได้เลือกทำการศึกษาในรูปแบบการทอแบบ 3-D orthogonal weave ของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยทอเดี่ยวชนิดต่างๆ พบว่า เส้นใยไนล่อน แบบ twine กับเส้นใยไนล่อน แบบ monofilament มีค่าความต้านทานการเจาะทะลุจำเพาะและค่าพลังงานดูดซับจำเพาะได้ดีที่สุด และศึกษาความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุระหว่างการทอผสานร่วมของเส้นใย E-glass กับเส้นใยไนล่อน แบบ twine และเส้นใยไนล่อน แบบ twine กับเส้นใยเคฟล่าร์ โดยเปรียบเทียบกับเส้นใยทอเดี่ยวชนิดต่างๆ พบว่า เส้นใยทอเดี่ยวมีความสามารถต้านทานการเจาะทะลุจำเพาะและพลังงานดูดซับจำเพาะได้ดีกว่าเส้นใยทอผสานร่วม

ABSTRACT

The objective of this work was to study the puncture resistance of woven fibers reinforced epoxy. Two weaving patterns of 3-D orthogonal and 3-D angle-interlock weaves were chosen. The composite samples were prepared by a typical hand lay-up process. The puncture resistance was tested following the ASTM D 4833 standard. The capabilities of the specific puncture load and the specific absorbed energy of the samples were compared. The 3-D orthogonal weave has a better puncture resistance than the 3-D angle-interlock weave. The 3-D orthogonal weave of twine and monofilament nylon composite has a better specific puncture load and the specific absorbed energy than the other fibers. In addition, a single woven fiber composite of nylon exhibits a specific puncture load and specific absorbed energy higher than the hybrid of E-glass/Nylon twine and Nylon twine/Kevlar woven composites.

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ทุนวิจัยและขอขอบคุณกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิที่ให้คำแนะนำตลอดโครงการวิจัยนี้ ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัยนี้

คณะผู้วิจัย

คำนำ

รายงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิจัยเรื่อง ผลของชนิดเส้นใยและโครงสร้างการทอต่อการลดพลังงานพุ่งชน (Effects of Fiber Type and Weaving Structure on the Reduction of Impact Energy) เพื่อพัฒนาวัสดุผสมสำหรับใช้ลดพลังงานพุ่งชน จากวัสดุที่สามารถจัดหาได้ภายในประเทศ โดยจะเน้นศึกษาถึงผลของชนิดวัสดุและโครงสร้างการทอขึ้นรูปต่อการลดลงของพลังงานพุ่งชนสำหรับใช้เป็นเกราะป้องกันต่างๆ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า การวิจัยครั้งนี้จะก่อให้เกิดประโยชน์ และเป็นแนวทางสำหรับผู้ที่สนใจจะทำการวิจัยในขั้นสูงให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นต่อไป

คณะผู้วิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(1)
Abstract	(2)
กิตติกรรมประกาศ	(3)
คำนำ	(4)
สารบัญ	(5)
รายการตาราง	(6)
รายการภาพ	(7)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(8)
1 บทนำ	
1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
1.2 การตรวจเอกสาร	4
1.3 วัตถุประสงค์	9
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	9
1.5 ขอบเขตการวิจัย	10
2 ทฤษฎี	
2.1 เส้นใย (Fiber)	11
2.1.1 ความหมายของเส้นใย	11
2.1.2 ประเภทของเส้นใย	11
2.2 วัสดุผสมพอลิเมอร์เสริมแรงเส้นใย	19
2.2.1 องค์ประกอบ	19
2.2.2 เทคนิคการผลิต	22
2.2.3 ข้อดีและข้อเสียของวัสดุผสมพอลิเมอร์เสริมแรงเส้นใย หรือ FRP	23
2.3 การทอแบบ 2 มิติ	24
2.4 การทอแบบ 3 มิติ	26
2.4.1 การทอแบบ 3D orthogonal	27
2.4.2 การทอแบบ 3D angle-interlock	27

2.5 การเปรียบเทียบสมบัติของการทอแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ 29
2.5.1. สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง 29
2.5.2. การทดสอบการกระแทกของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใย 30
2.6 ทฤษฎีการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุผสม 31
2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดเบื้องต้น 33
2.8 แรงที่ไม่ได้อยู่ในแนวแกนของวัสดุผสม 35
2.9 ความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปของลามิเนต 36
2.10 วิเคราะห์สมบัติของวัสดุผสมการทอแบบ 3 มิติ 40
2.11 ค่า Stiffness and Compliances Matrices สำหรับในหน่วยเซลล์รูปแบบ 3 มิติ 44
2.12 สมบัติความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุ 46
2.12.1 ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ 46
2.12.2 ความต้านทานการเจาะทะลุจำเพาะ 46
2.12.3 ค่าพลังงานดูดซับจำเพาะ 46

3 อุปกรณ์และวิธีการวิจัย
3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย 47
3.1.1 เส้นใยแก้ว 47
3.1.2 เส้นใยไนล่อน ในงานวิจัยนี้มีด้วยกัน 2 ชนิด 47
3.1.3 เส้นใยเคฟล่า 47
3.2 สารเคมี 48
3.2.1 อีพ๊อกซี่ เกรด 850 48
3.2.2 ฮาร์ทอีพ๊อกซี่ เกรด 982 48
3.3 เครื่องมือสำหรับงานวิจัย 49
3.3.1 เครื่องจัดมัดเส้นใย 49
3.3.2 เครื่องทอขึ้นรูปเส้นใย 50
3.3.3 ชุดทดสอบความต้านการเจาะทะลุ 51
3.3.4 เครื่องทดสอบความแข็งแรงวัสดุ 53
3.4 ขั้นตอนและวิธีการวิจัย 53
3.5 การเตรียมชิ้นทดสอบ 56

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6 การทดสอบสมบัติของเส้นใยและวัสดุผสมทำมาจากเส้นใย	57
3.6.1 การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของเส้ยใยเดี่ยว	57
3.5.2 การทดสอบความต้านทานแรงดึงของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใย	58
3.6.2 การทดสอบความต้านทานต่อการเจาะทะลุ	59
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล	
4.1 การทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุ	60
4.1.1 เปรียบเทียบความเร็วการเจาะทะลุ	60
4.1.2 เปรียบเทียบโครงสร้างการทอแบบ 3-D orthogonal weave และแบบ 3-D angle-interlock	61
4.1.3 การทดสอบความสามารถต้านทานการเจาะทะลุของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยทอเดี่ยวชนิดต่างๆ	65
4.1.4 การทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยทอผสานร่วม	70
4.1.5 เปรียบเทียบผลการทดสอบต้านทานการเจาะทะลุของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยทอเดี่ยวกับเส้นใยทอผสานร่วม	75
4.2 การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง	77
4.3 การทดสอบความต้านทานแรงดึงของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใย	77
4.4 การคำนวณสมบัติทางกลด้วยทฤษฎีลามิเนชั่นของรูปแบบการทอแบบ 3 มิติ	82
4.5 การเปรียบเทียบสมบัติทางกลที่ได้จากการทดสอบกับการคำนวณ	83
5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1 บทสรุป	84
5.2 ข้อเสนอแนะ	85
บรรณานุกรม	87

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. ตารางค่าสมบัติทางกลต่างๆ ที่ใช้อ้างอิง 90

ภาคผนวก ข. การคำนวณสมบัติทางกลด้วยทฤษฎี 92

ภาคผนวก ค. ผลการทดสอบแรงดึงของวัสดุผสม 100

ภาคผนวก ง. การทดสอบการยิงด้วยกระสุนในระดับ 3A 105

1. การทดสอบการยิงด้วยกระสุนจริง 105

2. จัดเรียงชั้นเส้นใยและชั้นเส้นใยที่ขึ้นรูปเป็นวัสดุผสม 106

3. ผลการทดสอบการยิง 108

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ข้อเปรียบเทียบระหว่าง Drop test กับ Puncture resistance test	3
3.1 แสดงคุณสมบัติของอีพ๊อกซี่ เกรด 850	48
3.2 แสดงคุณสมบัติของฮาร์ทอีพ๊อกซี่ เกรด 982	48
3.3 คุณสมบัติเชิงกลของอีพ๊อกซี่ เกรด 850 กับผสมฮาร์ทอีพ๊อกซี่ เกรด 982 ที่อัตราส่วน 100/100 โดยน้ำหนัก	49
4.1 แสดงชนิดของเส้นใยและโครงสร้างการทอที่ใช้ในการทดสอบความสามารถต้านทานการเจาะทะลุ	61
4.2 แสดงค่าพลังงานดูดซับของชิ้นทดสอบที่เกิดในการทดสอบความสามารถต้านทานการเจาะทะลุภายใต้การรับแรงสูงสุด	64
4.3 แสดงค่าความต้านการเจาะทะลุจำเพาะ ค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่ (Areal density) และสมบัติของชิ้นทดสอบ	64
4.4 ค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่และค่าการรับแรงสูงสุดของชิ้นทดสอบในรูปแบบการทอแบบ 3-D orthogonal	66
4.5 ปริมาณน้ำหนักของเส้นใยทอและอีพ็อกซี่ของชิ้นทดสอบขนาด 60x60 มิลลิเมตร	67
4.6 แสดงค่าความต้านทานการเจาะทะลุจำเพาะของเส้นใยทอเดี่ยว	68
4.7 ค่าพลังงานดูดซับและค่าพลังงานดูดซับจำเพาะของเส้นใยทอเดี่ยว	69
4.8 ชนิดของเส้นใยที่มาทอผสานร่วมในรูปแบบโครงสร้างการทอแบบ 3-D orthogonal	71
4.9 ค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่และค่าการรับแรงสูงสุดของชิ้นทดสอบ	72
4.10 ค่าความต้านการเจาะทะลุจำเพาะเส้นใยทอผสานร่วม	73
4.11 ค่าพลังงานดูดซับและค่าพลังงานดูดซับจำเพาะของเส้นใยทอผสานร่วม	74
4.12 ความหนาและน้ำหนักของชิ้นทดสอบ	78
4.13 ค่าสมบัติทางกลของเส้นใยและอีพอกซี่เรซิ่น	82
4.14 แสดงค่า E_1 ,E_2, ν_{12}, และ G_{12} ของวัสดุผสมเส้นใยชนิดต่างๆ	83
4.15 ค่าสมบัติทางกลที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี การทดสอบและ % ค่าความคลาดเคลื่อน	83

รายการภาพประกอบ

รูปที่	หน้า
1.1 หน้าตัดรูปแบบการทอแบบ 3 มิติ ชนิด 3D orthogonal	2
1.2 หน้าตัดรูปแบบการทอแบบ 3 มิติ ชนิด 3D angle-interlock	2
1.3 เครื่องวัดแบบ Puncture resistance test	3
1.4 เครื่องวัดแบบ Drop test	3
1.5 แสดงลักษณะโครงสร้างการทอ	4
1.6 ผลการทดสอบการกระแทกของกระสุนน้ำหนัก 78 กรัม ที่ความเร็ว 1000 เมตรต่อวินาที ของชิ้นทดสอบการทอแบบ 3 มิติ และแบบ 2 มิติ	5
1.7 ตัวอย่างโครงสร้างการทอแบบ 2 มิติ	6
1.8 ตัวอย่างโครงสร้างการทอแบบ 3 มิติ	6
1.9 ลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะที่เปลี่ยนแปลง	7
1.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะที่เปลี่ยนแปลงของเส้นใยทอแบบ 3 มิติ (ซ้าย) และแบบลามิเนต 2 มิติ (ขวา)	7
1.11 แสดงความสัมพันธ์ของแรงกระแทกกับจำนวนครั้งทดสอบวัสดุผสมของเส้นใย S-glass	8
1.12 แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานที่กระจายตัวกับจำนวนครั้งทดสอบวัสดุผสม ของเส้นใย S-glass	9
2.1 โครงสร้างโมเลกุลของไนลอน 6,6	14
2.2 โครงสร้างโมเลกุลของไนลอน 6	14
2.3 โครงสร้างโมเลกุล MPIA	16
2.4 โครงสร้างโมเลกุล PPTA	17
2.5 โครงสร้างโมเลกุล TPC และ PDA	17
2.6 โครงสร้างบางส่วนของอีพ๊อกซี่	20
2.7 โครงสร้างของโพลีเอมีน	21
2.8 โครงสร้างทางเคมีของอีพ๊อกไซด์เรซิน (n คือจำนวนหน่วยย่อย อยู่ระหว่าง 0–25 หน่วย)	21
2.9 เครื่องทอพื้นฐานสำหรับการทอแบบ 2 มิติ	25
2.10 รูปแบบการทอแบบ 2 มิติ	25
2.11 แสดงการทอเส้นใยแบบ 3 มิติ	26
2.12 รูปแบบการทอแบบ 3 มิติ	27

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.14 รูปแบบโครงสร้างการทอแบบ 3D orthogonal	27
2.15 แสดงรูปแบบโครงการทอแบบ 3D angle-interlock (a) ชนิด layer to layer (b) แสดงโครงสร้างกระบวนการทอแบบ 3 มิติ	28
2.16 แสดงรูปแบบโครงการทอแบบ 3D angle-interlock ชนิด through-thickness	29
2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุผสมทอแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ	30
2.18 ผลของพลังงานการกระแทกกับ (a) ความเค้นของการดัด และ (b) ความเค้นของการอัด	31
2.19 ทิศทางของแนวแกนหลักของวัสดุ	33
2.20 แผ่นลามิน่าบนแกน 1-2 ที่หมุนทำมุม θ กับแกนอ้างอิง X-Y	35
2.21 ลามิเนตแบบสมมาตรและชั้นแต่ละชั้นของลามิเนต	37
2.22 แรงลัพธ์ที่กระทำบนแผ่นลามิเนต	38
2.23 รูปแบบหน่วยเซลล์สำหรับวัสดุผสมการทอแบบ 3D orthogonal	43
2.24 เส้นใยตามแนวยาวและขวางในหน่วยเซลล์	43
2.25 เส้นใยแนวแกน Z ในหน่วยเซลล์	44
3.1 เครื่องจัดมัดเส้นใย	49
3.2 เครื่องทอขึ้นรูปเส้นใย	50
3.3 หัวเจาะชิ้นทดสอบ	51
3.4 ฐานจับยึดชิ้นทดสอบ	52
3.5 เครื่องทดสอบความแข็งแรงวัสดุ	53
3.6 รูปแบบการทอแบบ 3D orthogonal	54
3.7 รูปแบบการทอแบบ 3D angle-interlock	54
3.8 แผนภาพกิจกรรมหลักของงานวิจัย	55
3.9 การวางเส้นใยทอในแนวตามยาว	56
3.10 การทาอีพ๊อกซี่ด้วยแปลง	56
3.11 ลูกกลิ้งสำหรับไล่ฟองอากาศ	56
3.12 การรีดไล่ฟองด้วยลูกกลิ้งเหล็ก	56
3.13 แผ่นฟิล์มไมล่าร์ (Mila) ที่มาประกบบนชิ้นงานที่ทาอีพ๊อกซี่เสร็จแล้ว	57
3.14 ชิ้นงานที่อีพ็อกซี่แข็งตัว (ขึ้นเป็นวัสดุผสมเสร็จแล้ว)	57
3.15 การทดสอบความต้านทานต้านแรงดึง	58

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.16 ขนาดชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3039 58
3.17 ชุดทดสอบ Puncture resistance test ที่ติดตั้งบนเครื่องทดสอบความแข็งแรงวัสดุ 59
4.1 กราฟแสดงการทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใย E-glass ที่ความเร็ว 0.005 และ 0.083 เมตรต่อวินาที 60
4.2 กราฟแสดงการทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยไนล่อนทั้ง 2 แบบ ภายใต้การรับแรงกระแทกสูงสุด ในโครงสร้างการทอแบบ 3-D orthogonal 61
4.3 กราฟแสดงการทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยไนล่อนทั้ง 2 แบบ ภายใต้การรับแรงกระแทกสูงสุดในโครงสร้างการทอแบบ 3-D angle-interlock 62
4.4 กราฟแสดงการทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุของวัสดผสมทำมาจากเส้นใยไนล่อนทั้ง 2 แบบ ภายใต้การรับแรงกระแทกสูงสุด ในโครงสร้างการทอแบบ 3-D orthogonal และแบบ 3-D angle-interlock 63
4.5 กราฟแสดงค่าความต้านการเจาะทะลุจำเพาะของวัสดุผสมทำจากเส้นใยไนล่อนทั้ง 2 แบบ รูปแบบการทอแบบ 3-D orthogonal กับ 3-D angle-interlock 65
4.6 กราฟแสดงความสามารถการต้านทานการเจาะทะลุของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยชนิดต่างๆ ในรูปแบบการทอแบบ 3-D orthogonal จนชิ้นทดสอบเกิดการทะลุ 67
4.7 กราฟแสดงสัมพันธ์ของแรงต่อความหนาแน่นเชิงพื้นที่ที่ระยะยืดต่างๆ 68
4.8 กราฟแสดงพลังงานดูดซับกับระยะยืดของวัสดุผสมที่ทำมาจากเส้นใยชนิดต่างๆ 69
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานดูดซับจำเพาะกับค่าความสามารถต้านทานการเจาะทะลุจำเพาะของวัสดุผสมที่ทำมาจากเส้นใยชนิดต่างๆ 70
4.10 กราฟแสดงความสามารถการต้านทานการเจาะทะลุของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยทอผสานร่วม 72
4.11 กราฟแสดงพลังงานดูดซับกับระยะยืดของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยทอผสานร่วม 73
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานดูดซับจำเพาะกับค่าความสามารถต้านทานการเจาะทะลุของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยทอผสานร่วม 74
4.13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยทอเดียวกับเส้นใยทอผสานร่วม 75
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานดูดซับจำเพาะกับค่าความสามารถต้านทานการเจาะทะลุจำเพาะของวัสดุผสมที่ทำมาจากเส้นใยทอเดี่ยวกับเส้นใยทอผสานร่วม 76

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของเส้นใยชนิดต่างๆ	77
4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใย E-glass แบบชั้นเดียว	78
4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดในแนวขวางกับค่าความเครียดในแนวยาวของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใย E-glass แบบชั้นเดียว	79
4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยไนล่อน twine แบบลามิเนตจำนวน 2 ชั้น	80
4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดในแนวขวางกับค่าความเครียดในแนวยาวของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยไนล่อน twine แบบลามิเนตจำนวน 2 ชั้น	80
4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดแบบลามิเนตร่วมของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใย E-glass กับเส้นใยไนล่อน twine จำนวน 2 ชั้น	81
4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดในแนวขวางกับค่าความเครียดในแนวยาวแบบลามิเนตร่วมของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใย E-glass กับเส้นใยไนล่อน twine จำนวน 2 ชั้น	81
5.1 ภายในของชิ้นทดสอบวัสดุผสมเส้นใยแก้วทอที่ทำการแยกชั้นออก	86

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

E_f	มอดูลัสยืดหยุ่นของเส้นใย
E_m	มอดูลัสยืดหยุ่นของเมตริกซ์
E_1	มอดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุผสมตามแนวยาวของเส้นใย
E_2	มอดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุผสมตามแนวขวางของเส้นใย
ν_f	สัดส่วนปัวส์ซองของเส้นใย
ν_m	สัดส่วนปัวส์ซองของเมตริกซ์
ν_{12}	สัดส่วนปัวส์ซองของวัสดุผสม
V_f	สัดส่วนปริมาตรของเส้นใยต่อปริมาตรทั้งหมดของวัสดุผสม
V_m	สัดส่วนปริมาตรของเมตริกซ์ต่อปริมาตรทั้งหมดของวัสดุผสม
G_f	มอดูลัสเฉือนของเส้นใย
G_m	มอดูลัสเฉือนของเมตริกซ์
G_{12}	มอดูลัสเฉือนของวัสดุผสมในระนาบอ้างอิง
ε_1	ความเครียดของวัสดุผสมตามแนวยาวของเส้นใย
ε_2	ความเครียดของวัสดุผสมตามแนวขวางของเส้นใย
σ_1	ความเค้นของวัสดุผสมตามแนวยาวของเส้นใย
σ_2	ความเค้นของวัสดุผสมตามแนวขวางของเส้นใย
τ_{12}	ความเค้นเฉือนของวัสดุผสมในระนาบอ้างอิง
[C]	Stiffness matrix
$[\overline{C}]$	Transformation stiffness matrix
[S]	Compliance matrix
[T]	Transformation matrix
$[\overline{S}]$	Transformed compliance matrix
$E_{absorbed}$	พลังงานดูดซับ
$\overline{E}_{x,average}$	ค่าเฉลี่ยมอดูลัสในแนวแกน X
ν_{xy}	สัดส่วนปัวส์ซองในแนวแกน XY
ρ	ความหนาแน่น

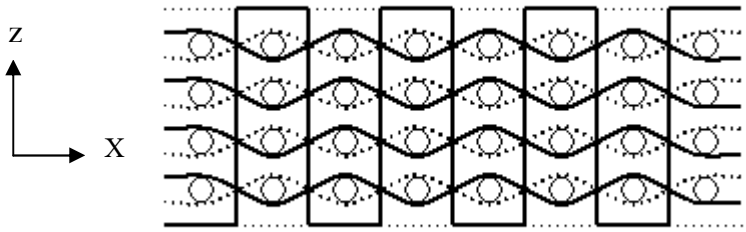
บทที่ 1

บทนำ

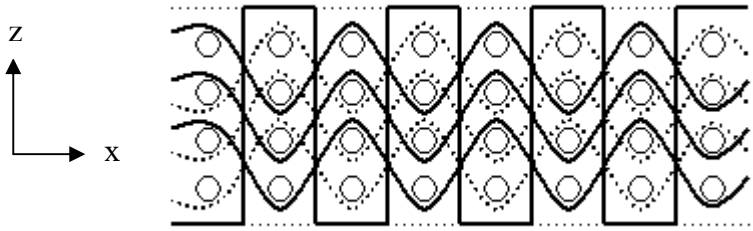
1.1 บทนำต้นเรื่อง

ในปัจจุบันนี้วัสดุผสมประเภทเสริมแรงด้วยเส้นใยทอ (Woven fabric composite) ได้มีบทบาทมากขึ้นในงานอุตสาหกรรม เพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ชิ้นงานในอุตสาหกรรมยานยนต์ ได้แก่ หลังคารถกระบะ เรือ เครื่องบินเล็ก ชิ้นส่วนรถแข่ง เป็นต้น สำหรับงานด้านโยธา ได้แก่ พื้นสังเคราะห์ (geosynthetics) แผ่นกันกระแทกในผนังคอนกรีต เป็นต้น และใช้เป็นวัสดุกันกระสุนอีกด้วย เนื่องจาก วัสดุผสมประเภทเสริมแรงด้วยเส้นใยผ้าทอ (Woven fabric composite) มีข้อดีในแง่ของความทนทานต่อการเปลี่ยนรูป (stiffness) การรับและกระจายแรง (stress and stress distribution) แล้วยังมีความเหนียว (toughness) ที่ดี ส่วนเสริมแรงที่เป็นเส้นใยผ้าทอที่ใช้โดยทั่วไปเป็นการทอสานในรูปแบบ 2 มิติ (2-D woven fabric) เป็นพื้นฐานจากการทอที่ง่าย มีหลายรูปแบบ ได้แก่ weave, satin weave, twill เป็นต้น อย่างไรก็ตามเป็นที่ยอมรับว่าวัสดุที่มีการทอสานขึ้นรูปแบบ 3 มิติ (3-D woven fabric) ให้สมบัติที่เหนือกว่าการทอสานแบบ 2 มิติมาก ตัวอย่างรูปแบบการทอสานแบบ 3 มิติ เช่น 3-D orthogonal weaves, 3-D braids และ angle-interlock weaves ซึ่งปัจจุบันนี้บริษัท 3TEX ได้พัฒนานำมาใช้ แต่ด้วยข้อจำกัดด้านกรรมวิธีการทอที่ซับซ้อนจึงไม่มีการใช้งานกันมากนัก แต่จะเป็นการใช้งานเฉพาะอย่างเท่านั้นเช่น วัสดุกันกระสุน ใบพัดกังหันลม วัสดุกันสะเก็ดระเบิด ใบพัดเครื่องบิน เป็นต้น ดังนั้นวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยทอสานแบบ 3 มิติที่ผลิตขึ้นเพื่อต้องการความแข็งแรง ดูดซับพลังงานพุ่งชนได้ดี ทนความล้าได้ดี มีน้ำหนักเบา เหมาะแก่การใช้ทำแผ่นวัสดุซึ่งเป็นองค์ประกอบในเสื้อเกราะกันกระสุนหรือวัสดุกันกระแทกอื่นๆ ได้

จากการขึ้นรูปวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใย (Fiber reinforced composites) นั้น ส่วนใหญ่จะมีการทอขึ้นรูปเส้นใยเบื้องต้น (Preform) สำหรับจับยึดของเส้นใยและสามารถกระจายแรงกระทำจากภายนอกได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามจากการศึกษา พบว่า การขึ้นรูปแบบ 3 มิติให้สมบัติทางกลที่ดีกว่าการขึ้นรูปแบบ 2 มิติ ดังนั้นจึงเน้นศึกษาการทอเส้นใยเบื้องต้นเป็นแบบ 3 มิติโดยจะทำการวิเคราะห์ เปรียบเทียบรูปแบบการทอแบบ 3 มิติ ทั้ง 2 รูปแบบ (ดังแสดงในรูปที่ 1.1และ1.2) ซึ่งมีเส้นใยในทิศ z และมุมด้ายที่จับยึดโครงสร้างเพื่อป้องกันการแยกชั้น โดยจะนำไปประยุกต์ในการขึ้นรูปเป็นวัสดุผสมต่อไป

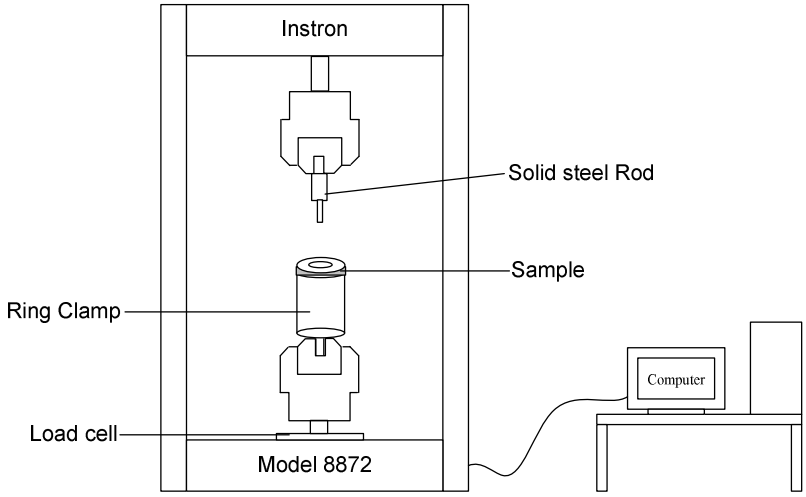


รูปที่ 1.1 หน้าตัดรูปแบบการทอแบบ 3 มิติ ชนิด 3D orthogonal

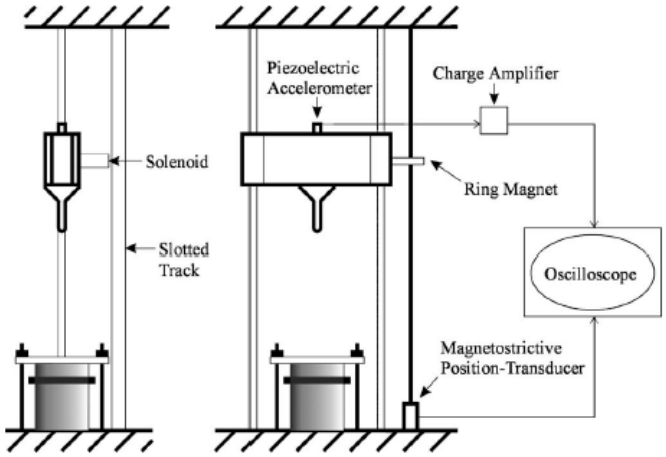


รูปที่ 1.2 หน้าตัดรูปแบบการทอแบบ 3 มิติ ชนิด 3D angle-interlock

การทดสอบวัสดุป้องกัน (Protective materials) ที่สำคัญนอกจากสมบัติพื้นฐาน เช่น ความหนาแน่น น้ำหนัก ความแข็งแรงแล้วยังประกอบด้วยการทดสอบที่สำคัญอีกประการ คือ 1) ความต้านทานการเจาะทะลุผ่าน (Punctuation resistance test, ASTM D4833) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 1.3 เป็นการทดสอบความต้านทานของวัสดุที่ความเร็วต่ำ ซึ่งการทดสอบความต้านทานการทะลุผ่านสามารถประยุกต์ใช้เครื่องทดสอบความแข็งแรงวัสดุได้โดยอาศัยหลักการทำนองเดียวกับการทดสอบการกระแทกโดยวิธีการทำ Drop test ดังแสดงในรูปที่ 1.4 เป็นการวัดพลังงานการตกกระทบในลักษณะปล่อยแบบอิสระแต่ในการทดสอบความต้านทานการทะลุผ่านจะใช้วิธีการบังคับให้หัวกระแทกพุ่งด้วยความเร็วตามกำหนดและสามารถวัดความเร็วตกกระทบด้วย Displacement transducer และข้อเปรียบเทียบระหว่าง Drop test กับ Puncture resistance test แสดงดังตารางที่ 1.1



รูปที่ 1.3 เครื่องวัดแบบ Puncture resistance test



รูปที่ 1.4 เครื่องวัดแบบ Drop test

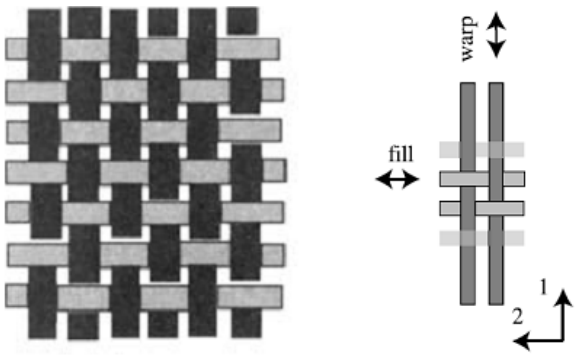
ตารางที่ 1.1 ข้อเปรียบเทียบระหว่าง Drop test กับ Puncture resistance test

คุณสมบัติ	**Drop test**	**Puncture resistance test**
แรงหรือน้ำหนักในกระแทกและลักษณะข้อมูลที่ได้	มีค่าคงที่อยู่ในรูปของพลังงานกระแทก	ไม่คงที่อยู่ในรูปความสมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด
ความเร็วที่ใช้ในการทดลอง	สูงกว่า Puncture resistance test (5 m/s)	ต่ำกว่า Drop test (0.005-0.083 m/s)
Product ที่ใช้	Geotextile	Geotextile, Geomember

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเพื่อศึกษาใช้วัสดุและเส้นใยที่จัดหาได้ ไม่มีข้อห้ามในการนำเข้า ราคาไม่แพง สามารนำมาพัฒนาใช้ทดแทน โดยจะศึกษาถึงชนิดของเส้นใย ผลของโครงสร้างการทอแบบ 3 มิติ ความหนาแน่นเชิงพื้นที่หรือค่ามวลรวมต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ และศึกษาความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุ

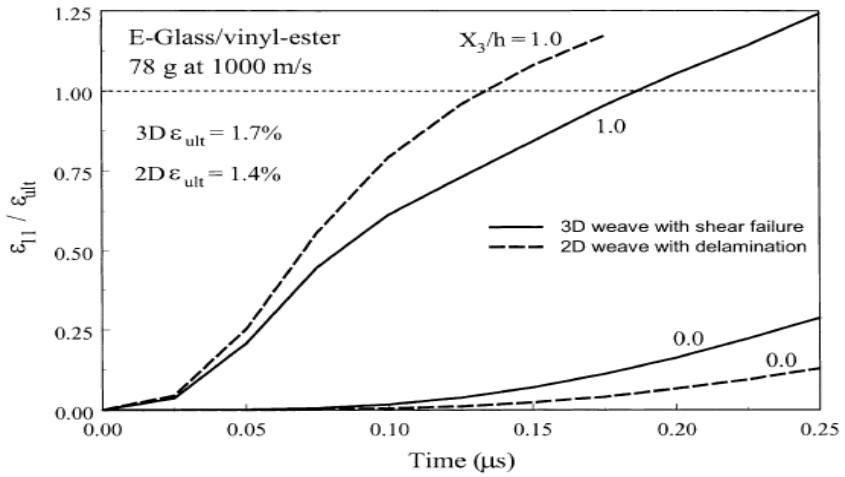
1.2 การตรวจเอกสาร

- Mohammed F. Aly, I.G.M. Goda, and Galal A. Hassan (2010) การสืบค้นการทดลองทางลักษณะพลวัตของคานลามิเนตคอมโพสิตเป็นส่วนประกอบโครงสร้างพื้นฐานที่ใช้ในงานหลากหลายทางโครงสร้างทางวิศวกรรมและอุตสาหกรรมโยธา องค์ประกอบที่สำคัญในการวิเคราะห์แบบไดนามิกของคานเชิงประกอบคือ คำนวณจากความถี่ธรรมชาติของคานและรูปร่างซึ่งโครงสร้างคานคอมโพสิตมักจะทำงานที่ซับซ้อนและมีการเคลื่อนที่แบบไดนามิก และให้ใช้งานได้สำหรับพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของคานคอมโพสิต ด้วยเหตุนี้คานบางผลิตโดยใช้กระบวนการทำวัสดุผสมด้วยวิธีทามือ lay-up เรซินบน เส้นใยแก้วทอชนิด E – glass ที่มีค่าน้ำหนักต่อพื้นที่ เท่ากับ 360 g/m^2 จะใช้เป็นตัวเสริมแรงในรูปแบบของผ้าทอแบบสองมิติที่มีทิศทางที่ตั้งฉากกัน คือ ทิศทางตามยาว (Warp) ทิศทางตามขวาง (fill or weft) นำเส้นใยในทิศทางทั้งสองมาทอเข้าด้วยกัน โดยใช้เส้นใยตามขวางเป็นทิศทางหลักและแทรกด้วยเส้นใยตามยาว ซึ่งถูกกำหนดด้วยลวดลายตามรูปแบบการทอ ในรูปที่ 1.5 แสดงระนาบของการทอที่ประกอบด้วยเส้นใยตามขวางและตามยาวและโดยมีเรซินสังเคราะห์เป็นส่วนเมตริกซ์สำหรับวัสดุคอมโพสิตของคาน



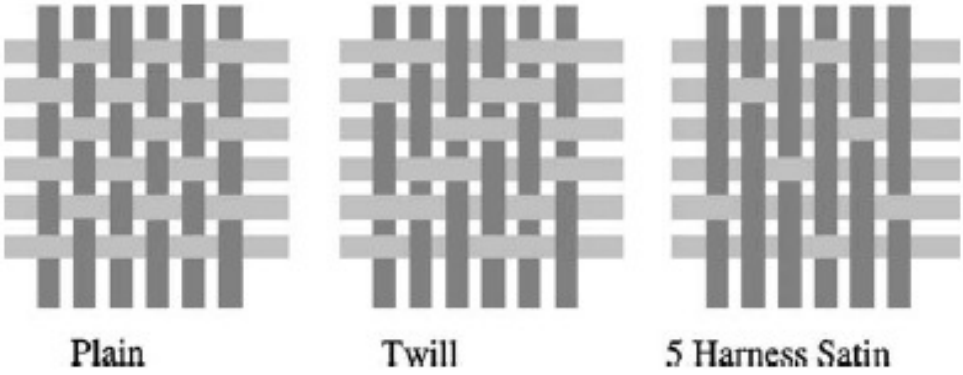
รูปที่ 1.5 แสดงลักษณะโครงสร้างการทอ

- Yehia A, Bahei-El-Din และ Zikry (2003) ได้ศึกษาการเสียรูปจากการกระแทกในวัสดุผสมที่ขึ้นรูปแบบการทอ 2 และ 3 มิติ พบว่า วัสดุผสมดังกล่าวเกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากผลของการกระแทกทำให้เกิดการทะลุผ่านส่วนวัสดุผสมที่ขึ้นรูปแบบ 3 มิติ แต่ไม่พบการแยกชั้น (delaminate) ของเส้นใยและสามารถป้องกันการทะลุผ่านดีกว่าแบบ 2 มิติ ค่าความเครียดที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากความเสียหายจากแรงเฉือนที่มีผลกระทบต่อชิ้นทดสอบคอมโพสิตทอแบบ 2 มิติ มากกว่ากว่าชิ้นทดสอบคอมโพสิตทอแบบ 3 มิติ ดังรูปที่ 1.6 ความเร็วในการกระแทกที่ 1000 m/s ทำให้เกิดความเสียหายของเส้นใยในการขยายตัวหรือยืดตัว โดยค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียดจนขาดชิ้นทดสอบทอแบบ 3 มิติ เท่ากับ 1.7 % และการทอแบบ 2 มิติ เท่ากับ 1.4 % ซึ่งรูปแบบ 3 มิติ มีค่าอัตราความเครียดมากกว่า 2 มิติ อยู่ประมาณ 21.43 %

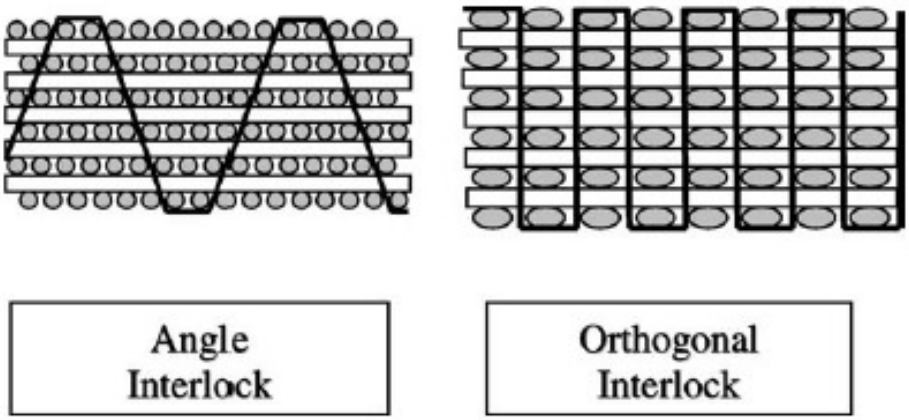


รูปที่ 1.6 ผลการทดสอบการกระแทกของกระสุนน้ำหนัก 78 กรัม ที่ความเร็ว 1000 เมตรต่อวินาที ของชิ้นทดสอบการทอแบบ 3 มิติ และแบบ 2 มิติ

- D. Brown, M. Morgan และ R. McIlhagger (2003) ได้ศึกษารูปแบบโครงสร้างการทอระหว่างวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยทอแบบ 2 มิติ และ แบบ 3 มิติ โดยการกำหนดมิติของโครงสร้างจากความสามารถในการส่งผ่านภาระ (load) ในสองหรือสามทิศทาง ตัวอย่างโครงสร้างการทอแบบ 2 มิติ ได้แก่ Orthogonal plain, twill และ satin weaver แสดงในรูปที่ 1.7 ซึ่งโครงสร้างการทอแบบ 2 มิติมีความสามารถในการส่งผ่านภาระได้พร้อมกันทั้ง 2 ระนาบที่ตั้งฉากกันในแนวแกน X และแกน Y หรือตามยาวและตามขวาง ส่วนในโครงสร้างการทอแบบ 3 มิติ ได้แก่ angle interlock และ orthogonal interlock ดังแสดงในรูปที่ 1.8 รูปแบบการทอเหล่านี้ สามารถส่งผ่านแรงในทิศทาง แกน X แกน Y และ แกน Z ซึ่ง orthogonal interlock เป็นระบบการทอกรณีพิเศษที่ต่างจาก การทอแบบ angle interlock โดยการทอสานเชื่อมโยงเส้นใยกันในแนวแกน Z ซึ่งตั้งฉากกับเส้นใยตามยาว

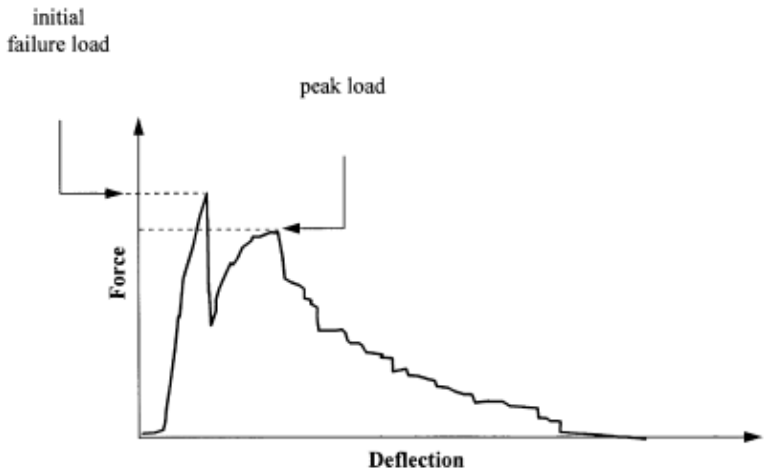


รูปที่ 1.7 ตัวอย่างโครงสร้างการทอแบบ 2 มิติ



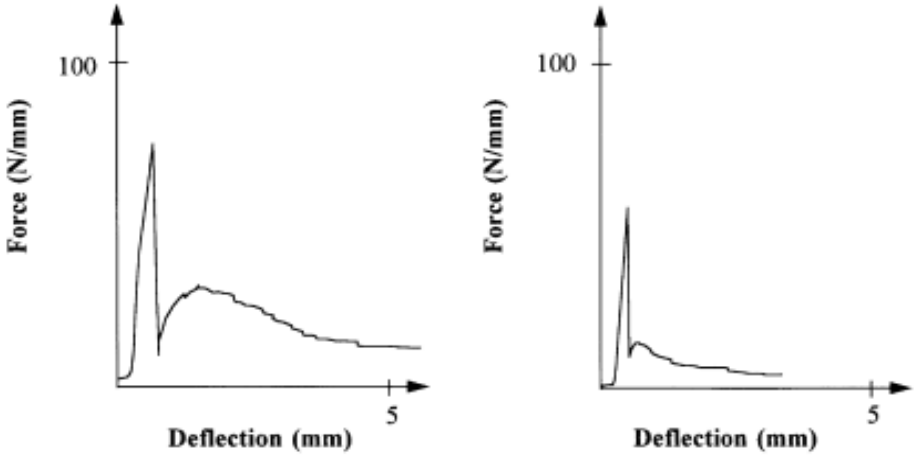
รูปที่ 1.8 ตัวอย่างโครงสร้างการทอแบบ 3 มิติ

- J. A. Soden, G. Weissenbach และ B. J. Hill (1999) ศึกษาความเสียหายของชิ้นทดสอบรูปตัว T ที่ขึ้นเป็นวัสดุผสมรูปแบบ 3มิติ เปรียบเทียบกับวัสดุผสมที่ขึ้นรูปแบบ 2มิติลามิเนต ภายใต้การรับแรงสูงสุดโดยผลการทดสอบได้แสดงในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งแรงที่ทำให้เกิดรอยเสียหายเริ่มต้น (initial failure load) และแรงสูงสุด (peak load) ที่ทำให้ชิ้นทดสอบเสียหายหลังจากรอยเสียหายแรก ดังแสดงในรูปที่ 1.9



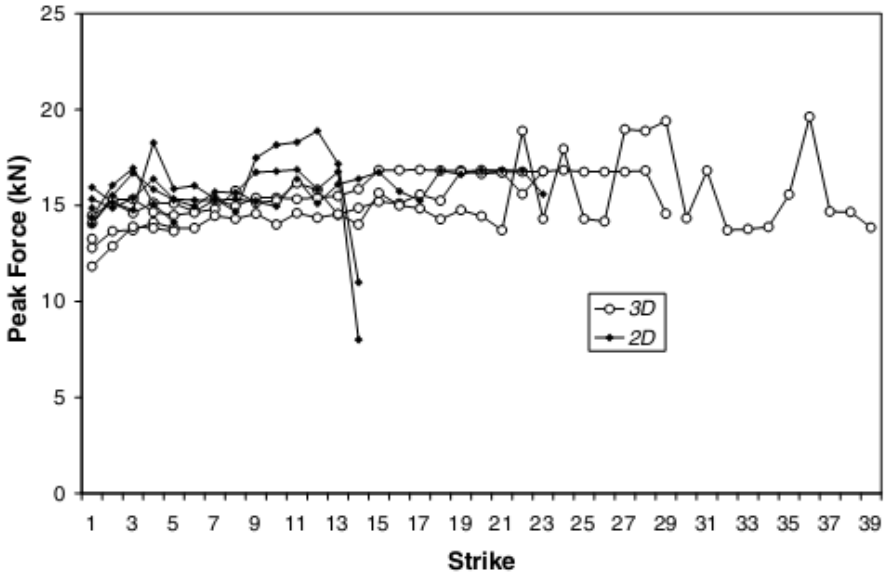
รูปที่ 1.9 ลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะที่เปลี่ยนแปลง

แรงที่ทำให้เกิดรอยเสียหายเริ่มต้นคือ ส่วนที่เรซิ่นที่เป็นเมตริกซ์ถูกทำลาย และแรงสูงสุดที่ทำให้เกิดความเสียหายหลังจากนั้น คือ ส่วนที่ให้เส้นใยทอถูกทำลาย ซึ่งในการทดสอบชิ้นทอสอบเป็นเส้นใยทอแบบ 3 มิติ และชิ้นทดสอบแบบลามิเนต 2 มิติ พบว่า เปอร์เซ็นต์อัตราส่วนระหว่างแรงที่ทำให้เกิดรอยเสียหายเริ่มต้นกับแรงสูงสุด แบบเส้นใยทอแบบ 3 มิติ มีค่าอยู่ประมาณ 106–264 % ส่วนลามิเนต 2 มิติ มีค่าประมาณ 23 % ดังนั้น วัสดุผสมเส้นใยทอแบบ 3 มิติ สามารถรับแรงได้มากกว่าแบบลามิเนต 2 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 1.10



รูปที่ 1.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะที่เปลี่ยนแปลงของเส้นใยทอแบบ 3 มิติ (ซ้าย) และแบบลามิเนต 2 มิติ (ขวา)

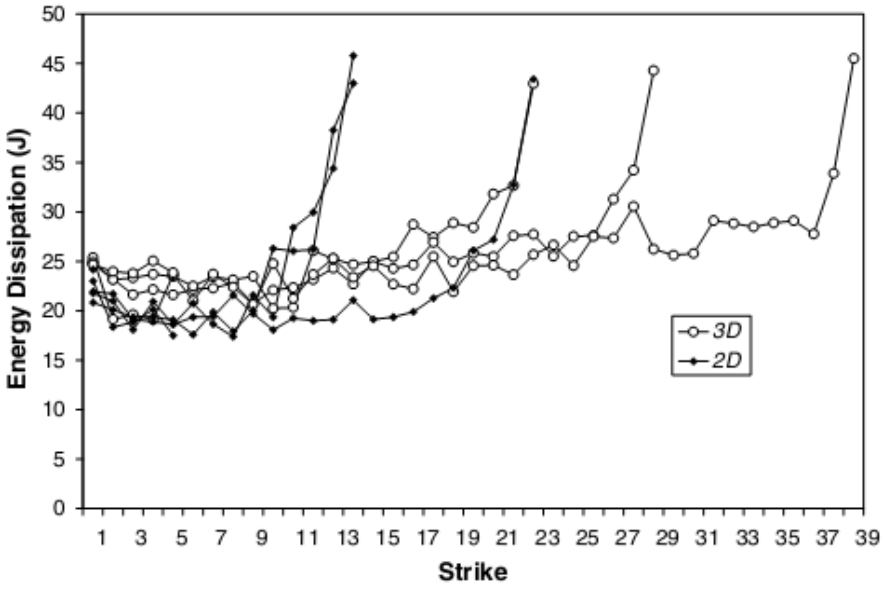
- J.N. Baucom, M.A. Zikry และ A.M. Rajendran (2006) ได้ศึกษาถึงผลของรูปแบบการทอของเส้นใยแก้ว ชนิด S-glass ต่อความเสียหายจากการทดสอบการกระแทกที่ความเร็วต่ำแบบ drop-weight โดยได้เปรียบเทียบวัสดุผสมทั้งที่มีการขึ้นรูปแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ วัสดุในแต่ละแบบถูกทดสอบซ้ำ ๆ ที่ความเร็วการกระแทก 4.0 m/s จนกว่าชิ้นทดสอบทะลุ ชิ้นทดสอบ 2 มิติ ลามิเนต ถูกทดสอบซ้ำ ๆ ในแต่ละชิ้น จำนวน 11, 14 และ 23 ครั้ง จนชิ้นทดสอบทะลุ ส่วนทดสอบ 3 มิติ ถูกทดสอบซ้ำ ๆ ในแต่ละชิ้น จำนวน 23, 29 และ 39 ครั้ง โดยแรงสูงสุดสำหรับการทดสอบการกระแทกทั้งหมด ได้แสดงในรูปที่ 1.11 ชิ้นทดสอบ 2 มิติ ลามิเนต รับแรงสูงสุดในช่วงเริ่มต้นในช่วงประมาณ 14 – 16 kN ในขณะที่แรงสูงสุดเริ่มต้นของชิ้นทดสอบแบบ 3 มิติ อยู่ในช่วงประมาณ 12 - 14 kN และแรงสูงสุดสำหรับทุกตัวอย่างมีค่าประมาณ 18 kN



รูปที่ 1.11 แสดงความสัมพันธ์ของแรงกระแทกกับจำนวนครั้งทดสอบวัสดุผสมของเส้นใย S-glass

ความเร็วที่วัดได้และความเร่งถูกนำมาใช้เพื่อหาค่าพลังงานดูดซับจากการกระแทกแต่ละครั้ง ในรูปที่ 1.12 สำหรับ 2 มิติ ลามิเนตการดูดซับพลังงานที่ปะทะเริ่มต้นประมาณ 21 – 24 จูล และแบบ 3 มิติ มีการดูดซับพลังงานเริ่มต้นอย่างสม่ำเสมอที่ 25 จูล แสดงให้เห็นว่า แบบ 3D ทนทานต่อความเสียหายได้มากกว่าแบบ 2 มิติ ลามิเนต การกระจายพลังงานของการกระแทกทั้งหมดสำหรับตัวอย่างที่เจาะทะลุ วัสดุผสมแบบ 3 มิติ พลังงานดูดซับในการกระแทกครั้งแรก มีค่าเฉลี่ย 777 จูล พลังงานดูดซับมีค่าเป็น 2 เท่าของแผ่น ลามิเนต แบบ 2 มิติ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของการกระจายพลังงานดูดซับเป็น 393 จูล พบว่าความเสียหายจากการกระจายตัวของร่องรอยความเสียหายที่เกิดขึ้นในวัสดุผสมขึ้นรูปแบบ 3 มิติ การกระจายตัวแรงและการดูดซับพลังงาน

มากกว่าแบบ 2 มิติ สรุปได้ว่ารูปแบบ 3 มิติ สามารถต้านทานการทะลุผ่านได้ดีกว่าการขึ้นรูปแบบ 2 มิติ



รูปที่ 1.12 แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานที่กระจายตัวกับจำนวนครั้งทดสอบวัสดุผสมของเส้นใย S-glass

1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.3.1 เพื่อนำเส้นใยที่จัดหาได้ ไม่มีข้อห้ามในการนำเข้า มาประยุกต์ใช้ในการต้านทานการเจาะทะลุ

1.3.2 เพื่อศึกษาชนิดเส้นใย โครงสร้างการทอ ที่มีความสามารถในต้านทานการเจาะทะลุได้ดี

1.3.3 ขึ้นรูปวัสดุผสม ทดสอบและเปรียบเทียบผลความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุกับค่ามวลรวมต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (Areal Density)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทำให้ทราบถึงผลของโครงสร้างการทอและชนิดของเส้นใยที่มีต่อความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุได้ดีที่สุด

1.4.2 เผยแพร่งานทางวิชาการ 1 เรื่อง

1.4.3 ได้วัสดุที่ต้านทานการเจาะทะลุได้ดีที่สุดเพื่อนำไปสู่การพัฒนาเป็นแผ่นกันกระสุน

1.4.4 วัสดุที่ได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในด้านการพัฒนาวัสดุสำหรับการผลิตเป็นเสื้อเกราะกระสุน

1.5 ขอบเขตของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้จะเน้นถึงการนำเส้นใยและวัสดุที่มีในประเทศโดยมีขอบเขตของการวิจัยดังนี้

1.5.1 เส้นใยที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้มี 3 ชนิดคือ เส้นใยแก้ว เส้นใยไนล่อน และเส้นใยเคฟล่าร์ (Kevlar brand fiber)

1.5.2 รูปแบบของการทอขึ้นรูปที่ศึกษามี 2 ชนิดคือ 3D angle-interlock และ 3D orthogonal

1.5.3 การขึ้นรูปวัสดุผสมจะใช้เรซิ่นเพียงชนิดเดียวคือ อีพ๊อกซี่

1.5.4 ศึกษาข้อมูลการทดสอบมาตรฐาน อุปกรณ์ เครื่องทดสอบที่จำเป็นต้อง ใช้ในการทดสอบวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยทอ

15.5 ศึกษาทฤษฎีการคำนวณเกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุผสม เพื่อนำมาเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผล

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 เส้นใย (Fiber) [วิทยาศาสตร์เส้นใย, วีระศักดิ์ อุดมเดชา. 2542]

2.1.1 ความหมายของเส้นใย

เส้นใย หมายถึง วัสดุหรือสารใดๆทั้งที่เกิดจากธรรมชาติและมนุษย์สร้างขึ้น ที่มีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับหรือมากกว่า 100 สามารถขึ้นรูปเป็นผ้าได้ และต้องเป็นองค์ประกอบที่เล็กที่สุดของผ้า ไม่สามารถแยกย่อยในเชิงกลได้อีก ซึ่งมีมิติตามความยาวมากกว่ามิติตามภาคตัดขวาง และลักษณะเป็นเส้นยาวเรียว องค์ประกอบของเซลล์ ส่วนใหญ่เป็นเซลลูโลส เกิดจากการรวมตัวของกลูโคส (glucose) ของพอลิแซคคาไรด์ (polysaccharide) หรือโมเลกุลเป็นพอลิเมอร์ที่ยาว โมเลกุลของเซลลูโลสเรียงตัวกันในผนังเซลล์ของพืชเป็นหน่วยเส้นใยขนาดเล็กมาก เกิดการเกาะจับตัวกันเป็นเส้นใยขึ้น

2.1.2 ประเภทของเส้นใย

โดยทั่วไปสามารถจำแนกประเภทของเส้นใยได้หลายแบบขึ้นอยู่กับลักษณะการแบ่ง ในที่นี้เราแบ่งตามแหล่งกำเนิดของเส้นใยซึ่งจะแบ่งได้เป็นสามประเภทใหญ่ๆ คือ เส้นใยธรรมชาติ เส้นใยสังเคราะห์ และเส้นใยกึ่งสังเคราะห์ ในกลุ่มของเส้นใยธรรมชาติก็ยังแบ่งย่อยได้อีกเป็นเส้นใยที่มาจากพืช สัตว์ และแร่ ส่วนเส้นใยสังเคราะห์ เป็นเส้นใยที่ประดิษฐ์จากวัสดุอื่นๆ ที่มนุษย์สร้างขึ้น

1. เส้นใยจากธรรมชาติ ได้แก่ เส้นใยที่มีอยู่ในธรรมชาติ แบ่งได้เป็น

1) เส้นใยจากพืช ได้แก่ เส้นใยจากเซลลูโลส เป็นเส้นใยที่ประกอบด้วยเซลลูโลส ซึ่งได้จากส่วนต่างๆ ของพืช เช่น ป่าน ปอ ลินิน ใยสับปะรด ใยมะพร้าว ฝ้าย นุ่น ศรนารายณ์ เป็นต้น เซลลูโลสเป็น โฮโมพอลิเมอร์ ประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคสจำนวนมาก มีโครงสร้างเป็นกิ่งก้านสาขา

2) เส้นใยจากสัตว์ ได้แก่ เส้นใยโปรตีน เช่น ขนสัตว์ ไหม ผม เล็บ เขา ใย ไหม เป็นต้น เส้นใยเหล่านี้ มีสมบัติ คือ เมื่อเปียกน้ำ ความเหนียวและความแข็งแรงจะลดลงถ้าสัมผัสแสงแดดปั่นนานๆ จะสลายตัว

3) เส้นใยจากสินแร่ เช่น แร่ใยหิน (asbestos) ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี ทนไฟ ไม่นำไฟฟ้า

2. เส้นใยสังเคราะห์ เป็นเส้นใยที่มนุษย์สังเคราะห์ขึ้นจากสารอนินทรีย์หรือสารอินทรีย์ใช้ทดแทนเส้นใยจากธรรมชาติ ตัวอย่างเช่น

1) เส้นใยพอลิเอสเตอร์ เช่น เทโทรอน ใช้บรรจุในหมอน เพราะมีความฟูยืดหยุ่นไม่เป็นอันตรายต่อผิวหนัง สำหรับดาครอน (Dacron) เป็นเส้นใยสังเคราะห์พวก พอลิเอส-เทอร์อีกชนิดหนึ่ง ซึ่งเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Mylar มีประโยชน์ทำเส้นใยทำเชือกและฟิล์ม

2) เส้นใยอะคริลิก เช่น สำหรับใช้ในการทำเสื้อผ้า ผ้านวม ผ้าขนแกะเทียม ร่มชายหาด หลังคากันแดด ผ้าม่าน พรม เป็นต้น

3) เซลลูโลสแอซีเตด เป็นพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากการใช้เซลลูโลสทำปฏิกิริยากับกรดอะซิติกเข้มข้น โดยมีกรดซัลฟูริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การใช้ประโยชน์จากเซลลูโลสอะซีเตด เช่น ผลิตเป็นเส้นใยอาร์แนล 60 ผลิตเป็นแผ่นพลาสติกที่ใช้ทำแผงสวิตช์และหุ้มสายไฟ

4) เส้นใยแก้ว (Glass fiber) หลักการผลิตเส้นใยแก้วเพื่อใช้ในสิ่งทอได้ถูกพัฒนามาเข้าสู่กระบวนการผลิตในเชิงพาณิชย์เมื่อปี 2481 โดยบริษัท โอเวนคอนนิง ไฟเบอร์กลาส (Owens-Corning Fiberglas, Crop.) ในประเทศสหรัฐอเมริกา และใช้ชื่อทางการค้าของผลิตภัณฑ์สิ่งทอที่ทำขึ้นว่า Fiber glass

การผลิตเส้นด้ายใยแก้วมีวิธีการใหญ่ๆ อยู่ 2 วิธี โดยทั้งสองวิธีนี้เริ่มจากการผสมวัตถุดิบให้ได้ตามสูตรที่ต้องการ ประกอบด้วย ทรายแก้ว หินปูน หินฟันม้า กรดบอริก และสารเติมแต่งอื่นๆ จากนั้นจึงทำการหลอมเหลวภายในเตาที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,370 °C ได้ออกมาเป็นลูกแก้วขนาดเล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5/8 นิ้ว (15 มิลลิเมตร) ทำการควบคุมคุณภาพของลูกแก้วที่ได้ เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนที่ไม่ต้องการออก หลังจากนั้นนำลูกแก้วมาหลอมใหม่เป็นน้ำแก้วแล้วปั่นเป็นเส้นใยต่อไป ส่วนอีกวิธีหนึ่ง เป็นการผลิตโดยตรงเมื่อหลอมวัตถุดิบในเตาไฟฟ้าแล้วทำการควบคุมคุณภาพในเวลาเดียวกันโดยไม่ต้องทำเป็นลูกแก้วก่อน นำแก้วที่ได้จากการหลอมส่งต่อเข้ากระบวนการรีดเป็นเส้นใยได้เลย

กระบวนการผลิตเส้นใยยาวต่อเนื่องทำการควบคุมให้น้ำแก้วไหลผ่านลงสู่หัวรีดที่ทนอุณหภูมิได้สูง โดยมากทำจากโลหะผสม เส้นใยยาวต่อเนื่องถูกดึงออกจากหัวรีด

โดยมีพัฒนาการนำการม้วนเก็บความเร็วสูง ซึ่งสูงกว่าความเร็วของใยแก้วที่ถูกอัดออกจากหัวรีดประมาณ 2 ไมล์ หรือ 3 กิโลเมตร ต่อนาที จึงทำให้ได้เส้นใยขนาดเล็กลงก่อนการแข็งตัว จากนั้นจึงนำไปตีเกลียวเป็นด้ายควบ

ข้อดี

- ทนทานต่อแรงดึง
- ทนอุณหภูมิสูง
- ทนทานต่อแสงแดด กันน้ำ รา และแมลง ตลอดจนด่างและกรดยกเว้น กรดไฮโดรฟลูโอริกและกรดฟอสฟอริกที่ร้อน

ข้อเสีย

- เส้นใยมีความแข็งกระด้าง ทำให้ยากต่อการดัดงอข้ามเส้นด้ายซึ่งกันและกันในโครงสร้างของผืนผ้า
- ไม่ทนทานต้องการขัดถู เนื่องจากเส้นใยเปราะได้ง่าย
- เส้นใยแก้วมีการยืดหยุ่นต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยชนิดอื่น

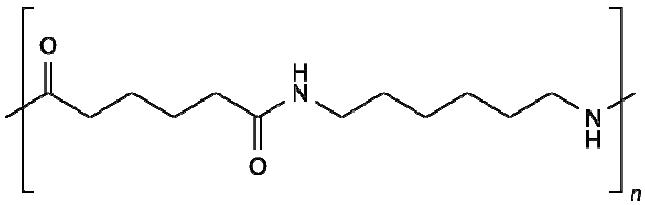
5) เส้นใยไนล่อน (Nylon fiber) เป็นเส้นใยชนิดแรกที่มนุษย์ค้นพบโดยบังเอิญ โดยบริษัท ดูปองท์ ในประเทศสหรัฐอเมริกา นักวิทยาศาสตร์ชื่อ Dr. Wallace H. Carothers และทีมงานให้ความสนใจกับงานวิจัยพื้นฐานเพื่อสร้างความเข้าใจถึงโครงสร้างโมเลกุลที่ต่อกันเป็นลูกโซ่ยาวและน้ำหนักโมเลกุลสูงเรียกว่าพอลิเมอร์เหมือนที่เกิดในโครงสร้างของเส้นใยธรรมชาติ เช่น ฝ้าย หรือไหม ในปี 2471 ผู้ช่วยของ Dr. Carothers ได้ค้นพบ พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีลักษณะข้นเหลวใส สามารถยืดดึงออกเป็นเส้นยาวและเมื่อเย็นตัวลงก็ยังสามารถยืดให้ยาวขึ้นได้อีก จนนำไปสู่ความสนใจไปพัฒนาการสังเคราะห์พอลิเอไมด์ (Polyamides) และในปี 2478 (ค.ศ. 1935) ก็ได้มีการสังเคราะห์พอลิเมอร์ขึ้นมาจากการทำปฏิกิริยาของ hexamethylene diamine และ adipic acid ได้พอลิเมอร์ที่เรียกว่า 6,6 ซึ่งมาจากจำนวนอะตอมของคาร์บอนในโมเลกุล ต่อมาจึงได้มีการเผยแพร่ออกสู่สาธารณะในปี 2481 (ค.ศ. 1938) โดยเรียกพอลิเมอร์ที่ได้ว่าไนล่อน นับว่าเป็นความสำเร็จอย่างสูงสุดในวงการสิ่งทอ ปัจจุบันมีการผลิตไนล่อนชนิดอื่นนอกเหนือจากไนล่อน 6,6 คือ ไนล่อน 6 และไนล่อน 12 เป็นต้น การผลิตไนล่อน 6 ที่ใช้วัตถุดิบคือ คาโปรแลกแทม ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตเป็นชนิดเส้นใยยาว

กระการบวนการผลิต

ในปี 2516 (ค.ศ. 1973) FTC ได้กำหนดนิยามของไนล่อนเอาไว้ว่า “ไนล่อนเป็นเส้นใยประดิษฐ์ที่เนื้อเส้นใยเป็นโซ่โมเลกุลยาวของพอลิเอไมด์สังเคราะห์ซึ่งมีปริมาณของแขนเอไมด์ ถูกแทนที่โดยตรงด้วยวงแหวนอะโรแมติกน้อยกว่า 85 % ของปริมาณทั้งหมด”

เส้นใยไนล่อนที่คุ้นเคยในวงการสิ่งทอและใช้กันกว้างขวางคือ ไนล่อน 6,6 และไนล่อน 6 ที่มีความคล้ายกันมาก โครงสร้างทางเคมีเป็นลักษณะองค์ประกอบของพอลิไมด์ (Polyamide) ประกอบด้วยธาตุหลักคือ C, H, O และ N มีความต่างที่การจัดเรียงตัวทางเคมีซึ่งส่งผลให้มีสมบัติต่างกันไปบ้าง

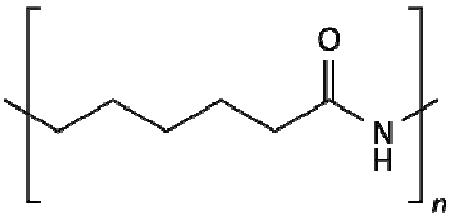
ไนล่อน 6,6 ได้จากการสังเคราะห์ระหว่าง hexamethylene diamine และ adipic acid ทำให้มีโครงสร้างทางเคมี ดังนี้



Nylon 6,6

รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของไนล่อน 6,6

ในขณะที่ไนล่อน 6 ได้จากการนำวัตถุดิบคือคาโปรแลกแทมมาทำการพอลิเมอไรซ์ ได้โครงสร้างทางเคมี คือ



Nylon 6

รูปที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลของไนล่อน 6

กระบวนการผลิตไนล่อน 6,6 นั้นเริ่มจากการใช้วัตถุดิบ เช่น ถ่านหิน หรือน้ำมันปิโตรเลียม เพื่อสังเคราะห์ได้ hexamethylene diamine และ adipic acid จากนั้นจึงนำสารเคมีทั้งสองมาทำปฏิกิริยากัน ซึ่งสารเคมีทั้งสองตัวนี้ ตัวหนึ่งคือ ด่าง และอีกตัวหนึ่งเป็นกรด ดังนั้นผลของปฏิกิรกยาทำให้ได้ออกมาเป็นเกลือไนล่อน ต่อมาทำการพอลิเมอไรซ์เกลือได้ ณ อุณหภูมิสูงโดยปราศจากอากาศ ในหม้อความดัน โดยสกัดน้ำออก ได้พอลิเมอร์เป็นเส้นคล้ายริบบิ้นแล้วตัดออกเป็นชิ้นเล็กๆ เป็นเกล็ดหรืออาจเป็นเม็ด ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นวัตถุดิบในการนำไปหลอมเพื่อขึ้นรูปเป็นเส้นใยต่อไป

ในกรณีของการผลิตไนล่อน 6 ซึ่งเริ่มจากถ่านหินมีขั้นตอนทางเคมีที่สลับซับซ้อนหลายขั้นตอนด้วยกัน โดยเริ่มจาก cyclohexane-oxide ซึ่งเปลี่ยนสภาพไปเป็นคาโปรแลกแทมเมื่อถูกนำไปทำปฏิกิริยากับกรดกำมะถัน ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ของคาโปรแลกแทมเริ่มจากการให้ความร้อนทีละน้อย โดยการใช้ไอน้ำกระทำให้หม้อที่ทำจากเหล็กไร้สนิม ซึ่งภายในมีการผสมสารเคมีดังกล่าวเกิดเป็นพอลิเมอร์ ซึ่งมีการควบคุมความร้อนและความดันทำให้พอลิเมอร์ที่ได้มีความเสถียรในรูปของซูเปอร์พอลิเมอร์ ขั้นตอนต่อไปนำพอลิเมอร์เหลวมาเปลี่ยนรูปให้เป็นเม็ดเช่นเดียวกับการผลิตไนล่อน 6,6 หลังจากนั้นนำเม็ดพอลิเมอร์ที่ได้ไปขึ้นรูปเป็นเส้นใย โดยการขึ้นรูปเป็นเส้นใยในการผลิตทั่วไปใช้อยู่สองระบบคือ รีดปั่นเป็นเส้นด้าย (grid spinning) และฉีดอัดปั่นเป็นเส้นด้าย (extruder spinning)

<u>สมบัติทางกายภาพ</u>

1. ความคงทน ไนล่อนเป็นเส้นใยที่มีความคงทนสูง ความทนแรงดึง ณ จุดขาดของเส้นใยมีค่า 3-6 gpd สามารถทนทานต่อการขัดถูได้ดี ยืดหยุ่นสูง

2. การทนต่อความร้อน ไนล่อนเมื่อได้รับความร้อนสูงจะหลอมตัว ข้อควรระวังคือ ไนล่อน 6 มีจุดหลอมเหลวที่ 216 °C ซึ่งต่ำกว่าไนล่อน 6,6 ซึ่งหลอมเหลวที่ 250 °C

3. การติดไฟ เป็นสมบัติที่เป็นเอกลักษณ์ของเส้นใยไนล่อน เมื่อไนล่อนเข้าสู่เปลวไฟจะเกิดการหลอมและหดตัวออกจากเปลวไฟ จากนั้นจึงเกิดการติดไฟ ทำให้เส้นใยหลอมเหลวและเกิดเป็นหยด มีควันขาวออกมา

4. ความถ่วงจำเพาะ 1.14 ถือได้ว่าค่อนข้างเบา

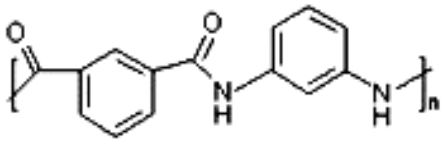
6) เส้นใยอะรามิด (Aramid fiber) เป็นคำย่อมาจาก aromatic polyamide ที่แตกต่างจากเส้นใยไนล่อนซึ่งเป็นเพียง polyamide เท่านั้น ความแตกต่างทางเคมีที่ชัดเจนจนนำไปสู่การตั้งชื่อเส้นใยใหม่นี้เกิดขึ้นในปี 2517 ทั้งๆ ที่เส้นใยอะรามิดชนิดแรกที่บริษัทดูปองท์ผลิตออกสู่ตลาดภายใต้ชื่อการค้าว่า Nomex เกิดขึ้นตั้งแต่ปี 2510 แต่ในขณะนั้นยังถือว่าเป็นไนล่อนอยู่ ต่อมาจึงได้พัฒนาจนสามารถผลิต Kevlar ที่มีความแข็งแรงสูงกว่าเส้นใยเหล็กถึง 5 เท่า โดยคิดที่น้ำหนักเท่ากัน

ซึ่งนิยามของอะรามิดได้กำหนดไว้ชัดเจน คือ เป็นเส้นใยที่ประกอบด้วยพอลิเอไมด์สังเคราะห์เป็นลูกโซ่โมเลกุลยาวที่มีอย่างน้อยที่สุด 85% ของแขนเอไมด์ $(-\overset{\overset{O}{\|}}{C}-NH-)$ ถูกจับโดยตรงกับวงแหวนอะโรแมติกทั้งสองข้าง

Nomex เป็นผลิตภัณฑ์ตัวแรกเน้นการทนต่ออุณหภูมิสูงใช้ในการทำเสื้อผ้านักบินอวกาศ ในขณะที่ Kevlar เน้นในด้านความแข็งแรงเป็นหลัก จึงใช้ทำเป็นเสื้อเกราะกันกระสุน สายพาน วัสดุประเภทวัสดุเสริมแรง เป็นต้น

<u>กระบวนการผลิต</u>

Nomex มีโครงสร้างทางเคมี เป็นเมตาอะรามิด (meta aramid) คือ poly (m-phenylrne isophthalamide) หรือ MPIA มีหน่วยซ้ำดังนี้

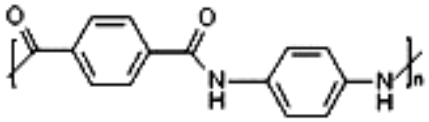


รูปที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุล MPIA

พอลิเมอร์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง aromatic diamines กับ aromatic diacid cholorides หลักการที่สำคัญเพื่อให้ได้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเพียงพอ คือ การทำ solution polymerization ที่อุณหภูมิต่ำระหว่าง m-phenylrne diamine กับ isophthaloyl chloride โดยใช้ระบบตัวทำละลายที่เหมาะสม ในเชิงการค้าคือ dimethyl acetamide (DMA) ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ทำที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0 °C ใน DMA ที่มีแคลเซียมออกไซด์ ทำหน้าที่เป็นตัวรับกรดอยู่ด้วย ดูปองท์ได้พัฒนากระบวนการปั่นเส้นใยแบบแห้งขึ้นด้วยการใช้สารละลาย

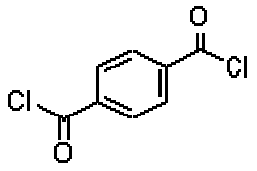
ประกอบด้วย 19% MPIA, 70% DMA, 9% $CaCl_2$ และ 2% H_2O จากนั้นทำการล้างเส้นใยด้วยน้ำจนเหลือประมาณ 70% DMA, 15% $CaCl_2$, และ 100-150% โดยเทียบจากน้ำหนักแห้งของพอลิเมอร์ โดยกระบวนการล้างและยืดดึงต่อมาดำเนินไปพร้อมๆกัน เพื่อให้ได้อัตราการยืดเป็น 4 ต่อ 1 ในน้ำที่อุณหภูมิ 90 °C และควบคุมให้การล้าง และการยืดกระทำแบบสวนกระแสซึ่งกันและกัน จนสุดท้ายปริมาณของแคลเซียมคลอไรด์เหลือเพียง 0.1% และปริมาณ DMA เหลือเพียง 0.5% หลังจากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการตกแต่งสำเร็จ ทำให้เกิดการหยิกงอในตู้อบไอน้ำที่อุณหภูมิประมาณ 80 °C ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะพองตัวเนื่องจากน้ำ มีการจัดเรียงตัวและตกผลึกที่ประมาณ 165 °C ในไอน้ำ

ในกรณีของการผลิต Kevlar โครงสร้างทางเคมีต่างออกไปจาก Nomex คือ เป็นพาราอะรามิด (para aramid) ในรูปของ poly (p-phenylene terephthalamide) หรือ PPTA มีหน่วยซ้ำ คือ

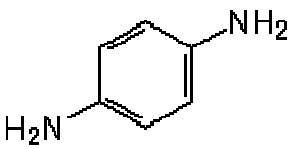


รูปที่ 2.4 โครงสร้างโมเลกุล PPTA

ค้นพบโดยบริษัทดูปองท์ในปี 2514 (ค.ศ.1971) ด้วยการสังเคราะห์ โดยอาศัยปฏิกิริยาควบแน่นจาก acid chloride ของ terephthaloyl chloride (TPC) กับ p-phenyleme diamine (PDA) แสดงดังรูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาเกี่ยวข้องกับการละลายของ PDA ในสารละลาย hexamethyl phosphoramide /N-methylpyrollidone (HMPA/NMP)



TPC



PDA

รูปที่ 2.5 โครงสร้างโมเลกุล TPC และ PDA

หลังจากทำให้เย็นลงแล้วเติมผงของ TPC เข้าไป ทำการกวนให้ทั่วแล้วล้างด้วยน้ำกำจัดสารละลายและกรดไฮโดรคลอริก ต่อมาได้พบว่า HMPA เป็นสารก่อมะเร็ง จึงมีการศึกษาวิจัยทำให้สามารถใช้เพียง NMP ละลายด้วยแคลเซียมคลอไรด์ก็สามารถทำให้เกิดน้ำหนักโมเลกุลสูงเพียงพอเช่นกัน ปัญหาที่สำคัญที่สุดของกระบวนการสังเคราะห์นี้คือการพยายามรักษาให้สารที่ทำปฏิกิริยากันและสารละลายสะอาด และแห้งสนิทก่อนการสังเคราะห์ สารเจือปนโดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำก่อให้เกิดผลเสียต่อน้ำหนักโมเลกุล หากควบคุมไม่ดีก็จะไม่สามารถสังเคราะห์ PPTA ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงพอที่จะทำให้เส้นใยมีความแข็งแรงดีตามต้องการ กระบวนการผลิตจะได้ Kevlar หลายชนิดได้แก่ Kevlar, Kevlar 29, Kevlar 49 ซึ่งเส้นใย Kevlar มักเน้นการใช้งานเพื่ออุตสาหกรรม กรณีของ Kevlar เป็นเส้นใยยาวที่ใช้การทำผ้าใบยางรถยนต์ ท่อและสายพาน Kevlar 29 ก็เช่นเดียวกันอยู่ในรูปของเส้นใยยาวใช้ทำสายเคเบิ้ล ร่มชูชีพ และเทปเสริมแรง ส่วน Kevlar 49 ในรูปของเส้นใยยาว และเส้นใยสั้นที่ทำเป็นแผ่น การใช้งานส่วนใหญ่จะใช้กันกว้างขวางในด้านของพลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใย งานด้านอวกาศ ลำเรือและงานบางส่วนที่เกี่ยวข้องกับการก่อสร้าง

<u>สมบัติทางกายภาพ</u>

1. ความแข็งแรง ในการใช้งานด้านสิ่งทอเครื่องนุ่งห่มมุ่งไปที่ Nomex เป็นหลัก ซึ่งเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงดีมาก ดีกว่าเส้นใยประดิษฐ์อื่นๆ ไม่ว่าจะเป็นไนล่อน เรยอนชนิดแข็งแรงสูง หรือพอลิเอสเทอร์ ความแข็งแรงอาจสูงถึง 21.5 gpd และทนต่อการสึกหรอ แม้ใช้งานไปนานๆ ก็ยังทนต่อการฉีกขาดและการขัดถู

2. สภาพยืดหยุ่น ค่อนข้างสูง

3. การคืนตัวจากแรงอัด สามารถทนได้ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Nomex ที่ผลิตเป็นผ้ารักษารูปทรงได้ดี แม้เส้นใยดูมีลักษณะกระด้างบ้าง แต่ก็มีความสามารถในการทิ้งเหมาะสมพอที่จะนำมาทำเครื่องนุ่งห่ม เช่น ชุดดับเพลิง เป็นต้น

4. ความร้อน เส้นใยอะรามิดเป็นเส้นใยที่ทนความร้อนได้สูง และโดยตัวเส้นใยเองมีสมบัติในการนำความร้อนไม่ดี

5. การติดไฟ ไม่หลอมหรือหยด เมื่อถูกเปลวไฟอุณหภูมิที่สูงเกิน 371 °C อาจทำให้เส้นใยเสื่อมสภาพเกิดการหดเป็นเถ้าถ่าน แต่เมื่อเอาเปลวไฟออกเส้นใยดับได้ด้วยตัวเอง

6. ความถ่วงจำเพาะ 1.38 บางชนิดเป็น 1.44

3. เส้นใยกึ่งสังเคราะห์ เป็นเส้นใยที่ได้จากการนำสารจากธรรมชาติ มาปรับปรุงโครงสร้างให้เหมาะกับการใช้งาน เช่น การนำเซลลูโลสจากพืชมาทำปฏิกิริยากับสารเคมีบางชนิด เส้นใยกึ่งสังเคราะห์ นำมาใช้ประโยชน์ได้มากกว่าเส้นใยธรรมชาติ ตัวอย่างเส้นใยกึ่งสังเคราะห์ เช่น วิสคอสเรยอง แบมเบอร์กเรยอง เป็นต้น

2.2 วัสดุผสมพอลิเมอร์เสริมแรงเส้นใย (Fiber Reinforced Polymer, FRP)

[WUZZlive, woottikorn Kaewchusir, http://wuzzlive.com/blog/?p=478]

วัสดุผสมพอลิเมอร์เสริมแรงเส้นใย หรือ FRP จัดเป็นวัสดุผสม (Composites) ประเภท Polymer-Matrix composites เป็นการนำคุณสมบัติที่เด่นของวัสดุ 2 ประเภทมาใช้เพื่อประโยชน์ที่วัสดุทางธรรมชาติโดยทั่วไปไม่สามารถทำได้ เช่น รับแรงอัดและแรงดึงในเวลาเดียวหรือพร้อมกัน โดยที่วัสดุมีน้ำหนักเบา ซึ่งสามารถเลือกเส้นใยเพราะมีคุณสมบัติรับแรงดึงได้สูง มาผสมกับพอลิเมอร์ที่สามารถรับแรงอัดและแรงดัดได้ดี และสามารถปรับปรุงความแข็งของพอลิเมอร์ให้สามารถใช้งานได้ทัดเทียมโลหะนั้น อาจทำได้โดยการปรับปรุงโครงสร้างทางเคมีของสายโซ่พอลิเมอร์ และพัฒนาไปสู่พอลิเมอร์ชนิดใหม่ รู้จักกันในนามของ พลาสติกเชิงวิศวกรรม (Engineering Plastics) ซึ่งนิยมเรียกกันย่อๆ ว่า ENPLAS การเสริมแรงด้วยวัสดุที่มีความแข็งและเหนียว ซึ่งนิยมใช้วัสดุจำพวกเส้นใย (Fibers) เช่น ใยแก้ว ใยคาร์บอน และใยอาระมิด เป็นต้น ส่วนวัสดุประสานยึดเกาะ (Polymer-Matrix) เช่น อีพ็อกซี่เรซิน พอลิเอสเตอร์เรซิน เป็นต้น สมรรถนะของวัสดุคอมโพสิตจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้การจัดเรียงตัวของส่วนรับกำลังหลักของวัสดุ (เส้นใยเสริมแรง) และอันตรกริยาระหว่างเส้นใยกับเมตริกซ์ (Interaction between Fibers and Matrix)

2.2.1 องค์ประกอบ พอลิเมอร์เสริมแรงโดยทั่วไปประกอบด้วยส่วนผสมหลัก 3 ส่วนดังนี้

ส่วนที่ 1 สารเสริมแรง (Reinforcement หรือ Filler) ซึ่งโดยทั่วไปแบ่งตามรูปร่างลักษณะได้เป็น 3 แบบ

- เส้นใย (Fibers) ตัวอย่างเช่น ใยแก้ว ใยคาร์บอน และใยอาระมิด เป็นต้น

- ผง (Power) ตัวอย่างเช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ดินขาว (Kaolin) เป็นต้น

- เกล็ด (Flake หรือ Whisker) ตัวอย่างเช่น ไมก้า เป็นต้น

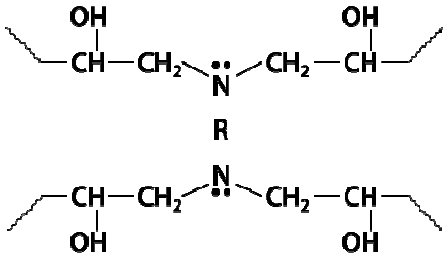
ส่วนที่ 2 พอลิเมอร์หรือเรซิน (Polymer หรือ Resins) ซึ่งโดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 ประเภท ใหญ่ๆ คือ

- เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) เป็นพอลิเมอร์หรือเรซินที่สามารถนำมาทำให้หลอมและขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์รูปแบบต่างๆได้ โดยจะหลอมที่อุณหภูมิสูง และแข็งตัวเป็นรูปผลิตภัณฑ์ตามแบบพิมพ์เมื่ออุณหภูมิลดลง ตัวอย่างเช่น โพลิเอทิลิน (Polyethylene, PE) โพลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) โพลิสไตริน (Polystyrene, PS) และไนล่อน (Nylon) เป็นต้น

- เทอร์โมเซท (Thermoset) เป็นพอลิเมอร์หรือเรซินที่ไม่สามารถละลายหรือหลอมเหลวได้อีก เนื่องจากแข็งตัวโดยปฏิกิริยาทางเคมี ตัวอย่างพอลิเมอร์ประเภทนี้ได้แก่ โพลิเอสเทอร์ไม่อิ่มตัว (Unsaturated Polyester) ฟีนอลิก (Phenolic) อีพ๊อกซี่ (Epoxy) และเมลามีน (Melamine) เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้การขึ้นรูปวัสดุผสมจะใช้เรซิ่นเพียงชนิดเดียวคือ อีพ๊อกซี่

โดยอีพ๊อกซี่เป็นพอลิเมอร์ที่มีขนาดความยาวต่าง ๆ กัน เรียงตัวเป็นเส้นตรงหรือร่างแหขึ้นอยู่กับจำนวนและลักษณะการเรียงตัวที่ซ้ำกันของหน่วยย่อย (monomer) ตัวอย่างโครงสร้างบางส่วนของอีพ๊อกซี่ ดังรูปที่ 2.6 และเส้นขดแสดงตำแหน่งของหน่วยย่อยที่อาจมาต่อเพิ่มเติมขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาเคมีในการผลิตเป็นดังนี้

[http://www.pharm.su.ac.th/cheminilife/cms/index.php/ outdoor/epoxy.html]

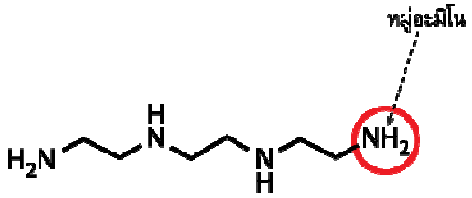


รูปที่ 2.6 โครงสร้างบางส่วนของอีพ๊อกซี่

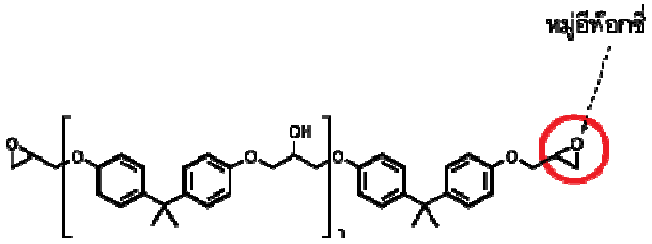
คุณสมบัติทางกายภาพ : วัสดุที่ทำจากอีพ๊อกซี่จัดเป็น thermo-setting polymer (หรือ thermoset) หรือพอลิเมอร์ที่ผ่านการทำให้มีความเหนียวหรือความแข็งและไม่คืนรูป โดยการใช้ความร้อน (ที่อุณหภูมิสูงกว่า 200 ºC หรือ 392 ºF) การทำปฏิกิริยาเคมี หรือการ

ใช้รังสี ในกระบวนการผลิตจะถูกเปลี่ยนสถานะจากของเหลวหรือของแข็งที่ถูกกดให้เป็นแผ่นบาง ได้ จากนั้นจึงใช้แบบหล่อ (mold) ในการขึ้นรูปให้เป็นวัสดุที่ต้องการหรือใช้เป็นกาวหรือสารยึดติด สำหรับกาวอีพ๊อกซี่อาจเตรียมขึ้นเองจาก two-part epoxy ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีขนาดไม่ใหญ่มากนัก และอยู่ในรูปของเหลวบรรจุในหลอด 2 หลอด ก่อนใช้ให้นำมาผสมเข้าด้วยกัน จะได้กาวอีพ๊อกซี่ที่มีลักษณะข้น หรือบางชนิดเป็นคล้ายดินน้ำมัน 2 ท่อนที่เมื่อผสมกันและอยู่ตัวแล้วจะมีความแข็งเหมือนเหล็ก ไม่มีการหดตัว สามารถตัด เจาะ กลึง หรือเลื่อยได้ กาวอีพ๊อกซี่แต่ละชนิดหาซื้อได้ตามร้านค้าวัสดุก่อสร้าง

การผลิต : อีพ๊อกซี่ จัดเป็นโคพอลิเมอร์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่าง อีพ๊อกไซด์เรซิน (เรซินเป็นสารสังเคราะห์ที่มีลักษณะเป็นของแข็ง ใส) กับสารเพิ่มความแข็ง (harderner) ชนิดโพลีเอมีน (โพลีเอมีน เป็นสารอินทรีย์ที่มีหมู่อะมิโน หรือ $-NH_2$ อยู่ในโมเลกุล) แสดงดังรูปที่ 2.7 ตัวอย่างของอีพ๊อกไซด์เรซิน เช่น ผลผลิตจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างอีพิคลอโรไฮดริน (epichlorohydrin) และบิสฟีนอล-เอ (bisphenol-A) ส่วนตัวอย่างของสารเพิ่มความแข็งชนิดโพลีเอมีน เช่น ไทรเอทิลีนเททรามีน (triethylenetetramine, TETA) โดยหมู่อีพ๊อกไซด์ของอีพ๊อกไซด์ เรซินจะทำปฏิกิริยากับหมู่เอมีนของ TETA ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างคล้ายร่างแหที่มีสภาพแข็งเกร็ง (rigid) แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของโพลีเอมีน



รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของอีพ๊อกไซด์เรซิน (n คือจำนวนหน่วยย่อย อยู่ระหว่าง 0–25 หน่วย)

การใช้งาน **:** อีพ๊อกซี่ได้รับการนำมาใช้ในงานหลายประเภท เช่น วัสดุก่อสร้าง วัสดุผสม (composites) สีทาอาคาร เคลือบพื้นอาคาร ชิ้นส่วนเครื่องมืออุตสาหกรรม ส่วนประกอบในสารกึ่งตัวนำและวงจรไอซี ส่วนประกอบในการผลิต fiber-reinforced plastic ซึ่งเป็นวัสดุผสมระหว่างอีพ๊อกซี่กับไฟเบอร์ที่ใช้สำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์ อากาศยาน หรือใช้เป็นกาวหรือสารยึดติด (adhesives) คุณสมบัติที่ดีของอีพ๊อกซี่ คือ คุณสมบัติเชิงกลที่ดี ความสามารถในการประสานและยึดติด ความคงทนต่อสารเคมีและความร้อน การเป็นฉนวนไฟฟ้า ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ทำให้อีพ๊อกซี่ถูกนำไปใช้ในงานอีเล็กทรอนิกส์ด้วย

ส่วนที่ 3 สารเติมแต่ง (Additives) เป็นสารที่เติมลงไปในพอลิเมอร์เสริมแรง เพื่อเพิ่มสีสันและสมบัติพิเศษตามต้องการ ตัวอย่างสารเติมแต่งที่ใช้แพร่หลายใน FRP ได้แก่ UV Stabilizer, Colorant, Low Profile Agent และ Thyrotrophic Agent เป็นต้น

2.2.2 เทคนิคการผลิต

สำหรับเทคนิคการผลิต FRP นั้นมีมากมายหลายเทคนิค แต่ละเทคนิคมีข้อดีแตกต่างกันไป ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. การผลิตแบบทามือ (Hand Lay-up) เป็นเทคนิคการผลิตที่ง่าย ลงทุนน้อย และนิยมใช้มากที่สุด สามารถผลิตชิ้นงานได้โดยไม่จำกัดขนาด แต่ข้อเสียคือ จำเป็นต้องใช้ผู้ผลิตที่มีความชำนาญ จึงได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสม่ำเสมอ

2. การผลิตแบบใช้เครื่องพ่น (Spray-Ray up) เป็นเทคนิคที่พัฒนาขึ้นมาจากการผลิตโดยทามือ สามารถผลิตชิ้นงานได้ตั้งแต่จำนวนน้อยๆ จนกระทั่งมากถึง 1000 ชิ้น สามารถใช้ผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างสลับซับซ้อนกว่าการผลิตโดยทามือ และสามารถทำให้เป็นระบบอัตโนมัติ โดยใช้หุ่นยนต์หรือควบคุมโดยนิวเมติก

3. การผลิตโดยวิธีการพัน (Filament Winding) เป็นเทคนิคที่ใช้ผลิตชิ้นงานที่กลวงภายใน เช่น ท่อหรือถัง ชิ้นงานที่ต้องรับแรงอัดสูงขณะใช้งาน การผลิตโดยวิธีการพันนี้ใช้เส้นใยยาว เคลือบด้วยเรซินพันลงบนแม่พิมพ์ ซึ่งมีรูปร่างทรงกลมหรือทรงกระบอก โดยสามารถเรียงเส้นใยไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง เพื่อให้รับแรงสูงในทิศทางนั้น แล้วนำไปอบเพื่อให้เรซินแข็งตัวเต็มที่ จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง และมีปริมาณเส้นใยในเนื้อเรซินสูงสุดด้วย

4. การผลิตโดยใช้แม่แบบอัด (Matched Molding) เป็นเทคนิคที่มีจำนวนการผลิตสูงได้ชิ้นงานที่มีขนาดเป็นมาตรฐานเดียวกัน สามารถทำได้ด้วยวิธีอัตโนมัติการออกแบบ

ชิ้นงานทำได้ด้วยความคล่องตัวจึงเป็นวิธีที่เหมาะที่สุดสำหรับการผลิตชิ้นงานจำนวนมาก นอกจากนี้ยังสามารถใช้ร่วมกับชิ้นโลหะต่างๆ (Metal insert) เช่น ชิ้นส่วนของน็อตและสกรู เข้าไปในชิ้นงานขณะทำการผลิต ทำให้ประหยัดเวลาในการประกอบและชิ้นงานมีความสวยงาม สีสันและผิวของชิ้นงานจะมีความเรียบมันทั้งสองด้าน เนื่องจากใช้แม่แบบโลหะซึ่งมีผิวเรียบมัน

5. การผลิตแบบถุงอัดอากาศ (Pressure-Bag Molding) เป็นเทคนิคการผลิตที่คล้ายการใช้มือทา กล่าวคือ วางแผ่นเส้นใยพร้อมเรซินลงแม่แบบ วางถุงยางทับลงไปกดแผ่นยึดตอนบน ลงห่างจากแม่แบบพอสมควรอัดอากาศเข้าไปในถุงยาง เพื่อให้ถุงยางขยายตัวอัดใยแก้วผสมเรซินให้แนบสนิทกับแม่แบบตอนล่าง ทิ้งไว้ให้เรซินแข็งตัว จึงปล่อยอากาศออกจากถุง ยกแผ่นยึดตอนบนขึ้น แล้วถอดชิ้นงานออกจะได้ชิ้นงานที่ผิวเรียบสองด้าน

2.2.3 ข้อดีและข้อเสียของวัสดุผสมพอลิเมอร์เสริมแรงเส้นใย หรือ FRP

<u>ข้อดี</u>

1. มีความแข็งแรง สามารถรับแรงได้สูง และทนทานต่อการขูดขีด
2. ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีสูง
3. ทนต่อสภาพอากาศและอุณหภูมิ ที่เปลี่ยนแปลง
4. น้ำหนักเบา
5. มีความเหนียวสูง และมีความทนทานต่อการล้าสูง
6. มีความง่ายในการขึ้นรูป

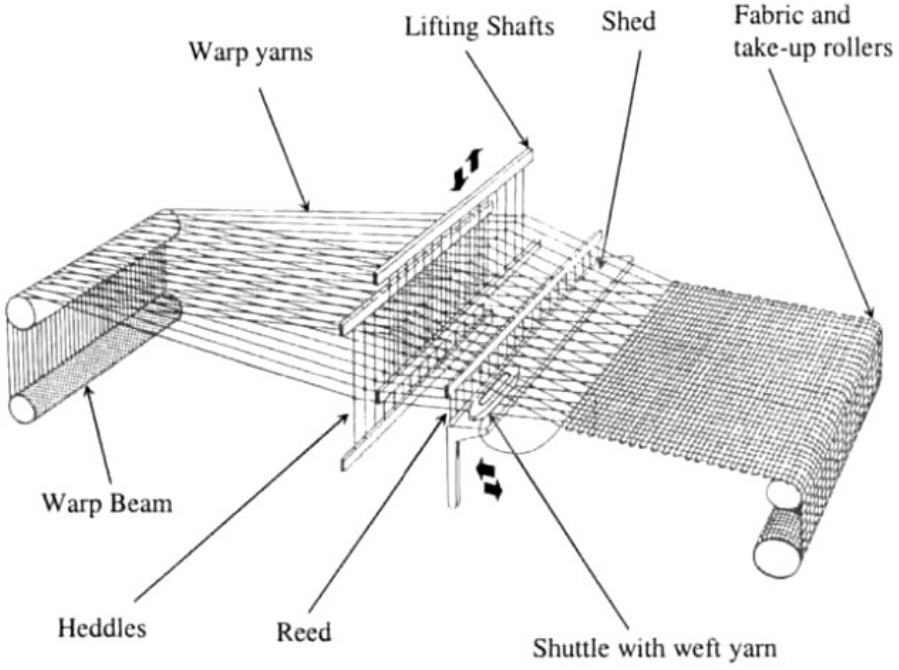
<u>ข้อเสีย</u>

1. ค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง
2. ยังมีความคืบและการหดตัว
3. ข้อจำกัดในการทนต่อสภาพแวดล้อม บางอย่าง เช่น การเสียกำลังการยึดเกาะจาก ความชื้นสูง และการดูดซึม
4. ความไม่เสถียรทางพลศาสตร์เนื่องจากน้ำหนักเบา
5. ไม่สามารถทนต่ออุณหภูมิที่สูงตั้งระดับประมาณ 70-80 °C ขึ้นไปจะทำให้เมตริกซ์สูญเสียกำลัง
6. ความเข้ากันได้ของวัสดุพอลิเมอร์เมตริกซ์กับวัสดุอื่น เช่น ผิวคอนกรีตต้องมีวัสดุประสาน

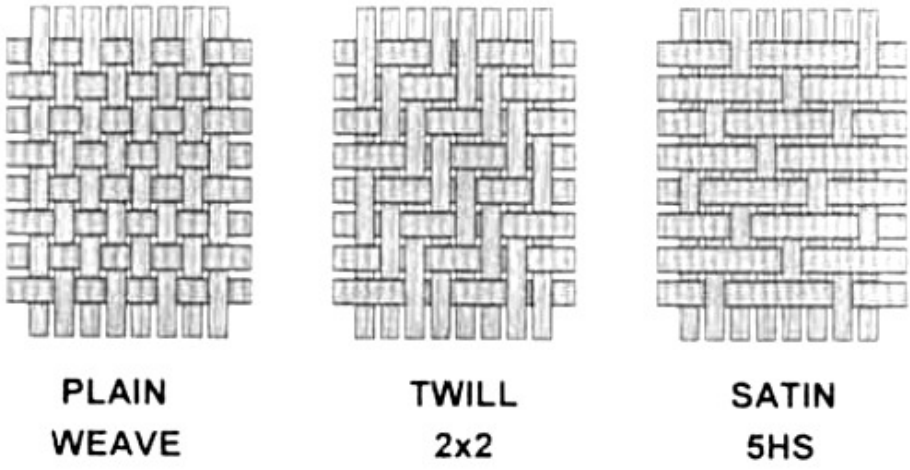
2.3 การทอแบบ 2 มิติ [L.Tong, A.P. Mouritz and M.K. Bannister,2002]

การทอผ้าเป็นกระบวนการผลิตผืนผ้าทอที่ใช้ในงานด้านอุตสาหกรรมด้านสิ่งทอ โดยการผลิตผืนผ้าทอส่วนใหญ่เป็นแบบชั้นเดียว เช่น ผ้าสักหลาด ผืนเส้นใยคาร์บอน และเส้นใยอื่นๆที่ปัจจุบันใช้เป็นวัสดุเสริมแรงสำหรับองค์ประกอบของการคอมโพสิต (Fiber composite) อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ที่ใช้ในการทอผ้าสามารถผลิตในรูปแบบที่ซับซ้อน เช่น การขึ้นรูปในแบบ 3 มิติ ซึ่งในการทอแบบ 3 มิติ จะต้องมีความรู้ความเข้าใจในรูปแบบการทอ 2 มิติ ที่เป็นแบบพื้นฐานในการทอเป็นอย่างดีก่อน

การทอแบบ 2 มิติ เป็นหลักการเบื้องต้นในการผลิตผืนเส้นใยโดยการขัดกันของชุดเส้นใยด้ายสองชุด คือ กลุ่มเส้นใยตามยาวและเส้นใยตามขวาง (Warp และ Weft) โดยรูปแบบเครื่องทอพื้นฐานแสดงในรูปที่ 2.9 เส้นใยตามยาวจะถูกส่งผ่านเข้าเครื่องทอจากแหล่งจัดเก็บหรือแหล่งกำเนิดที่มีการรวบรวมเส้นใยไว้หลายเส้นมารวมกันเป็นม้วนใหญ่ (Warp beams) เส้นใยตามยาวที่ออกจากม้วนจะผ่านการจัดตำแหน่งของเส้นใยการจัดวางเป็นชุดเส้นใยและแต่ละเส้นจะถูกดึงให้ตึง แล้วสอดผ่านตัวยกลวดลายสลับเส้นใย (Lifting shafts) โดยกลไกการยกเส้นใยขึ้นอยู่กับการควบคุมของเครื่องทอว่าต้องการรูปแบบหรือลวดลายแบบใด จุดที่สำคัญสำหรับกลไกในการยกเส้นใย คือ ระยะห่างของช่องว่างระหว่างเส้นใย (Shed) ซึ่งเป็นช่องว่างเกิดจากการยกลายของเส้นใยเพื่อส่งผ่านเส้นใยตามขวางเข้าไปทำมุมทักทอกับเส้นใยตามยาว (90°) โดยเส้นใยตามยาวจะมีความยาวต่อเนื่องและถูกควบคุมด้วยการยกสลับเส้นใย แล้วจะต้องถักทอเชื่อมโยงกันด้วยเส้นใยตามขวาง ดังนั้นจะได้รูปแบบและลวดลายเป็นผืนเส้นใยและสิ่งทอที่ขึ้นอยู่กับการยกสลับของเส้นใย ดังแสดงในรูปที่ 2.10 คุณสมบัติของสิ่งทอจะขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใย ปริมาณเส้นใยที่ใช้ และรูปแบบการผลิต อย่างเช่น การทอแบบ 2 มิติ กับการทอแบบ 3 มิติ ปริมาณเส้นใยที่ใช้ต่างกัน ชุดมัดเส้นใยในการยกสลับต่างกัน รูปแบบหรือลวดลายที่ซับซ้อนไม่เหมือนกัน เป็นต้น ซึ่งสิ่งสำคัญต่อการยกเส้นใยที่ต่างกัน คือ การแทรกเส้นใยผ่านช่องว่างของเส้นใยตามขวาง โดยการใช้กระสวย (Shuttle) ส่งผ่านเส้นใย เป็นเทคนิคดั้งเดิมการยกลายและการส่งผ่านเส้นใยตามขวางมาเชื่อมโยงกับเส้นใยตามยาว ที่เกิดขึ้นในกระบวนการทอมีความเร็วในการผลิตที่ช้า แต่มีความได้เปรียบของโครงสร้างขอบผ้าเป็นแบบปิด โดยเทคนิคสมัยใหม่ใช้การทอของเครื่องจักรและกระสวยมีขนาดเล็กมีความเร็วในการเคลื่อนที่สูง ทำให้ได้ผืนผ้าที่มีความกว้างมากขึ้น ซึ่งมีความกว้างประมาณ 1.8-2.5 เมตร อัตราเร็วในการทออยู่ที่ 1 เมตรต่อนาที



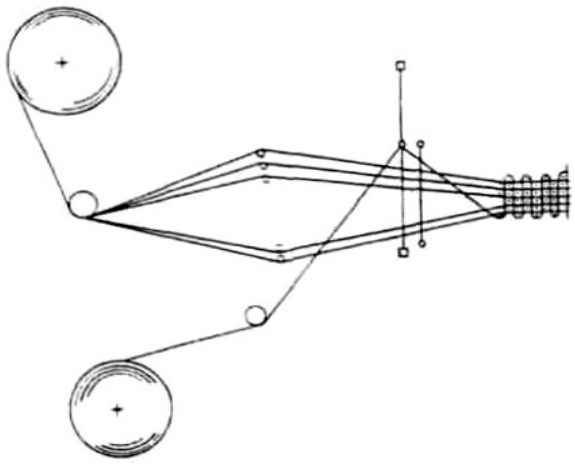
รูปที่ 2.9 เครื่องทอพื้นฐานสำหรับการทอแบบ 2 มิติ [L.Tong et al, 2002]



รูปที่ 2.10 รูปแบบการทอแบบ 2 มิติ [L.Tong et al, 2002]

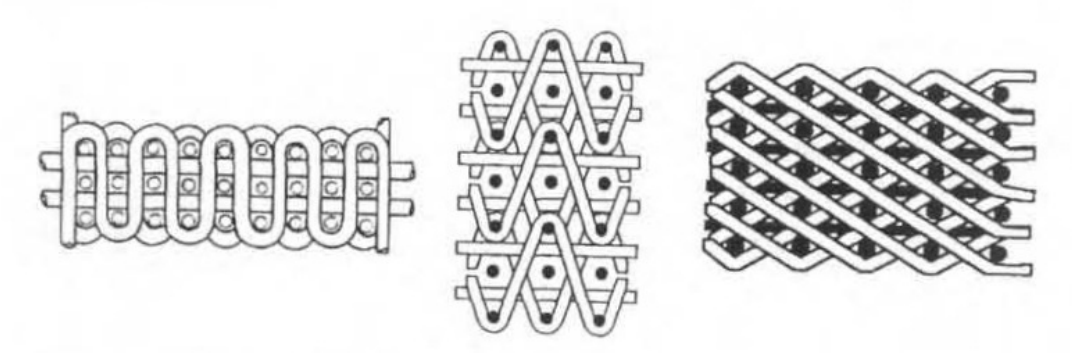
2.4 การทอแบบ 3 มิติ [L.Tong, A.P. Mouritz and M.K. Bannister,2002]

การทอแบบ 3 มิติมีความแตกต่างกับการทอแบบ 2 มิติ การทอแบบ 3 มิติมีจำนวนชั้นของเส้นใยที่มากกว่า ซึ่งจำนวนชั้นเส้นใยมีความจำเป็นต่อความหนาของผ้าทอและปริมาณเส้นใยที่ป้อนเข้าเครื่องทอ ขั้นตอนการควบคุมเส้นใยโดยทั่วไปในการทอแบบ 3 มิติ แหล่งจัดเก็บหรือแหล่งกำเนิดเส้นใยที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งเส้นใยแต่ละเส้นจะมีการจัดเก็บแยกกัน โดยระบบการจัดเก็บชุดเส้นใยไม่ใช้ร่วมกัน วัสดุสิ่งทอหรือเส้นใยใช้ในการทอแบบ 3 มิติ ส่วนใหญ่จะผลิตจากเส้นใยที่มีประสิทธิภาพสูง เช่น เส้นใยคาร์บอน เส้นใยแก้ว และเส้นใยอะรามิค เป็นต้น การออกแบบและรูปแบบการยกเส้นใยที่มีลักษณะ 3 มิติ จะต้องออกแบบการจัดวางเส้นใยตามยาวและตามขวาง โดยวางเส้นใยให้ตรงและมีความต่อเนื่อง เพื่อให้ขึ้นรูปได้ง่ายแล้วเครื่องทอสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ จะต้องให้ส้นใยตามยาวแยกออกมาม้วนไว้บนแกนที่สามารถใช้ยกขึ้นและกดลงได้แล้วมีทิศทางเดียวกับความหนาของชั้นเส้นใยทอ ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงการทอเส้นใยแบบ 3 มิติ

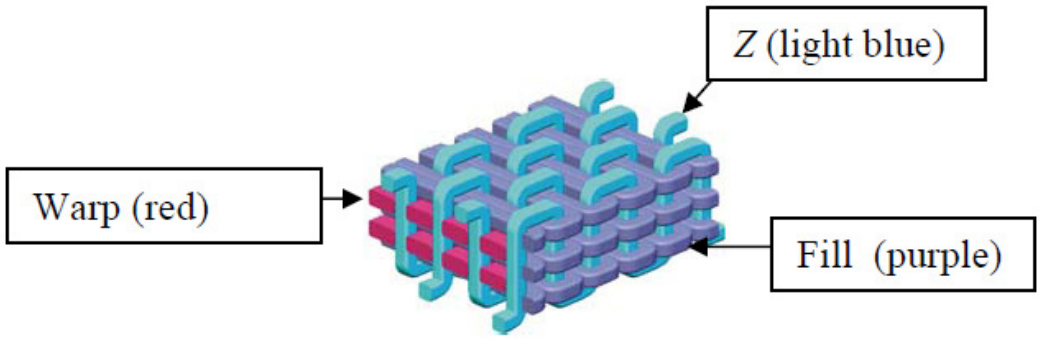
รูปแบบการทอของเส้นใย 3 มิติ ที่สามารถผลิตได้ในปัจจุบัน อธิบายโดย Yamamoto และคณะ (1995) ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 2.12 รูปแบบการทอแบบ 3 มิติ มีความแตกต่างเนื่องจากกระบวนการผลิตและรูปแบบการขึ้นรูป ซึ่งมีพารามิเตอร์เบื้องต้นที่เหมือนกับการทอแบบ 2 มิติ เช่น ความตึงภายในและการเสียดสีของเส้นใยที่ถักทอกัน แต่ในการทอแบบ 3 มิติ มีความสามารถในการผลิตที่เส้นใยทำมุม 0 และ 90 องศา ภายในระนาบผืนผ้าที่ทอ ซึ่งในการทอของเครื่องทอมีข้อจำกัดในการขึ้นรูปสำหรับการทำมุมของเส้นใย จะส่งผลทำให้เกิดแรงเฉือนและแรงบิด จึงส่งผลต่อคุณสมบัติต่อผืนผ้าทอ



รูปที่ 2.12 รูปแบบการทอแบบ 3 มิติ

2.4.1 การทอแบบ 3D orthogonal

รูปแบบโครงสร้างการทอแบบ 3D orthogonal ประกอบด้วยเส้นใย 3 ชุด ได้แก่ เส้นใยตามยาว (warp) เส้นใยตามขวาง (weft or fill) และเส้นใยในแนวแกน Z ซึ่งเส้นใยเหล่านี้มาถักทอเข้าด้วยกัน โดยที่เส้นใยตามยาวจะถูกวางตัวอยู่ในทิศทางตามความยาวของผืนเส้นใยทอและมีเส้นใยอื่นๆมาวางตัวตั้งฉากซึ่งกันและกัน ในส่วนของเส้นใยตามขวางจะวางแทรกระหว่างเส้นใยตามยาวแล้วจะเรียงซ้อนกันสลับเป็นคู่ๆ ตามความหนาของรูปแบบโครงสร้างการทอ โดยมีเส้นใยในแกน Z ที่ทอตั้งฉากกับเส้นใยตามยาวและเส้นใยตามขวาง ซึ่งจะช่วยในการจับยึดมัดเส้นใยอื่นๆ เพื่อให้เกิดความสมบรูณ์ของโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 2.14

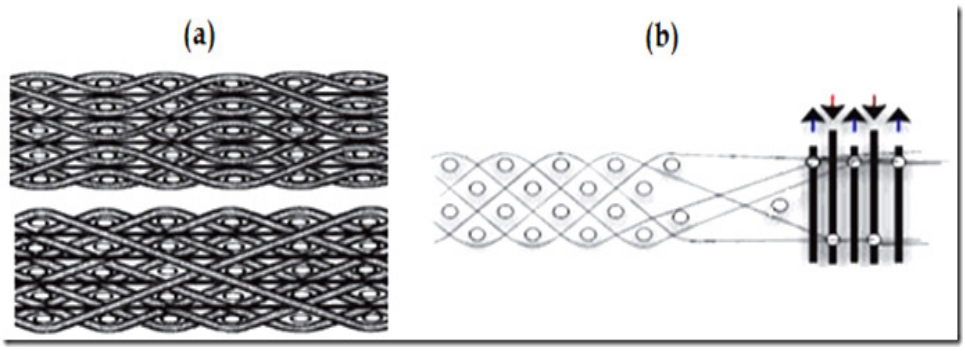


รูปที่ 2.14 รูปแบบโครงสร้างการทอแบบ 3D orthogonal

[K.W. Sharp and A.E. Bogdanovich, 2008]

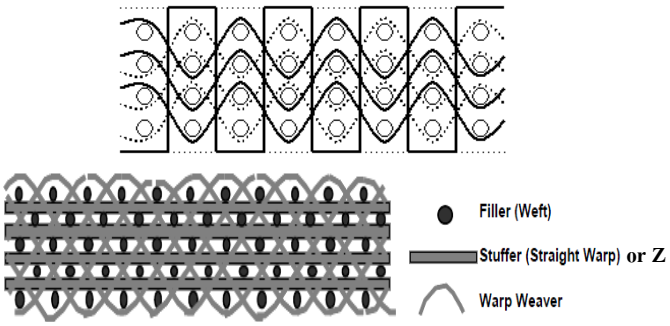
2.4.2 การทอแบบ 3D angle-interlock

รูปแบบโครงสร้างการทอแบบ 3D angle-interlock แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ 1) layer to layer และ 2) through-thickness โดยชนิด layer to layer ประกอบด้วยเส้นใยตามยาวและเส้นใยตามขวางที่จะเรียงตัวแบบทแยงมุมที่สลับขึ้นลงกัน (±bias) และเส้นใยตามยาวจะแทรกตัวอยู่ระหว่างเส้นใยตามขวาง โดยที่เส้นใยตามขวางจะทอสลับขึ้นลงไปตามทิศทางของความหนาและจะถูกถักทอแบบซิกแซกยึดกับเส้นใยตามยาวไปตามทิศทางความหนาของโครงสร้างการทอ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ส่วนชนิด through-thickness ประกอบด้วยเส้นใย 3 ชุด แบบเดียวกับรูปแบบโครงสร้างการทอ 3D orthogonal แต่เส้นใยตามยาวและเส้นใยตามขวางจะทอสลับขึ้นลงหรือทแยงมุมซึ่งกันและกันไปตามทิศทางของความหนา โดยมีเส้นใยในแนวแกน Z ทอตั้งฉากกับเส้นใยตามยาวและเส้นใยตามขวาง ซึ่งต่างจากชนิด layer to layer ที่เส้นใยตามยาวจะถูกล็อคด้วยเส้นใยตามขวาง สำหรับชนิด through-thickness เส้นใยตามยาวและเส้นใยตามขวางจะล็อคตัวซึ่งกันและกัน แล้วยังมีเส้นใยในแนวแกน Z มาช่วยจับยึดในโครงสร้างการทอ หรือรูปแบบที่เส้นใยตามยาวและเส้นใยตามขวางจะถูกล็อคด้วยเส้นใยในแนวแกน Z ที่สลับขึ้นลงไปตามความหนาของโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.15 แสดงรูปแบบโครงการทอแบบ 3D angle-interlock (a) ชนิด layer to layer (b) แสดงโครงสร้างกระบวนการทอแบบ 3 มิติ

[http://textlnfo.wordpress.com/2012/05/07/multiaxis-three-dimensional-3d/]

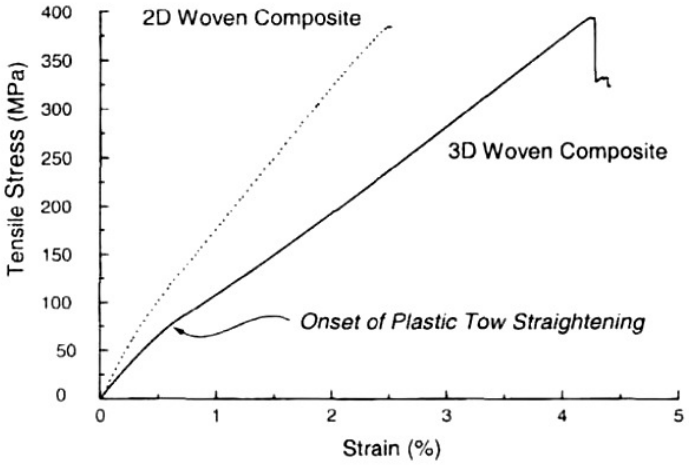


รูปที่ 2.16 แสดงรูปแบบโครงการทอแบบ 3D angle-interlock ชนิด through-thickness [Brian N. Cox and Gerry Flanagan, 1997]

2.5 การเปรียบเทียบสมบัติของการทอแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ

2.5.1. สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile properties)

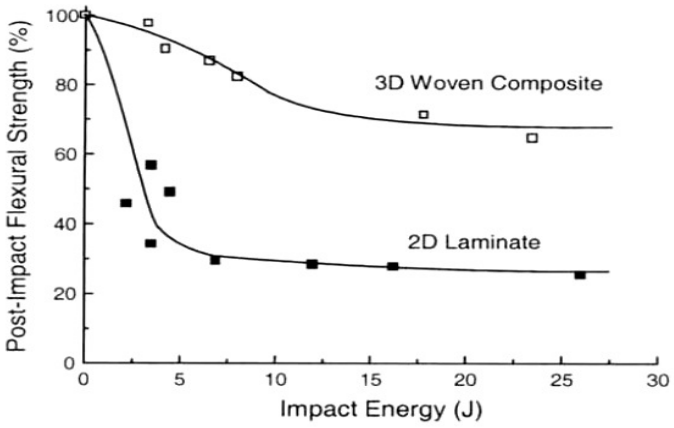
การทดสอบแรงดึงของรูปแบบการทอ 3 มิติ โดยศึกษาวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยทอแบบ 3 มิติ เปรียบเทียบกับการทอแบบ 2 มิติ ดังรูปที่ 2.17 พบว่า ค่ายังมอดูลัสของการทอแบบ 3 มิติ มีค่าต่ำกว่าการทอแบบ 2 มิติ และจากข้อมูลงานวิจัยของ Lee และคณะ 2002 ค่ายังมอดูลัสของการทอแบบ 3 มิติ ต่ำกว่าการทอแบบ 2 มิติ อยู่ 35 % ส่วนในงานวิจัยอื่น ๆ ค่ายังมอดูลัสของการทอแบบ 3 มิติ ต่ำกว่าการทอแบบ 2 มิติ อยู่ ในช่วงประมาณ 10-35 % (Ding et al.,1993, Guess et al., 1985) เนื่องจากรูปแบบ 3 มิติ มีเส้นใยในแนวแกน Z เป็นตัวประสานหรือจับยึดเส้นใยตามยาวและตามขวางไม่ให้แยกออกจากกัน แต่สำหรับการทดสอบแรงดึงเส้นใยที่อยู่ในแนวแกน Z เป็นส่วนที่รับแรงมากกว่าเส้นใยตามยาวและตามขวาง ทำให้เส้นใยแนวแกน Z เกิดความเสียหายก่อน จึงส่งผลให้เส้นใยตามยาวและตามขวางที่ไม่มีเส้นใยแกน Z ช่วยจับยึดจึงเกิดการแยกตัวออก ทำให้รูปแบบการทอแบบ 3 มิติมีสมบัติต้านทานต่อแรงดึงลดลง ซึ่งต่างจากรูปแบบการทอแบบ 2 มิติ ที่เส้นใยตามยาวและตามขวางมีการจับยึดซึ่งกันและกัน ทำให้เส้นใยทั้งสองทิศทางรับแรงดึงไปพร้อมๆ กัน ดังนั้นทำให้รูปแบบการทอ 2 มิติ มีความต้านทานต่อแรงดึงได้ดีกว่ารูปแบบการทอ 3 มิติ



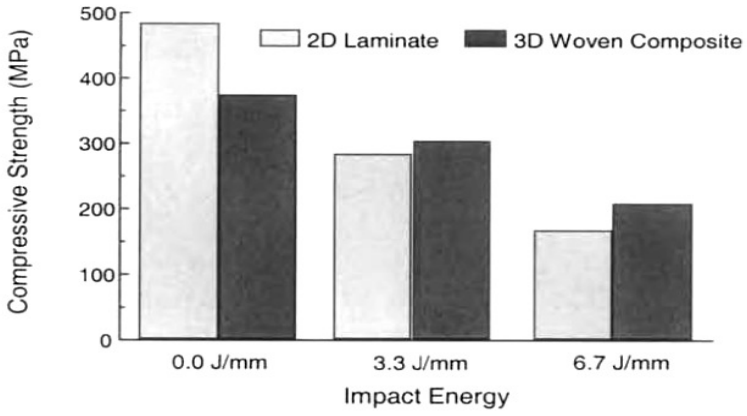
รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุผสมทอแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ

2.5.2. การทดสอบการกระแทกของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใย

ความเสียหายจากการกระแทกของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยทอแบบ 3 มิติ โดยใช้การกระแทกของหัวเจาะ (Rocket) ภายใต้ภาระแรงที่กระทำ การทดสอบอยู่ในช่วงระดับพลังงานต่ำถึงปานกลาง ขึ้นอยู่กับน้ำหนักที่ถ่วงสำหรับการเคลื่อนที่ความเร็วต่ำ จากการทดสอบพบว่า ผลของความเสียหายจากการกระแทกในการทอแบบ 3 มิติ มีความต้านทานการแยกตัวของเส้นใยได้ดีกว่าการทอแบบ 2 มิติ เนื่องจากการทอแบบ 3 มิติ มีการจับยึดเส้นใยในแกน Z มาร่วมในโครงสร้างการทอทำให้เกิดการแตกหักหรือรอยแตกบนชิ้นทดสอบได้น้อยกว่าการทอแบบ 2 มิติ และจากการกระแทกวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยทอแบบ 3 มิติ และ 2 มิติ ภายใต้พลังการกระแทกเดียวกันทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความแข็งแรงดัดของการทอแบบ 3 มิติ มีค่าสูงกว่าแบบ 2 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.18(a) ทดสอบการกระแทกของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยคาร์บอนคอมโพสิทกับอีพ๊อกซี่ ภายใต้พลังงานการกระแทก 2-6 จูล เพื่อศึกษาความแข็งแรงดัดของชิ้นทดสอบ พบว่า วัสดุผสมรูปแบบ 3 มิติ มีค่าความแข็งแรงมากกว่ารูปแบบ 2 มิติ อยู่ประมาณ 57 % และจากงานวิจัย Arendst และคณะ (1993) แสดงค่าความต้านแรงกดกับค่าพลังงานกระแทก ดังแสดงในรูปที่ 2.18(b) ชิ้นทดสอบเป็นวัสดุผสมแบบเดียวกับรูปที่ 2.18 (a) ศึกษาความต้านทานแรงกดภายใต้พลังงานการกระแทก พบว่า ที่พลังงานการกระแทก 0 J/mm วัสดุผสมแบบ 3 มิติ มีค่าความต้านทานแรงกดน้อยกว่าแบบ 2 มิติ อยู่ 100 MPa เมื่อพลังงานการกระแทกเพิ่มขึ้นเป็น 3.3 J/mm จะมีค่าความต้านทานแรงกดมากกว่าแบบ 2 มิติ อยู่ 25 MPa และพลังงานการกระแทก 6.7 J/mm จะมีค่าความต้านทานแรงกดมากกว่าแบบ 2 มิติ อยู่ 40 MPa สรุปได้ว่าความสามารถในการดูดซับพลังงานกระแทกของการทอแบบ 3 มิติ ได้ดีกว่าแบบ 2 มิติ



(a)



(b)

รูปที่ 2.18 ผลของพลังงานการกระแทกกับ (a) ความเค้นของการดัด และ (b) ความเค้นของการอัดระหว่างวัสดุผสมทอแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ

2.6 ทฤษฎีการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุผสม

ทฤษฎีการคำนวณพื้นฐานของชั้นลามิเนตเพื่อหาคุณสมบัติของวัสดุในแต่ละชั้น (Laminate) โครงสร้างของวัสดุผสม ประกอบด้วยวัสดุประเภทเส้นใยและเมตริกซ์ ซึ่งการวิเคราะห์โดยสมมติให้วัสดุผสมเป็นเนื้อเดียวกันและเป็นแบบออร์โททรอปิก วิเคราะห์โดยการใส่แรงหรือความเค้นเข้าไปและศึกษาการเสียรูป (deformation) หรือ ความเครียด สามารถคำนวณค่ามอดูลัสยืดหยุ่นและสมบัติทางกลอื่นๆ ได้จากแต่ละชั้นลามิเนต สำหรับค่าสมบัติทางกลของเส้นใยทอแนวเดียวในการวิเคราะห์ระดับกลไก มหภาคสามารถคำนวณโดยใช้สมมติฐานตามทฤษฎีความเครียด (Equal strain theory) คือ สมมติให้ความเครียดของวัสดุประกอบมีค่าเท่ากันทั้งหมดไม่ว่าจะเป็น

ส่วนที่เป็นเส้นใยหรือเมตริกซ์โดยสมบัติทางกล เช่น ค่า ยังมอดูลัส ปัวส์ซอง และ มอดูลัสการเฉือนของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยZ (เตชพัทธ์ ฟักเปี่ยมและสันติสุข นันทิยกุล, 2553) ตามสมการต่อไปนี้

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \tag{2.1}$$

$$E_2 = \frac{E_f E_m}{E_f V_m + E_m V_f} \tag{2.2}$$

$$\nu_{12} = \nu_m V_m + \nu_f V_f \tag{2.3}$$

$$G_f = \frac{E_f}{2(1+\nu_f)} \tag{2.4}$$

$$G_m = \frac{E_m}{2(1+\nu_m)} \tag{2.5}$$

$$G_{12} = \frac{G_f G_m}{G_f V_m + G_m V_f} \tag{2.6}$$

โดยที่

$E_{f=}$ มอดูลัสยืดหยุ่นของเส้นใย

E_m = มอดูลัสยืดหยุ่นของเมตริกซ์

$E_{1=}$ มอดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุผสมตามแนวยาวของเส้นใย

$E_{2=}$ มอดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุผสมตามแนวขวางของเส้นใย

ν_f = สัดส่วนปัวส์ซองของเส้นใย

ν_m = สัดส่วนปัวส์ซองของเมตริกซ์

ν_{12} = สัดส่วนปัวส์ซองของวัสดุผสม

V_f = สัดส่วนปริมาตรของเส้นใยต่อปริมาตรทั้งหมดของวัสดุผสม

V_m = สัดส่วนปริมาตรของเมตริกซ์ต่อปริมาตรทั้งหมดของวัสดุผสม

G_f = มอดูลัสเฉือนของเส้นใย

G_m = มอดูลัสเฉือนของเมตริกซ์

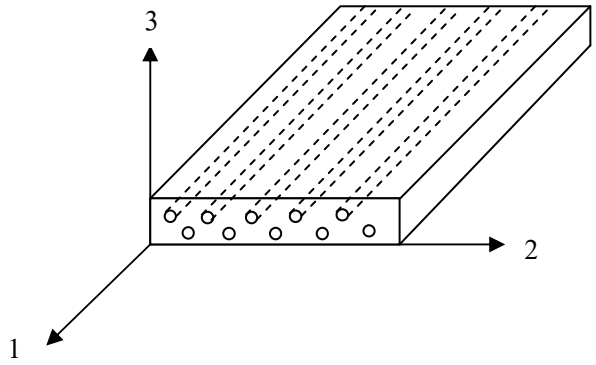
G_{12} = มอดูลัสเฉือนของวัสดุผสมในระนาบอ้างอิง

2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดเบื้องต้น (Basic Stress-strain Relations)

[David Roylance, 2000]

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดสำหรับการวิเคราะห์ในวัสดุผสมเป็นเนื้อเดียวกันและมีสมบัติเหมือนกันไม่ขึ้นกับทิศทางเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติแบบไอโซทรอปิก (Isotropic) คือ วัสดุที่มีค่ามอดูลัสยืดหยุ่นกับมอดูลัสเฉือนไม่ขึ้นกับทิศทางใดๆ ทำให้การศึกษาค่ามอดูลัสยืดหยุ่นในทิศทางใดๆไม่มีผลต่อสมบัติทางกลของวัสดุ และวัสดุมีลักษณะเป็นวัสดุที่มีเนื้อเดียวกันและมีความต่อเนื่อง

วัสดุประเภทออร์โททรอปิก สมบัติทางกลของวัสดุจะมีความแตกต่างกันไปตามทิศทางของแต่ละแกน ความแข็งแรงของวัสดุจะขึ้นอยู่กับทิศทางที่ขนานกับเส้นใยมากกว่าในทิศทางตามขวาง ดังรูปที่ 1.19 มอดูลัส E_1 ในทิศทางจะมีค่ามากกว่าทิศทางตามขวาง (E_2 และ E_3) เพราะเป็นทิศทางเดียวกับเส้นใย จะได้ว่า $E_1 \neq E_2 \neq E_3$ แต่สำหรับคุณสมบัติในระนาบขวางกับทิศทาง แบบไอโซทรอปิก ประมาณได้ว่า ($E_2 = E_3$)



รูปที่ 2.19 ทิศทางของวัสดุประเภทออร์โททรอปิก

วัสดุผสมที่มีความเค้นหรือแรงมากระทำในแนวแกนหลัก (Principal Axes) เช่น แนวแกน 1, 2 และ 3 ทำให้ได้สมการในเทอมของความเค้น-ความเครียด ดังนี้

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_1} - \nu_{21}\frac{\sigma_2}{E_2}$$

$$\varepsilon_2 = -\nu_{12}\frac{\sigma_1}{E_1} + \frac{\sigma_2}{E_2} \qquad (2.7)$$

$$\gamma_{12} = \frac{\tau_{12}}{G_{12}}$$

โดยที่

E_1 = มอดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุผสมตามแนวยาวของเส้นใย

E_2 = มอดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุผสมตามแนวขวางของเส้นใย

G_{12}= มอดูลัสเฉือนของวัสดุผสมในระนาบอ้างอิง

ν_{12} และ ν_{21} = ค่าสัดส่วนปัวส์ซองของวัสดุผสม

หาค่า ν_{12} คือ ความเครียดที่เกิดในทิศที่ 2 เมื่อมีความเครียดหรือความเค้นมากระทำในทิศที่ 1 โดย $\nu_{12} > \nu_{21}$ ได้จากสมการ (2.8)

$$\frac{\nu_{12}}{E_1} = \frac{\nu_{21}}{E_2} \text{ หรือ } \nu_{12} = \nu_{21}\frac{E_1}{E_2} \tag{2.8}$$

ในเทอมของความเค้นสำหรับความเครียดในสมการที่ (2.7) โดยจัดรูปสมการใหม่ดังนี้

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \frac{E_1\varepsilon_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} + \frac{\nu_{21}E_1\varepsilon_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}}\\ \sigma_2 &= \frac{\nu_{12}E_2\varepsilon_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} + \frac{E_2\varepsilon_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}}\\ \tau_{12} &= G_{12}\gamma_{12}\end{aligned} \tag{2.9}$$

จากสมการที่ (2.7) และ (2.9) มีค่าคงที่อิลาสติกที่กล่าวในข้างต้นคือ E_1 E_2 ν_{12} ν_{21} และ G_{12} สามารถเขียนในรูปสมการเมตริกซ์ ดังสมการที่ (2.10) และ (2.12)

$$\varepsilon_{12} = S\sigma_{12} \tag{2.10}$$

โดยที่: $\varepsilon_{12} = \{\varepsilon_1\ \varepsilon_2\ \gamma_{12}\}$ และ $\sigma_{12} = \{\sigma_1\ \sigma_2\ \tau_{12}\}$

ค่า Compliance matrix หรือ [S] มีค่าดังนี้

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \tag{2.11}$$

กำหนดให้ $\mathbf{S}_{12} = \mathbf{S}_{21}$

$$\sigma_{12} = C\varepsilon_{12} \tag{2.12}$$

ค่า Stiffness matrix [**C**] มีค่าดังนี้

$$C = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & \frac{\nu_{12}E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ \frac{\nu_{21}E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & \frac{E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

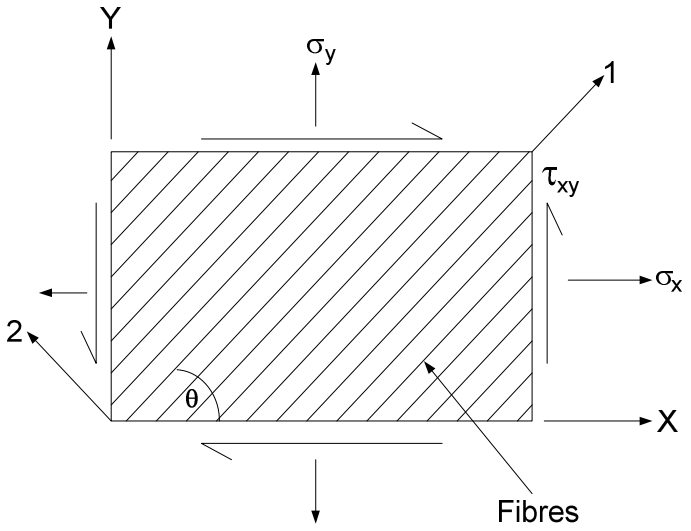
กำหนดให้ $C_{12} = C_{21}$

2.8 แรงที่ไม่ได้อยู่ในแนวแกนของวัสดุผสม (Off –Axis Loading of a Unidirectional Composite)

[M.F. Ashby, 2005]

สมบัติของแผ่นวัสดุประกบกันเป็นชั้นที่ขึ้นอยู่กับทิศทางของเส้นใย โดยปกติทิศทางของเส้นใยมีการเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละชั้น ดังนั้นเส้นใยที่อยู่ในทิศทางตามแนวยาวเดียวกันจะถูกกระทำภายใต้แรงหรือความเค้นเดียวกัน ส่วนเส้นใยที่ถูกความเค้นมากระทำให้เกิดการหมุนหรือทำมุมกับแนวยาวหรือแรงไม่ได้อยู่ในแนวแกนของเส้นใย เรียกว่า Off-axis loading

โดยการเปรียบเทียบการวิเคราะห์การจัดเรียงชั้นของวัสดุ (Laminate of material) สามารถพิจารณาในแต่ละชั้นของเส้นใยที่ทำมุมต่างกันได้ สำหรับการวิเคราะห์ค่า principal stress ของวัสดุที่มีคุณสมบัติทางกายภาพที่เหมือนกันทุกทิศทาง ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แผ่นลามิน่าบนแกน 1-2 ที่หมุนทำมุม θ กับแกนอ้างอิง X-Y

ซึ่งสามารถเขียนในรูปสมการที่ (2.14) และ (2.15)

$$\sigma_{12} = T\sigma_{xy} \tag{2.14}$$

$$\bar{\varepsilon}_{12} = T\bar{\varepsilon}_{xy} \tag{2.15}$$

โดยที่

$\sigma_{12} = \{\sigma_1\ \sigma_2\ \tau_{12}\}$ และ $\sigma_{xy} = \{\sigma_x\ \sigma_y\ \tau_{xy}\}$

$\bar{\varepsilon}_{12} = \{\varepsilon_1\ \varepsilon_2\ \frac{1}{2}\gamma_{12}\}$ และ $\bar{\varepsilon}_{xy} = \{\varepsilon_x\ \varepsilon_y\ \frac{1}{2}\gamma_{xy}\}$

และ Transformation matrix หรือ [T] มีค่าดังนี้

$$T = \begin{Bmatrix} m^2 & n^2 & 2mn \\ n^2 & m^2 & -2mn \\ -mn & mn & (m^2 - n^2) \end{Bmatrix} \tag{2.16}$$

กำหนดให้ $m = \cos\theta$ และ $n = \cos\theta$

จากการวิเคราะห์อิลาสติกซิตี้ (elasticity) มีอิทธิพลต่อความเครียดจะต้องรู้ค่าความเค้นที่มากระทำตามสมบัติอิลาสติกของวัสดุ ซึ่งแกนอ้างอิงที่รู้คือแกน 1-2 แต่แกนที่ไม่ทราบคือแกน x-y สามารถแก้ปัญหาได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ได้ ซึ่งสมการการเปลี่ยนแปลงมีดังนี้

$$\sigma_{xy} = \bar{C}\varepsilon_{xy} \tag{2.17}$$

ค่า $\bar{C}$ คือ Transformation stiffness matrix โดยที่ $[\bar{C}] = [T]^{-1}[C][T]$ สามารถหาได้จากสมการที่ (2.18)

$$\begin{aligned}
\bar{C}_{11} &= C_{11}m^4 + 2(C_{12}+2C_{33})n^2m^2 + C_{22}n^4 \\
\bar{C}_{22} &= C_{11}n^4 + 2(C_{12}+2C_{33})n^2m^2 + C_{22}m^4 \\
\bar{C}_{12} &= (C_{11}+C_{22}-4C_{33})n^2m^2 + C_{12}(m^4+n^4) \\
\bar{C}_{12} &= (C_{11}+C_{22}-2C_{12}-2C_{33})n^2m^2 + C_{33}(m^4+n^4) \\
\bar{C}_{13} &= (C_{11}-C_{12}-2C_{33})nm^3 + (C_{12}-C_{22}+2C_{33})n^3m \\
\bar{C}_{23} &= (C_{11}-C_{12}-2C_{33})n^3m + (C_{12}-C_{22}+2C_{33})nm^3
\end{aligned} \tag{2.18}$$

ทำนองเดียวกันความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดมีค่าแปรผันกับ Transformation stiffness matrix ดังนี้

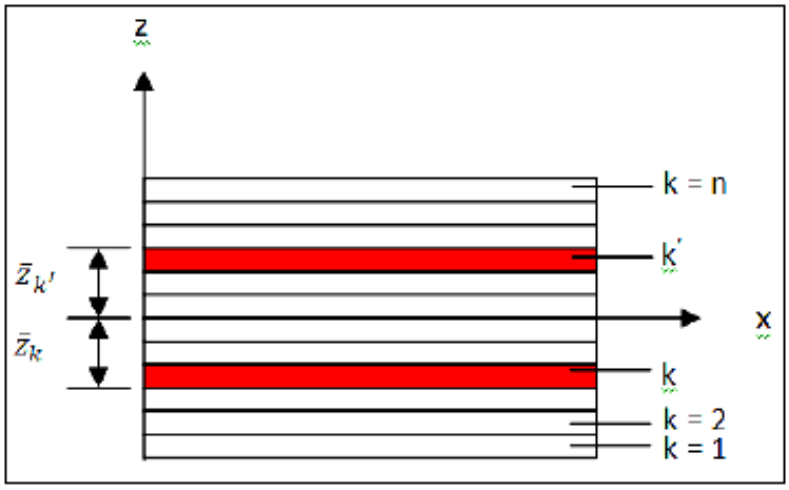
$$\varepsilon_{xy} = \bar{C}^{-1}\sigma_{xy} = \bar{S}\sigma_{xy} \tag{2.19}$$

2.9 ความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปของลามิเนต (Stiffness of laminate)

โครงสร้างของแผ่นบางที่มาประกบกันเป็นวัสดุผสม ทำการขึ้นรูปด้วยการนำมาวางซ้อนกันเป็นชั้นๆ ในทิศทางเดียวกันหรือกำหนดทิศทางและความหนาตามสมบัติที่ต้องการ สมบัติกล่าวถึงคือความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปและความแข็งแรง ซึ่งวัสดุผสมแผ่นประกบนิยมใช้ในการทำปีก ใบพัด และหางของเครื่องบิน และใช้ในการทำถังเก็บน้ำ เป็นต้น

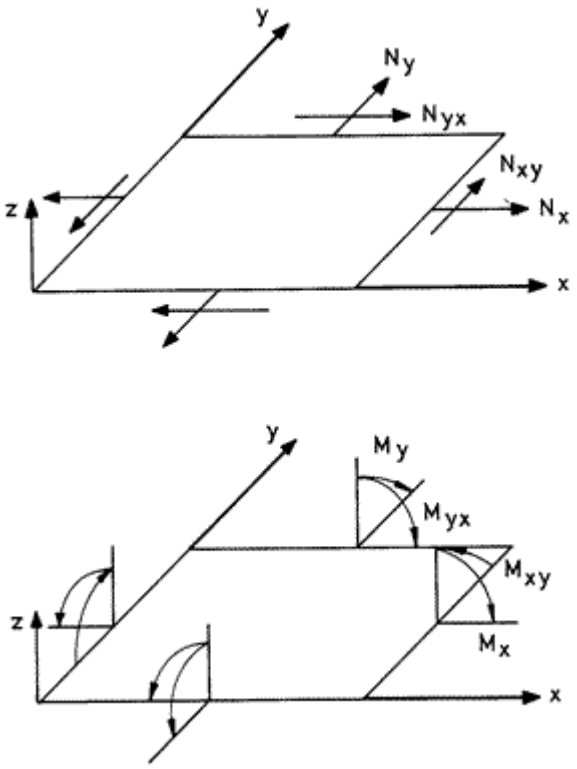
ข้อตกลงในการกำหนดสัญลักษณ์ของลามิเนตที่มีการจัดเรียงชั้นเส้นใยตั้งแต่สองชั้นวางซ้อนขึ้นไปและลำดับของการลามิเนตเป็นดังนี้ เช่น สำหรับ 4 ชั้นของลามิเนตที่มีการจัดเรียงข้ามชั้นกัน ที่มีแนวเส้นใยตามลำดับที่ 0°, 90°, 90°, 0° เรียงจากพื้นผิวบนสู่พื้นผิวต่ำกว่าจะแสดงในรูป $(0 / 90)_S$ ซึ่ง 'S' ต่อท้ายหมายถึงลำดับการเรียงซ้อนเป็นสมมาตรกัน สังเกตตามการจัดเรียงชั้นที่ความหนาช่วงกลางของการลามิเนต โดยลามิเนต $(0/45/90)_s$ และ $(45/90/0)_s$ ที่มีจำนวนชั้นเหมือนกัน แต่ที่แตกต่างกันคือลำดับการซ้อนกัน (F.L. Matthews and R.D. Rawlings “Composite Materials: Engineering and Science” 1994)

สำหรับวัสดุที่มีการจัดเรียงชั้นของเส้นใยแบบสมมาตรด้วยชั้นออร์โททรอปิก โดยวัสดุผสมที่จัดว่าเป็นการจัดเรียงแบบสมมาตร คือ วัสดุที่มีการจัดเรียงของชั้นแต่ละชั้นที่มีระยะห่างเท่าๆ กันจากระนาบอ้างอิงมีความหนา การวางตัวของแนวเส้นใยและคุณสมบัติของชั้นลามิน่าที่เหมือนกัน เมื่อพิจารณาชั้นของลามิเนตที่มี n ชั้น ดังรูปที่ 2.21 (เตชพัทธ์ ฟักเปี่ยมและสันติสุข นันทิยกุล, 2553)



รูปที่ 2.21 ลามิเนตแบบสมมาตรและชั้นแต่ละชั้นของลามิเนต

ลามิเนตภายใต้แรงลัพธ์ที่อยู่ในระนาบ (N) และโมเมนต์ (M) ผลลัพธ์ดังแสดงใน รูปที่ 2.22 ผลของแรงลัพธ์ต่อหน่วยความกว้างและ ผลลัพธ์ของโมเมนต์ต่อหน่วยความกว้าง



รูปที่ 2.22 แรงลัพธ์ที่กระทำบนแผ่นลามิเนต

ในแนวระนาบผลลัพธ์ของ แรงและโมเมนต์มีความสัมพันธ์กับความเครียดกลางระนาบของลามิเนตและส่วนโค้งงอ มีสมการดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

ในเทอมของเมตริกซ์ [A],[B] และ[D] สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.21)

$$[\mathrm{A}]=\sum_{\mathrm{k}=1}^{\mathrm{n}}[\overline{\mathrm{C}}]_{\mathrm{k}}(\mathrm{Z}_{\mathrm{k}}-\mathrm{Z}_{\mathrm{k}-1})$$

$$[B]=\frac{1}{2}\sum_{k=1}^{n}[\overline{C}]_{k}(Z_{k}^{2}-Z_{k-1}^{2}) \qquad (2.21)$$

$$[D]=\frac{1}{3}\sum_{k=1}^{n}[\overline{C}]_{k}(Z_{k}^{3}-Z_{k-1}^{3})$$

สมการดังข้างต้นตั้งอยู่บนสมมติฐานที่สำคัญดังต่อไปนี้

i. พฤติกรรมความเค้นเกิดขึ้นภายในระนาบแต่ละชั้น

ii. มีการเปลี่ยนรูปร่างเล็กน้อยของแรงเฉือนตามความหนา

iii. มีพฤติกรรมยืดหยุ่นเป็นแบบเชิงเส้น

iv. ความเครียด การหมุน และส่วนโค้งงอ เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย

ในกรณีที่วัสดุเป็นวัสดุจัดเรียงแบบสมมาตร ค่าความสัมพันธ์ของความเครียดในระนาบอ้างอิงสัมพันธ์กับภาระที่กระทำต่อชิ้นงานแสดงมีค่าดังนี้

$$\begin{bmatrix}\varepsilon_{x}^{0}\\ \varepsilon_{y}^{0}\\ \gamma_{s}^{0}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}a_{xx} & a_{xy} & a_{xs}\\ a_{yx} & a_{yy} & a_{ys}\\ a_{sx} & a_{sy} & a_{ss}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}N_{x}\\ N_{y}\\ N_{s}\end{bmatrix} \qquad (2.22)$$

เมื่อ [a] =[A]$^{-1}$ โดยที่ [a] เป็นอินเวิร์สเมตริกซ์ของเมตริกซ์ [A] ดังสมการ (2.23)

$$\left[\mathrm{A}^{-1}\right]=\frac{1}{\det[\mathrm{A}]}\mathrm{adj}[\mathrm{A}]=\begin{bmatrix}a_{xx} & a_{xy} & a_{xs}\\ a_{yx} & a_{yy} & a_{ys}\\ a_{sx} & a_{sy} & a_{ss}\end{bmatrix} \qquad (2.23)$$

จากการวิเคราะห์ลามิเนตนั้นอาจสามารถวิเคราะห์เป็นวัสดุแอนิโซทรอปิกที่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งสามารถแสดงออกมาเป็นสมการระหว่างค่าความเค้นเฉลี่ย ความเครียดเฉลี่ย และค่าเชิงประสิทธิผล และสมการที่ 2.23 สามารถเขียนออกมาในเทอมของค่าคงที่ทางวิศวกรรมได้โดยการแทนค่าคงที่ต่างๆ ของลามิเนตลงในสมการจากการวิเคราะห์แบบมหภาค การตอบสนองที่ได้ของค่ามอดูลัสของลามิเนตและค่าความเค้นเฉลี่ยเป็นดังนี้

$$\begin{bmatrix}\overline{\sigma}_x\\ \overline{\sigma}_y\\ \overline{\tau}_s\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}N_x\\ N_y\\ N_s\end{bmatrix}\frac{1}{h} \tag{2.24}$$

จากการเปรียบเทียบกับในลามินา ค่าความสัมพันธ์ระหว่างเครียดและแรงสำหรับลามิเนตสามารถเขียนในรูปของค่าคงที่ทางวิศวกรรมได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix}\varepsilon_x^0\\ \varepsilon_y^0\\ \gamma_s^0\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\frac{1}{\overline{E}_x} & \frac{\nu_{yx}}{\overline{E}_y} & \frac{\overline{\eta}_{sx}}{\overline{G}_{xy}}\\ \frac{-\overline{\nu}_{xy}}{\overline{E}_x} & \frac{1}{\overline{E}_y} & \frac{\overline{\eta}_{sy}}{\overline{G}_{xy}}\\ \frac{\overline{\eta}_{xs}}{\overline{E}_x} & \frac{\overline{\eta}_{ys}}{\overline{E}_y} & \frac{1}{\overline{G}_{xy}}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}N_x\\ N_y\\ N_s\end{bmatrix}\frac{1}{h} \tag{2.25}$$

เมื่อนำสมการมาพิจารณาโดยเป็นสมการที่เท่ากันระหว่างเทอมของสมการที่ 2.22 และเทอมของค่าเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ ในสมการที่ 2.25 จะได้ความสัมพันธ์ของภายในระนาบของค่าคงที่การยืดหยุ่นสำหรับลามิเนตที่มีความสมดุลและสมมาตรที่มีความหนา h ของวัสดุที่ลามิเนตทั้งหมดจะได้ว่า

$$\begin{aligned}&E_x=\frac{1}{ha_{xx}},E_y=\frac{1}{ha_{yy}},G_{xy}=\frac{1}{ha_{ss}}\\ &\nu_{xy}=-\frac{a_{ys}}{a_{xx}},\nu_{yx}=-\frac{a_{xs}}{a_{yy}}\\ &\eta_{sx}=\frac{a_{xs}}{a_{ss}},,\eta_{xs}=\frac{a_{sx}}{a_{xx}},\eta_{ys}=\frac{a_{sy}}{a_{yy}},\eta_{sy}=\frac{a_{ys}}{a_{ss}}\end{aligned} \tag{2.26}$$

2.10 วิเคราะห์สมบัติของวัสดุผสมการทอแบบ 3 มิติ

สมบัติการเปลี่ยนแปลงแบบคงที่ของอิลาสติกตามแนวแกนวัสดุผสมโดยใช้สมการพื้นฐานในการคำนวณสมบัติอิลาสติกตามแนวแกนวัสดุผสม โดยใช้ความสัมพันธ์ของสมการดังต่อไปนี้ (Mohammed F. Aly et al., 2010)

$$
\begin{aligned}
E_1 &= E_f V_f + E_m(1-V_f) \\
E_2 &= E_m\left[\frac{E_f + E_m + (E_f - E_m)V_f}{E_f + E_m - (E_f - E_m)V_f}\right] \\
\nu_{12} &= \nu_f V_f + \nu_m(1-V_f) \\
\nu_{23} &= \nu_f V_f + \nu_m(1-V_f)\left[\frac{1+\nu_m - \nu_{12}E_m/E_1}{1-\nu_m^2 + \nu_m\nu_{12}E_m/E_1}\right] \\
G_{12} &= G_m\left[\frac{G_f + G_m + (G_f - G_m)V_f}{G_f + G_m - (G_f - G_m)V_f}\right] \\
G_{23} &= \frac{E_2}{2(1+\nu_{23})}
\end{aligned}
\qquad (2.27)
$$

โดยที่

E_f = มอดูลัสยืดหยุ่นของเส้นใย

E_m = มอดูลัสยืดหยุ่นของเมตริกซ์

E_1 = มอดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุผสมตามแนวยาวของเส้นใย

E_2 = มอดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุผสมตามแนวขวางของเส้นใย

ν_f = สัดส่วนปัวส์ซองของเส้นใย

ν_m = สัดส่วนปัวส์ซองของเมตริกซ์

ν_{12} = สัดส่วนปัวส์ซองของวัสดุผสม

V_f = ค่าสัดส่วนปริมาตรของเส้นใยต่อปริมาตรทั้งหมดของวัสดุผสม

V_m = ค่าสัดส่วนปริมาตรของเมตริกซ์ต่อปริมาตรทั้งหมดของวัสดุผสม

G_f = มอดูลัสเฉือนของเส้นใย

G_m = มอดูลัสเฉือนของเมตริกซ์

G_{12} = มอดูลัสเฉือนของวัสดุผสมในระนาบอ้างอิง

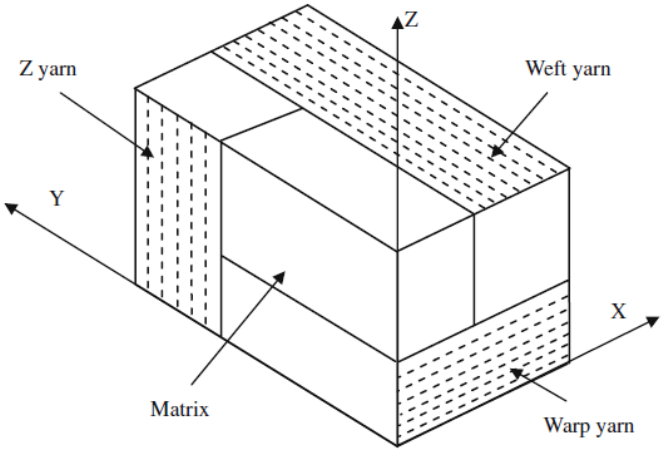
หลังจากคำนวณค่าคงที่ของอิลาสติกตามแนวแกนวัสดุผสม สามารถนำมาหาค่าอีลาสติกของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยทอ โดยใช้ความสัมพันธ์จากสมการที่ 2.28 ซึ่งวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยทอ แบบ 3 มิติ จะมีค่า E_2 จะมีค่าเท่ากับ E_3 ค่า $\nu_{12}=\nu_{13}$ และค่า $G_{12}=G_{13}$

$$
\begin{aligned}
&\left[\frac{2}{E_1}\frac{E_1(E_1+(1-\nu_{12}^2)E_2)-\nu_{12}^2E_2^2}{E_1(E_1+2E_2)+(1+\nu_{12}^2)E_2^2}\right]^{UD}=\left[\frac{1}{E_1}\right]^{WF}\\
&\left[\frac{4}{E_1}\frac{\nu_{12}E_2(E_1-\nu_{12}^2E_2)}{E_1(E_1+2E_2)+(1+\nu_{12}^2)E_2^2}\right]^{UD}=\left[\frac{\nu_{12}}{E_1}\right]^{WF}\\
&\left[\frac{1}{E_1}\frac{E_1(\nu_{12}+\nu_{23}+\nu_{12}\nu_{23})+\nu_{12}^2E_2^2}{E_1+(1+2\nu_{12})E_2}\right]^{UD}=\left[\frac{\nu_{23}}{E_1}\right]^{WF}\\
&\left[\frac{(1-\nu_{23}^2)E_1^2+(1+2\nu_{12}+2\nu_{12}\nu_{23})E_1E_2-\nu_{12}^2E_2^2}{E_1E_2(E_1+(1+2\nu_{12})E_2)}\right]^{UD}=\left[\frac{1}{E_3}\right]^{WF}\\
&\left[\frac{1}{G_{12}}\right]^{UD}=\left[\frac{1}{G_{12}}\right]^{WF}\\
&\left[\frac{1+\nu_{23}}{E_2}+\frac{1}{2G_{12}}\right]^{UD}=\left[\frac{1}{G_{23}}\right]^{WF}
\end{aligned}
\qquad (2.28)
$$

โดยที่ UD คือ ค่าคงที่ของอิลาสติกตามแนวแกนวัสดุผสม

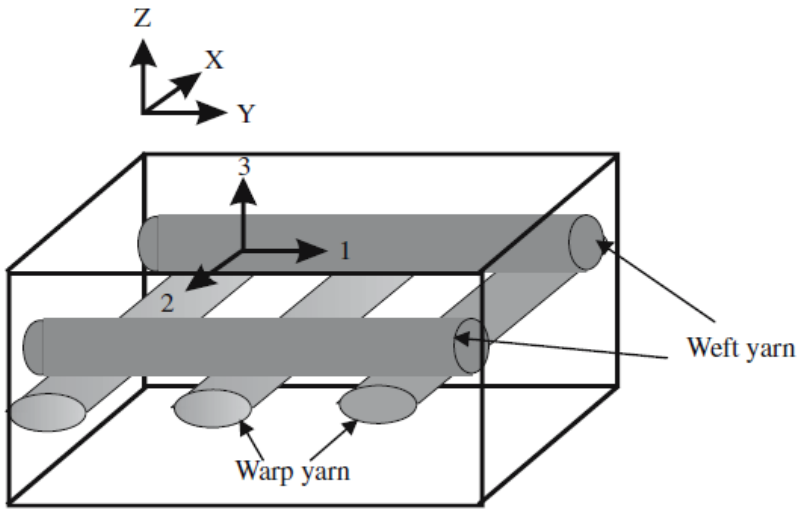
WF คือ ค่าอีลาสติกของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยทอ

สำหรับโครงสร้างการทอแบบ 3D orthogonal ที่มีเส้นใยตามยาว (warp yarns) และเส้นใยตามขวาง (weft yarns) มีการผูกมัดร่วมกันอย่างต่อเนื่อง โดยมีเส้นใยในทิศทางแกน Z วิ่งผ่านตามความหนาของผืนเส้นใย ซึ่งเส้นใยตามยาวและตามขวางถูกจัดให้อยู่ในระนาบที่มีความยืดหยุ่นสูงและมีความแข็งแรง แล้วมีเส้นใยวิ่งผ่านตามความหนาเพื่อรักษาเสถียรภาพของโครงสร้างการทอ สำหรับรูปแบบโครงสร้างเส้นใยตามยาวและตามขวาง ร่วมกันกับเส้นใยแนวแกน Z ที่ตั้งฉากซึ่งกันและกันของเส้นใย ภายในหนึ่งหน่วยเซลล์ของเส้นใยทอแบบ 3 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.23

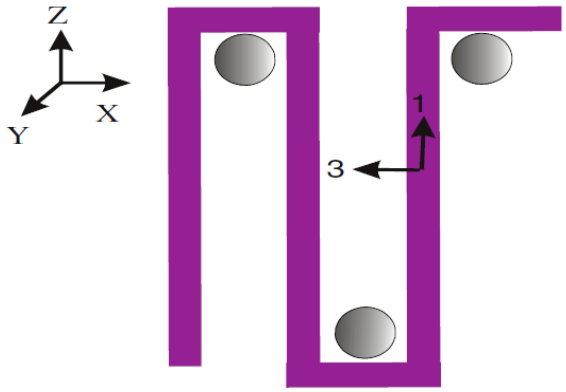


รูปที่ 2.23 รูปแบบหน่วยเซลล์สำหรับวัสดุผสมการทอแบบ 3D orthogonal

รูปแบบหน่วยเซลล์สำหรับวัสดุผสมการทอแบบ 3D orthogonal มีส่วนประกอบของเส้นใย (เส้นใยตามยาว เส้นใยตามขวาง และเส้นใยในแนวแกน Z) และเมตริกซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.23 สำหรับในทิศทาง X,Y และ Z จะถูกกำหนดไปตามแนวแกนของเส้นใยตามยาว (warp yarns) เส้นใยตามขวาง (weft yarns) และ เส้นใยในส่วนของความหนา (Z yarns) และเส้นใยแต่ละเส้นมีการทำมุมกันในทิศทาง 1-2-3 ซึ่งเส้นใยตามแนวยาวของเส้นใย คือ ทิศทางที่ 1 เส้นใยที่ตั้งฉากกับแนวแกน คือ ทิศทางที่ 2 และ ทิศทางที่ 3 คือ ที่มีการตั้งฉากกับระนาบ 1-2 เส้นใยที่ทำมุมกับทิศทาง 1-2-3 ดังแสดงในรูปที่ 2.24 และ 2.25



รูปที่ 2.24 เส้นใยตามแนวยาวและขวางในหน่วยเซลล์



รูปที่ 2.25 เส้นใยแนวแกน Z ในหน่วยเซลล์

2.11 ค่า Stiffness and Compliances Matrices สำหรับในหน่วยเซลล์รูปแบบ 3 มิติ

สำหรับวัสดุที่ออร์โททรอปิก ค่า Stiffness matrix [C] ที่ทิศทาง 1-2-3

$$\begin{bmatrix}\sigma_{11}\\ \sigma_{22}\\ \sigma_{33}\\ \sigma_{23}\\ \sigma_{31}\\ \sigma_{12}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0\\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0\\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\varepsilon_{11}\\ \varepsilon_{22}\\ \varepsilon_{33}\\ 2\varepsilon_{23}\\ 2\varepsilon_{31}\\ 2\varepsilon_{12}\end{Bmatrix} \tag{2.29}$$

[C] คือ stiffness matrix และ [S] คือ compliance matrix โดยที่ [S] เป็นอินเวิร์สเมตริกซ์ของเมตริกซ์ [C]

$$[S]=[C]^{-1}=\begin{bmatrix}1/E_1 & -\nu_{13}/E_1 & -\nu_{13}/E_1 & 0 & 0 & 0\\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{23}/E_2 & 0 & 0 & 0\\ -\nu_{13}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{31} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12}\end{bmatrix} \tag{2.30}$$

โดยที่ E_1, E_2, E_3, G_{12}, G_{13}, G_{23}, ν_{12}, ν_{13}, ν_{23} คือ ค่ายังมอดูลัส มอดูลัสเฉือน และค่าอัตราส่วนปัวส์ซองของวัสดุผสมเส้นใย ตามลำดับ

สำหรับค่า transformation matrix [T] มีดังนี้

$$[T]_{\varepsilon} = \begin{bmatrix} l_1^2 & m_1^2 & n_1^2 & 2m_1n_1 & 2l_1n_1 & 2l_1m_1 \\ l_2^2 & m_2^2 & n_2^2 & 2m_2n_2 & 2l_2n_2 & 2l_2m_2 \\ l_3^2 & m_3^2 & n_3^2 & 2m_3n_3 & 2l_3n_3 & 2l_3m_3 \\ 2l_2l_3 & 2m_2m_3 & 2n_2n_3 & 2(m_2n_3+m_3n_2) & 2(l_2n_3+l_3n_2) & 2(l_2m_3+l_3m_2) \\ 2l_1l_3 & 2m_1m_3 & 2n_1n_3 & 2(m_1n_3+m_3n_1) & 2(l_1n_3+l_3n_1) & 2(l_1m_3+l_1m_3) \\ 2l_1l_2 & 2m_1m_2 & 2n_1n_3 & 2(m_1n_2+m_2n_1) & 2(l_1n_2+l_2n_1) & 2(l_1m_2+l_1m_2) \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

โดย $l_i = \cos(i,x), m_i = \cos(i,y), n_i = \cos(i,z)\ (i = 1,2,3)$

ค่า Transformed compliance matrix คือ $[\bar{S}]$ ดังแสดงในสมการ 2.32

$$[\bar{S}] = [T_{\varepsilon}]^{-1}[S][T_{\varepsilon}] \quad (2.32)$$

สำหรับเส้นใยตามยาวในหน่วยเซลล์ (ในรูปที่ 2.14) จะได้ว่า $[\bar{S}] = [S]$

สำหรับเส้นใยตามขวาง ค่า Transformed compliance matrix จะได้ว่า $[\bar{S}] = [T_2]^{-1}[S][T_2]$ โดยที่ $[T_2]$ มีค่า l_1=0, l_2=-1, l_3=0, m_1=1, m_2=0, m_3=0, n_1=0, n_2=0, n_3=1

สำหรับเส้นใยตามแกน Z ค่า Transformed compliance matrix จะได้ว่า $[\bar{S}] = [T_3]^{-1}[S][T_3]$ โดยที่ $[T_2]$ มีค่า l_1=0, l_2=0, l_3=1, m_1=0, m_2=1, m_3=0, n_1=-1, n_2=0, n_3=0

จากนั้นมาคำนวณหาค่าเมตริกซ์ [A] ของการทอแบบ 3 มิติ ในทำนองเดียวกับในหัวข้อที่ 2.9 แล้วนำมาหาสมบัติทางกลของลามิเนตในแนวแกนหลักได้ดังสมการต่อไปนี้

$E_x = \frac{1}{ha_{xx}}, E_y = \frac{1}{ha_{yy}}, \nu_{xy} = -\frac{a_{ys}}{a_{xx}}, \nu_{yx} = -\frac{a_{xs}}{a_{yy}}$ โดยค่า h คือ ความหนาของลามิเนต

จากขั้นตอนในการหาสมบัติทางกลของวัสดุผสมจากการระบุค่าต่างๆ ของวัสดุผสมแบบลามิเนต จะได้ผลลัพธ์สุดท้ายเป็นค่าสมบัติทางกลที่เราจะต้องใช้ในการทำการศึกษาเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบต่อไป

2.12 สมบัติความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุ

สมบัติความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุที่จะกล่าวถึงในหัวข้อนี้ ประกอบด้วย ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ ความต้านทานการเจาะทะลุจำเพาะ และพลังงานดูดซับจำเพาะ ดังรายละเอียด ต่อไปนี้

2.12.1 ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ (Areal density) คือ น้ำหนักของชิ้นทดสอบต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ ดังนั้น หน่วยของความหนาแน่นเชิงพื้นที่จึงเป็นหน่วยของกิโลกรัมต่อตารางเมตร

ความหนาแน่นเชิงพื้นที่= น้ำหนัก / พื้นที่หน้าตัด

$$\text{หรือ } \text{Areal density} = \frac{W}{A}\left(\text{kg/m}^2\right)$$

2.12.2 ความต้านทานการเจาะทะลุจำเพาะ (Specific puncture load) คือ การรับแรงสูงสุดต่อความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของชิ้นทดสอบ

ค่าความต้านทานการเจาะทะลุจำเพาะ = แรงสูงสุด / ความหนาแน่นเชิงพื้นที่

$$\text{หรือ } \text{Specific puncture load} = \frac{\text{Load}}{\text{Areal density}}\left(\text{N} \bullet \text{m}^2 \diagup \text{kg}\right)$$

2.12.3 ค่าพลังงานดูดซับจำเพาะ (Specific absorbed energy) คือ พลังงานดูดซับต่อความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของชิ้นทดสอบ โดยที่ค่าพลังงานดูดซับคำนวณได้จากพื้นที่ภายใต้เส้นกราฟระหว่างแรงกับระยะที่เปลี่ยนไป

ค่าพลังงานดูดซับจำเพาะ= พลังงานดูดซับ / ความหนาแน่นเชิงพื้นที่

$$\textbf{หรือ } \text{Specific absorbed energy} = \frac{E_{\text{absorbed}}}{\text{Areal density}}\left(\text{J} \bullet \text{m}^2 \diagup \text{kg}\right)$$

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

บทนี้จะกล่าวถึง วัสดุ อุปกรณ์และขั้นตอนในการทำวิจัย ซึ่งประกอบด้วยการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง การทดสอบความต้านทานต่อการเจาะทะลุ เพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดสอบของวัสดุผสมที่ทำมาจากเส้นใยทอ

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 เส้นใยแก้ว

เส้นใยแก้วชนิด E-glass แบบ Roving No.1200 tex มีลักษณะสีขาวขุ่นมันวาว มีเส้นผ่านศูนย์กลางของมัดเส้นใยประมาณ 1.86 มิลลิเมตร

3.1.2 เส้นใยไนล่อน ในงานวิจัยนี้มีด้วยกัน 2 ชนิด ดังนี้

3.1.2.1 เส้นใยไนล่อน แบบ monofilament No.15 ชนิดไนล่อน 6 มีลักษณะผิวมันใส มันวาว เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเดี่ยวประมาณ 0.16 มิลลิเมตร

3.1.2.2 เส้นใยไนล่อน แบบ twine No.210 D/2 ชนิดไนล่อน 6,6 มีลักษณะสีขาวขุ่น เส้นผ่านศูนย์กลางของมัดเส้นใยประมาณ 0.38 มิลลิเมตร

3.1.3 เส้นใยเคฟล่าร์ (Kevlar brand fiber) No. 30/3 มีลักษณะสีเหลืองขุ่น มีเส้นผ่านศูนย์กลางของมัดเส้นใยประมาณ 0.41 มิลลิเมตร เป็นเส้นใยสำหรับงานเย็บผ้าทั่วไปและถักทอเป็นถุงมือผ้ากันของมีคม ซึ่งไม่ใช่เส้นใยที่ใช้สำหรับทอเป็นเสื้อเกราะกันกระสุน

3.2 สารเคมี

3.2.1 อีพ๊อกซี่ เกรด 850

อีพ๊อกซี่ เกรด 850 คือ epoxy resin ชนิด Epichlorohydrin-bisphenol มีสมบัติความทนทานต่อสารเคมี สมบัติการยึดเกาะติดที่ดี และต้านทานต่อความร้อนได้ดีลักษณะเป็นของเหลวไหล และคุณสมบัติทางกายภาพแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติของอีพ๊อกซี่ เกรด 850

คุณสมบัติ	ค่า
Viscosity (25 °C)	11,000-15,000 cPs
Color (Gardner)	2 max
Epoxide Equivalent weight	184-194
Non-Volatile	100%
Diluent	Xylene

3.2.2 ฮาร์ทอีพ๊อกซี่ เกรด 982

ฮาร์ทอีพ๊อกซี่ เกรด 982 คือ พอลิเอไมด์เรซิน (polyamide resin) เป็นตัวเพิ่มความแข็งให้กับอีพ๊อกซี่ ทำให้สมบัติเชิงกลและความต้านทานต่อความร้อนเพิ่มขึ้น และมีความคงทนต่อการเปลี่ยนรูป ลักษณะเป็นของเหลวสีน้ำตาลใส และคุณสมบัติทางกายภาพแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงคุณสมบัติของฮาร์ทอีพ๊อกซี่ เกรด 982

คุณสมบัติ	ค่า
Viscosity (40 °C)	80-120 cPs
Amine Value	245-285
Color (Gardner)	13 max
Diluent	Xylene

การผสมของอีพ๊อกซี่ เกรด 850 กับฮาร์ทอีพ๊อกซี่ เกรด 982 ที่อัตราส่วน 100/100 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีคุณสมบัติเชิงกลดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สมบัติเชิงกลของอีพ๊อกซี่ เกรด 850 กับผสมฮาร์ทอีพ๊อกซี่ เกรด 982 ที่อัตราส่วน 100/100 โดยน้ำหนัก

สมบัติ	ค่า
Hardness (Rockwell M-scale)	78
Flexural strength (MPa)	61
Flexural Modulus (MPa)	970
Compressive strength (MPa)	55
Compressive Modulus (MPa)	1080
Impact strength ($kg \bullet cm/cm^2$)	1.6

* ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

3.3 เครื่องมือสำหรับงานวิจัย

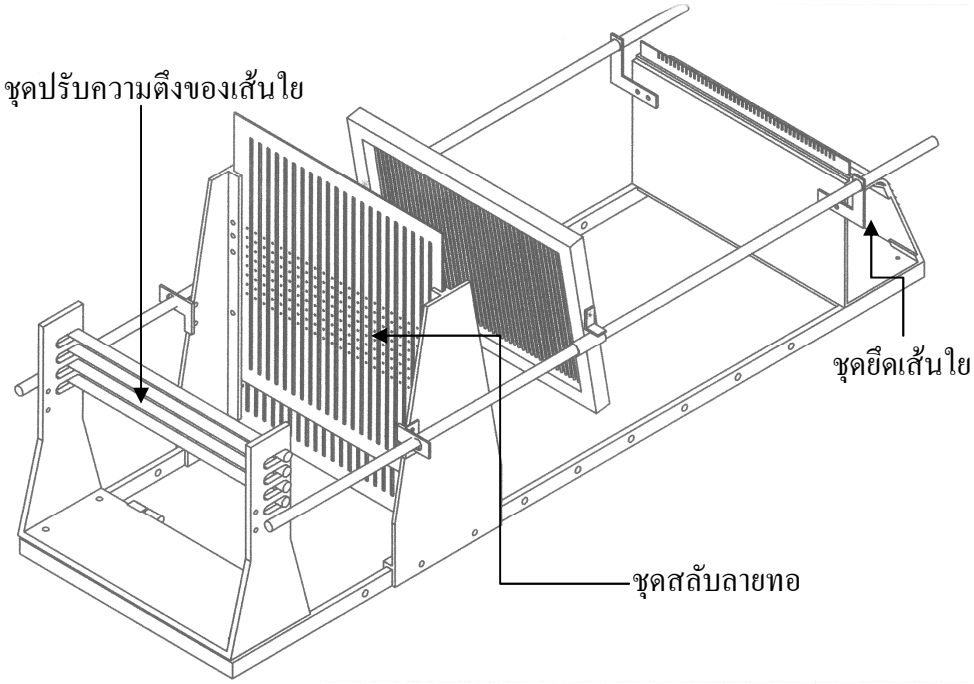
3.3.1 เครื่องจัดมัดเส้นใย

เครื่องจัดมัดเส้นใยสามารถจัดมัดเส้นใยจำนวน 10 เส้น จัดมัดรวมกันเป็น 1 เส้น เนื่องจากเส้นใยบางชนิดมีขนาดเล็กจึงจำเป็นต้องจัดเก็บเป็นมัดเส้นใย โดยนำมามัดรวมกันให้เป็นมัดเส้นใยที่ขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อเพิ่มพื้นที่ของเส้นใยในการทอขึ้นรูป และช่วยให้เส้นใยแต่ละชนิดมีขนาดเส้นใยใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 3.1

รูปที่ 3.1 เครื่องจัดมัดเส้นใย

3.3.2 เครื่องทอขึ้นรูปเส้นใย

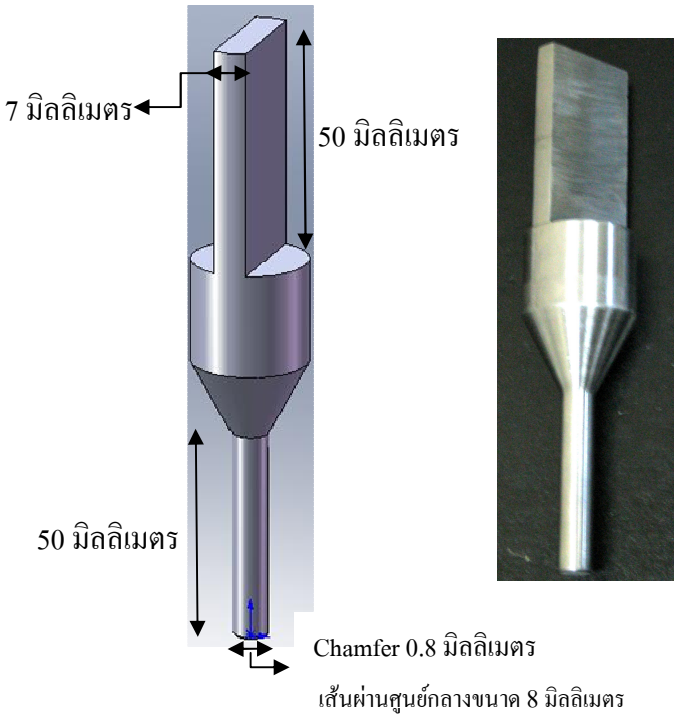
เครื่องทอจะมีส่วนประกอบหลัก ดังนี้ ชุดยึดเส้นใย ชุดสลับลายทอ และชุดปรับความตึงของเส้นใย เป็นเครื่องใช้สำหรับการทอขึ้นรูปเส้นใยทอ ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องทอขึ้นรูปเส้นใย

3.3.3 ชุดทดสอบความต้านการเจาะทะลุ

หัวเจาะชิ้นทดสอบ (Solid steel Rod) ใช้เหล็กเพลาตันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร ส่วนปลายของหัวเจาะถูก Chamfer ขนาด 0.8 มิลลิเมตร ยาว 50 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 8 มิลลิเมตร โดยส่วนบนสำหรับ ยึดกับเครื่องทดสอบ มีความหนา 7 มิลลิเมตร สูง 50 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 หัวเจาะชิ้นทดสอบ

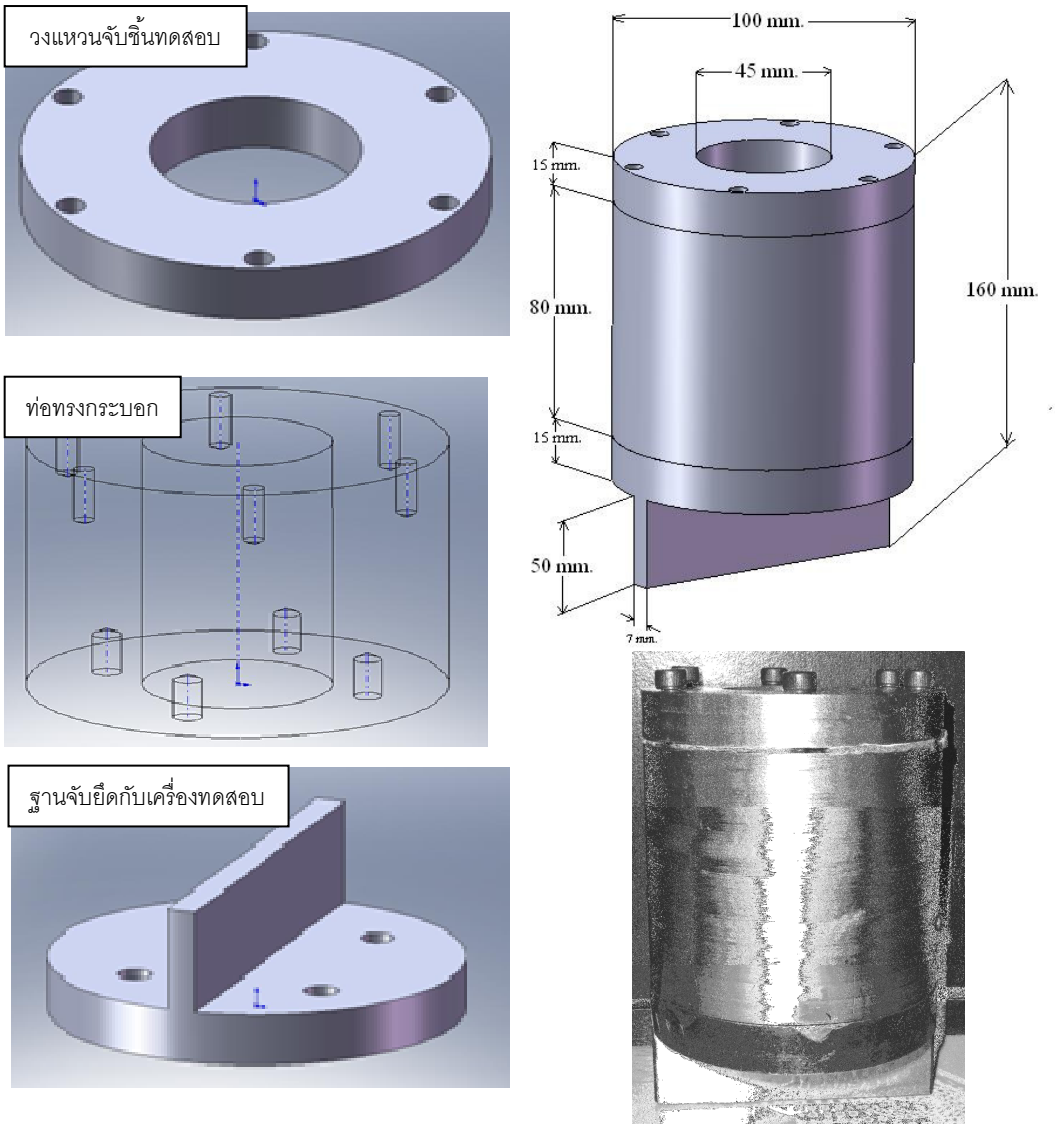
ฐานจับยึดชิ้นทดสอบ ประกอบไปด้วย 3 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 วงแหวนจับชิ้นทดสอบ มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 45 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 100 มิลลิเมตร โดยเจาะรูสำหรับใส่น๊อตขนาด 6 มิลลิเมตร จำนวน 6 รู ที่ระยะรัศมี 44 มิลลิเมตร และมีความหนา 15 มิลลิเมตร

ส่วนที่ 2 ท่อทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกเท่ากับวงแหวนจับชิ้นทดสอบ มีความสูง 80 มิลลิเมตร โดยด้านบนทำสลักเกลียวสำหรับใส่น๊อตขนาด 6 มิลลิเมตร จำนวน 6 รู และด้านล่างสลักเกลียวขนาด 8 มิลลิเมตร จำนวน 4 รู

<u>ส่วนที่ 3 ฐานยึดกับเครื่องทดสอบ</u> มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ความหนา 15 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นส่วนรองรับท่อทรงกระบอก และเจาะรูใส่น๊อตขนาด 8 มิลลิเมตร จำนวน 4 รู โดยมีส่วนยึดกับเครื่องทดสอบ มีความหนา 7 มิลลิเมตร สูง 50 มิลลิเมตร

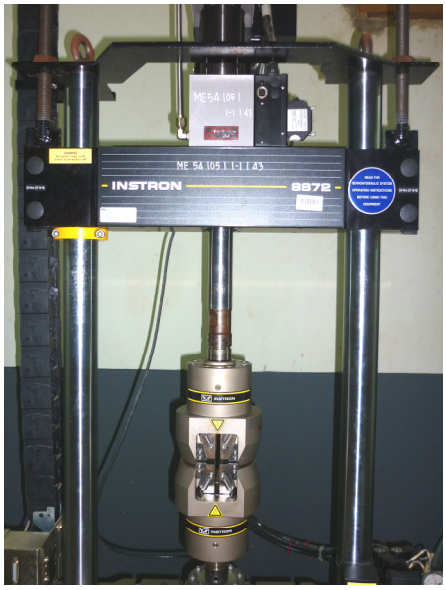
โดยส่วนบนใช้น๊อตขนาด 6 มิลลิเมตร จับยึดระหว่างวงแหวนจับชิ้นทดสอบกับท่อทรงกระบอก และส่วนล่างใช้น๊อตขนาด 8 มิลลิเมตร จับยึดระหว่างท่อทรงกระบอกกับฐานยึดกับเครื่องทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ฐานจับยึดชิ้นทดสอบ

3.3.4 เครื่องทดสอบความแข็งแรงวัสดุ

เครื่องทดสอบความแข็งแรงวัสดุ (Universal testing machine) ผลิตโดย Instron รุ่น 8872 Load cell 25 kN โดยใช้ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของเส้นใย เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด และทดสอบความต้านทานต่อการเจาะทะลุ (Puncture resistance test) ของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใย เพื่อนำข้อมูลไปหาค่าคุณสมบัติของวัสดุ



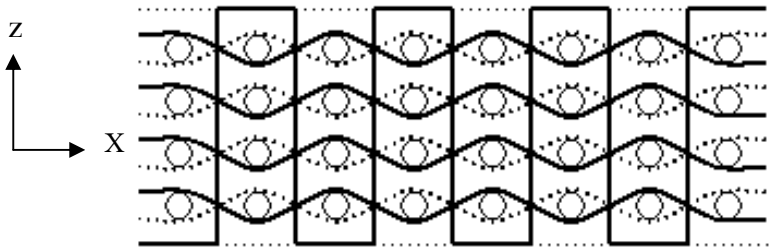
รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบความแข็งแรงวัสดุ (Universal testing machine)

3.4 ขั้นตอนและวิธีการวิจัย

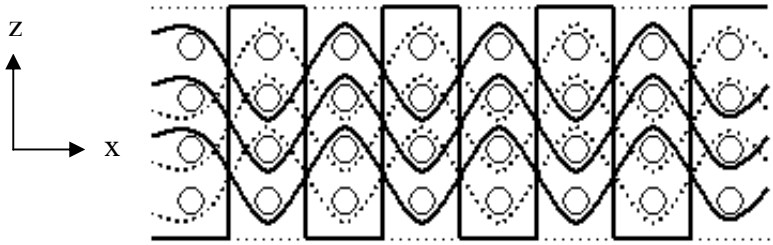
การวิจัยเรื่องของชนิดเส้นใยและโครงสร้างการทอต่อการลดพลังงานพุ่งชน ประกอบด้วย 4 กิจกรรมหลัก ดังแผนภาพรวมในงานวิจัยที่แสดงในรูปที่ 3.8

กิจกรรมที่ 1 : ออกแบบและสร้างชุดทดสอบการกระแทกแบบ Puncture resistance test และทดสอบการทำงานของชุดทดสอบที่สร้างขึ้น เปรียบเทียบสมบัติการกระแทกของวัสดุทดสอบ

กิจกรรมที่ 2 : เปรียบเทียบผลทดสอบโครงสร้างการทอเป็นแบบ 3-D orthogonal และ 3-D angle-interlock ดังในรูปที่ 3.6 และ 3.7 และเลือกใช้โครงสร้างการทอที่ดีที่สุดข้างต้นสำหรับทอเส้นใยชนิดต่างๆ



รูปที่ 3.6 รูปแบบการทอแบบ 3D orthogonal

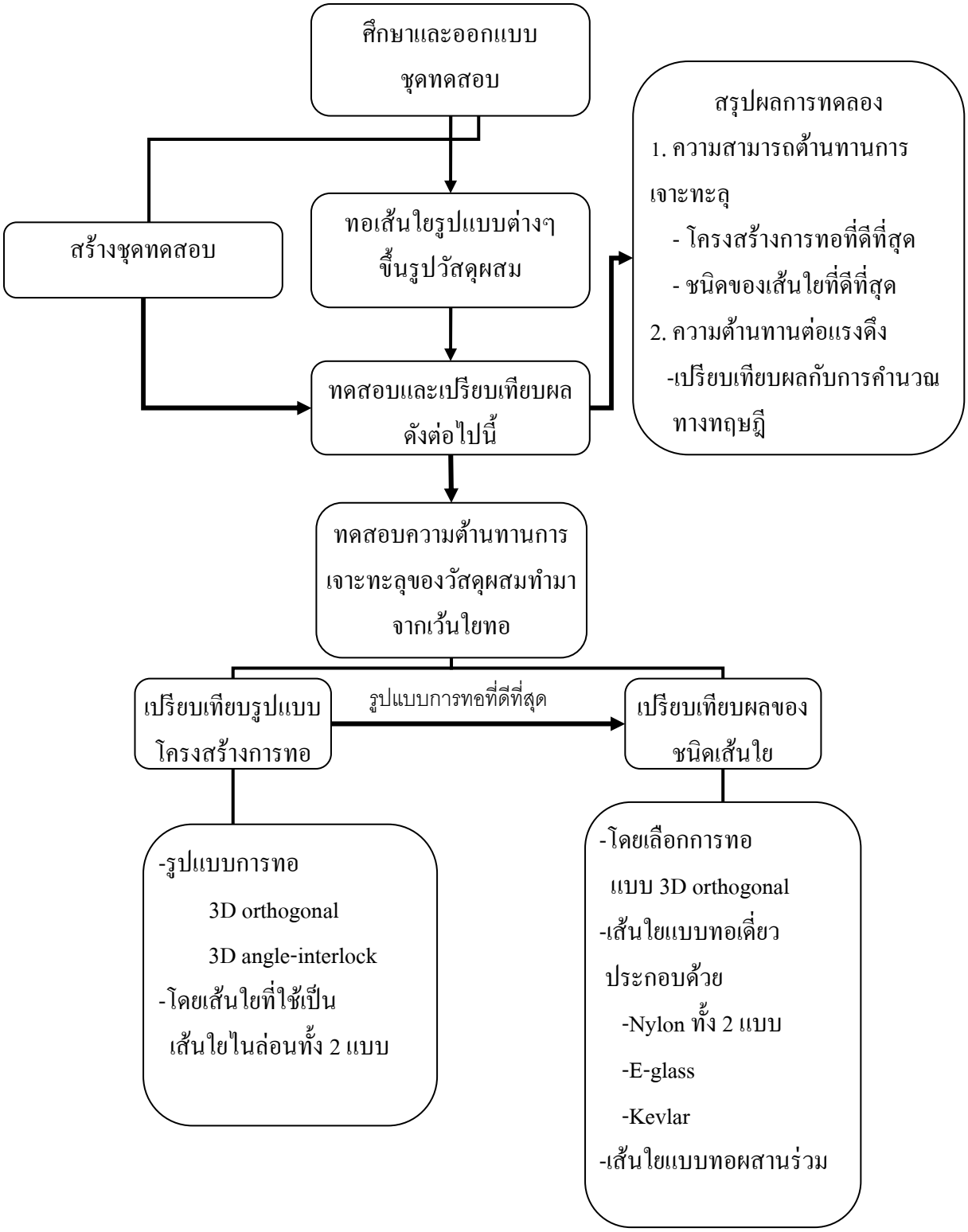


รูปที่ 3.7 รูปแบบการทอแบบ 3D angle-interlock

กิจกรรมที่ 3 : ขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุผสมจากเส้นใยทอชนิดต่างๆ และทดสอบการกระแทกแบบ Puncture resistance test (ASTM D4833) และเปรียบเทียบผล

กิจกรรมที่ 4 : การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง โดยทำการทดสอบ 2 ส่วน คือ

1) ทดสอบเส้นใยเดี่ยว เพื่อหาสมบัติเชิงกลของเส้นใยไปใช้ในการคำนวณทางทฤษฎีลามิเนตชั่น
2) ทดสอบวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยทอ เพื่อนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จะการคำนวณทางทฤษฎี

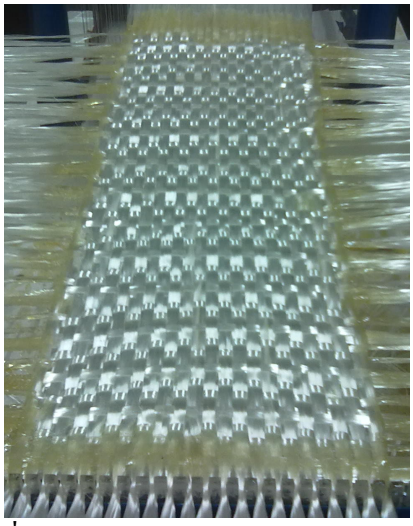


รูปที่ 3.8 แผนภาพกิจกรรมหลักของงานวิจัย

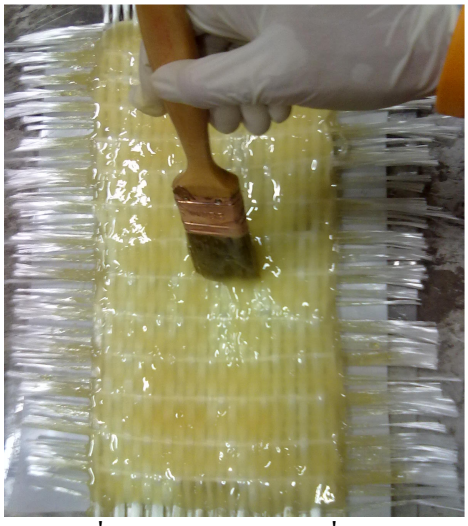
3.5 การเตรียมชิ้นงาน

ต้องทำการเตรียมสารเคมีที่ใช้เป็นเรซินคืออีพอกซี่ โดยสัดส่วนของ อีพ๊อกซี่ เกรด 850 กับผสมฮาร์ทอีพ๊อกซี่ เกรด 982 คือ 100:100 โดยน้ำหนัก ทำการผสมจนเข้ากัน แล้วนำไปทาขึ้นรูปบนเส้นใยทอตามขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนแรก : วางเส้นใยทอให้อยู่ในแนวตามยาวดังรูปที่ 3.9 โดยการทาอีพ๊อกซี่จะต้องทาไปตามแนวยาวของผืนเส้นใยทอและทาไปในทิศทางเดียวตลอดทั้งผืน ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.9 การวางเส้นใยทอในแนวตามยาว



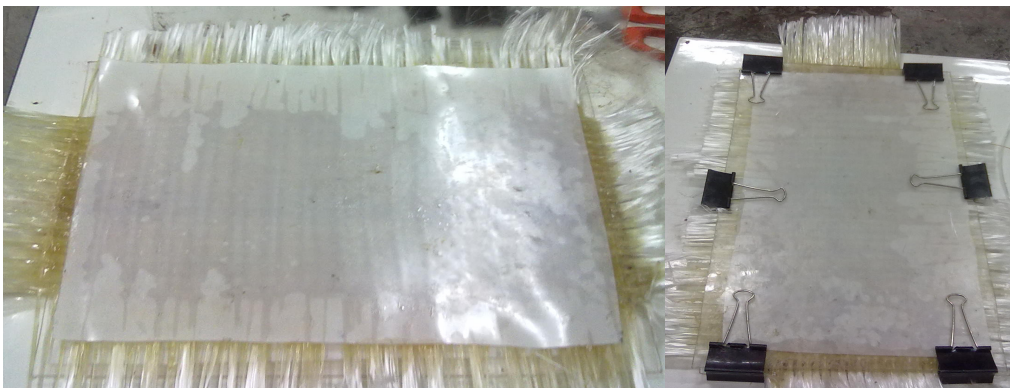
รูปที่ 3.10 การทาอีพ๊อกซี่ด้วยแปลง

ขั้นตอนที่สอง : การรีดไล่ฟองด้วยลูกกลิ้งเหล็กจะต้องกลิ้งไปในทิศทางเดียวกันกับเส้นใยเพื่อป้องกันการเคลื่อนของเส้นใยในโครงสร้างการทอ ดังรูป 3.12

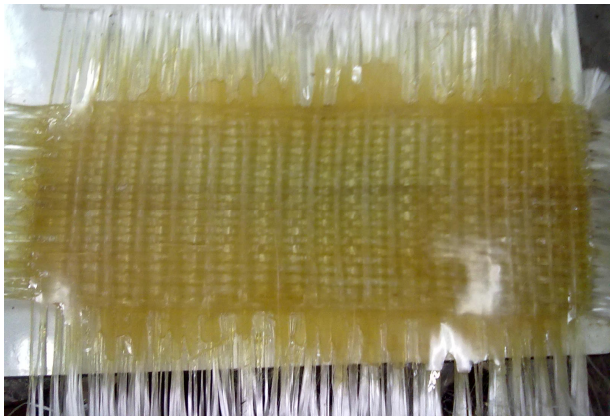
รูปที่ 3.11 ลูกกลิ้งสำหรับไล่ฟองอากาศ

รูปที่ 3.12 การรีดไล่ฟองด้วยลูกกลิ้งเหล็ก

ขั้นตอนที่สาม : นำแผ่นฟิล์มไมล่า (Mila) มาประกบบนชิ้นงานที่ทาอีพ๊อกซี่เสร็จแล้ว ดังรูปที่ 3.13 จากนั้นรีดไล่ฟองอากาศอีกครั้ง การนำแผ่นฟิล์มไมล่ามาประกอบเพื่อให้ชิ้นงานมีผิวที่เรียบสม่ำเสมอกันตลอดทั้งผืนเส้นใยทอ แล้วปล่อยให้อีพ็อกซี่แข็งตัว เป็นระยะ 24 ชม. เมื่อชิ้นงานที่อีพ็อกซี่แข็งตัวแล้วให้แกะแผ่นฟิล์มไมล่าออก (รูปที่ 3.14) และนำไปตัดเป็นชิ้นทดสอบขนาดต่างๆ ตาม แต่ละวิธีการทดสอบ



รูปที่ 3.13 แผ่นฟิล์มไมล่า (Mila) ที่มาประกบบนชิ้นงานที่ทาอีพ๊อกซี่เสร็จแล้ว



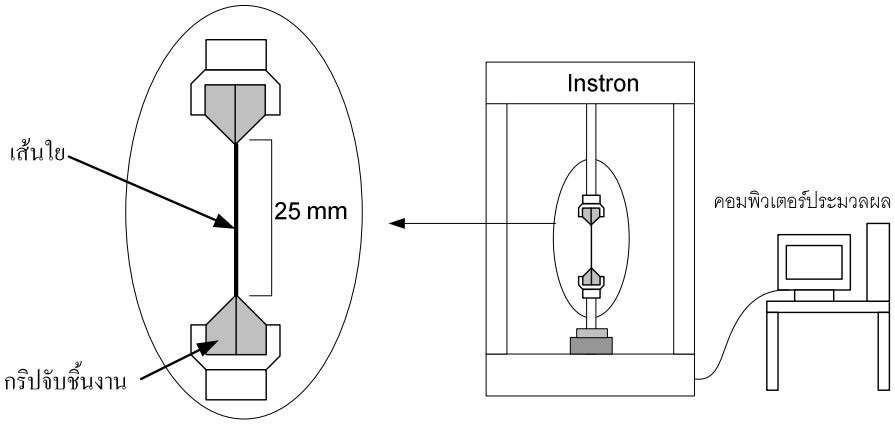
รูปที่ 3.14 ชิ้นงานที่อีพ็อกซี่แข็งตัว (ขึ้นเป็นวัสดุผสมเสร็จแล้ว)

3.6 การทดสอบสมบัติของเส้นใยและวัสดุผสมทำมาจากเส้นใย

3.6.1 การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของเส้ยใยเดี่ยว

การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของเส้นใยเดี่ยวแต่ละชนิด ตามมาตรฐาน ASTM D3822-01 โดยทดสอบการดึงจนขาด ที่ความเร็วในการดึง 30 มิลลิเมตรต่อนาที ทำการจับเส้นใยกับกริปจับชิ้นงาน ให้เส้นใยมีความยาวที่ 25 มิลลิเมตร และเส้นใยจะถูกดึงโดย

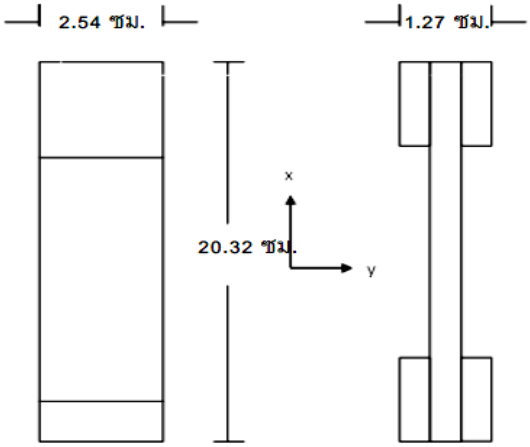
เครื่องทดสอบความแข็งแรงวัสดุ (UTM, Instron Model 8872) แสดงในรูปที่ 3.15 ซึ่งค่าแรงดึงและการยืดตัวจะถูกบันทึกเมื่อมีแรงมากระทำกับเส้นใย



รูปที่ 3.15 การทดสอบความต้านทานต้านแรงดึง

3.5.2 การทดสอบความต้านทานแรงดึงของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใย

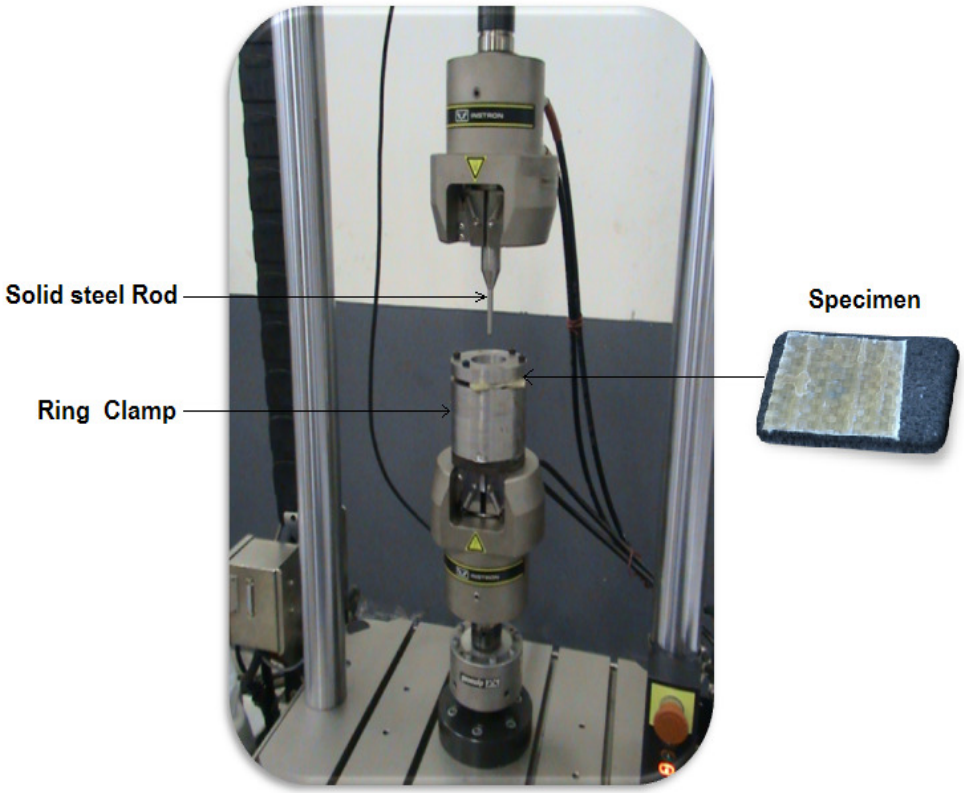
การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงวัสดุผสม ตามมาตรฐาน ASTM D3039 โดยทดสอบการดึงจนขาด ที่ความเร็วในการดึง 2 มิลลิเมตรต่อนาที นำเส้นใยที่ทอแบบ 3 มิติ มาวางเรียงทิศทาง $[0/90]_s$ ขนาดของความกว้างมีค่า 2.54 เซนติเมตร ความยาวมีค่า 20.32-20.48 เซนติเมตร ความหนาตามแต่การผลิตโดยต้องพิจารณาถึงหัวจับโดยที่หัวจับต้องมีความหนาไม่เกิน 1.10 เซนติเมตร และมีขนาดของชิ้นทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ขนาดชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3039

3.6.2 การทดสอบความต้านทานต่อการเจาะทะลุ (Puncture resistance test)

ชุดทดสอบ Puncture resistance test ประกอบ ด้วย หัวเจาะชิ้นทดสอบ (Solid steel Rod) ยาว 50 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 8 มิลลิเมตร ส่วนปลายของหัวเจาะถูก Chamfer ขนาด 0.8 มิลลิเมตร และฐานจับยึดชิ้นทดสอบ (Ring Clamp) ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 มิลลิเมตร ดังชุดทดสอบแสดงในรูปที่ 3.9 และรูปที่ 3.10 วิธีการทดสอบจะนำเส้นใยที่ขึ้นรูปเป็นวัสดุผสมเสร็จแล้ว มาตัดให้ได้ขนาด 60 x 60 มิลลิเมตร แล้วนำมาทดสอบกับชุดทดสอบ Puncture resistance test ที่ทำการติดตั้งบนเครื่องทดสอบความแข็งแรงวัสดุ (UTM, Instron Model 8872) ที่ความเร็วในการกระแทก 0.005 และ 0.083 เมตรต่อวินาที (300 และ 5,000 มิลลิเมตรต่อนาที) แสดงในรูปที่ 3.17 จากนั้นนำข้อมูลมาทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบแรงสูงสุด



รูปที่ 3.17 ชุดทดสอบ Puncture resistance test ที่ติดตั้งบนเครื่องทดสอบความแข็งแรงวัสดุ (UTM, Instron Model 8872)

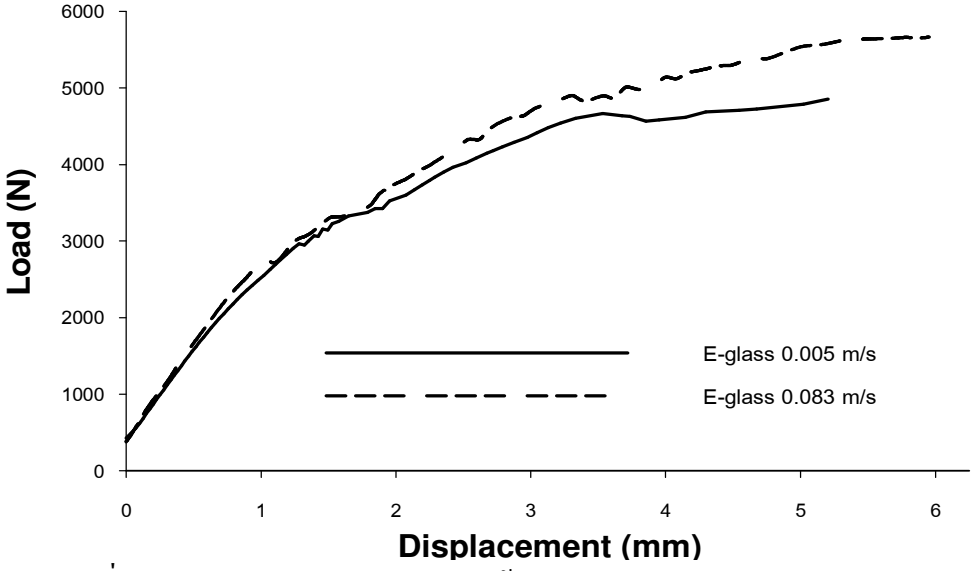
บทที่ 4

ผลการทดลองและเปรียบเทียบผล

4.1 การทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุ

4.1.1 เปรียบเทียบความเร็วการเจาะทะลุ

ผลการทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงวัสดุ (Universal testing machine) ในห้องปฏิบัติการ โดยทำการทดสอบวัสดุผสมทำมาจากเส้นใย E-glass ในรูปแบบการทอแบบ 3-D orthogonal แสดงดังรูปที่ 4.1 ที่ความเร็ว 0.083 m/s เส้นใยสามารถรับแรงได้สูงสุดเท่ากับ 5.7 kN เมื่อเปรียบเทียบกับความเร็ว 0.005 m/s เส้นใยสามารถรับแรงได้สูงสุดเท่ากับ 4.8 kN ดังนั้นความเร็วมีผลต่อความสามารถต้านทานการเจาะทะลุของเส้นใย เมื่อการใช้ความเร็วต่ำในการทดสอบ แรงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นทดสอบเกิดความเสียหายมีค่าน้อยกว่าที่การใช้ความเร็วสูงในการทดสอบ เนื่องจากที่ความเร็วในการทดสอบต่ำความเสียหายหลักของชิ้นทดสอบขึ้นอยู่กับอีพ๊อกซี่เมตริกซ์ซึ่งมีความแข็งแรงน้อยถูกทำลายและเส้นใยที่อยู่ภายในเกิดการยืดตัว ทำให้ชิ้นทดสอบมีเวลาในการเปลี่ยนแปลงขนาดอย่างช้าๆ ซึ่งแตกต่างกับที่ความเร็วสูงในการทดสอบ ชิ้นทดสอบมีเวลาในการเปลี่ยนแปลงขนาดหรือการยืดตัวน้อย จึงทำให้การไถลของเส้นใยเกิดขึ้นได้ยาก ความเสียหายหลักจึงเกิดจากเส้นใยที่อยู่ภายในที่มีความแข็งแรงถูกทำลาย



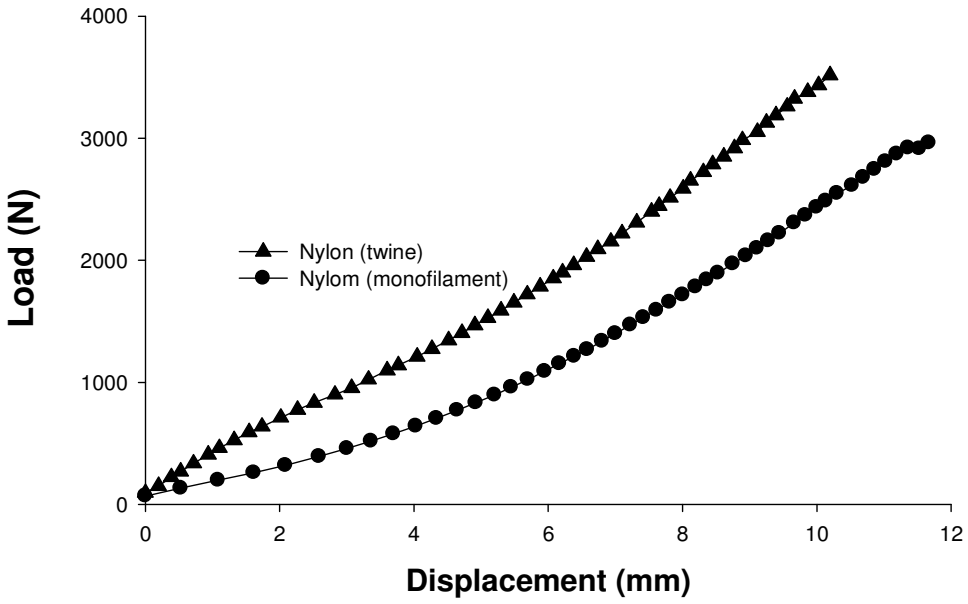
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใย E-glass ที่ความเร็ว 0.005 และ 0.083 เมตรต่อวินาที

4.1.2 เปรียบเทียบโครงสร้างการทอแบบ 3-D orthogonal weave และแบบ 3-D angle-interlock

การทดสอบความสามารถต้านทานการเจาะทะลุ (Puncture resistance test) ตาม ASTM 4833 โดยทำการทดสอบที่ความเร็วในการเจาะทะลุชิ้นทดสอบ 0.083 เมตรต่อวินาที ซึ่งชนิดของเส้นใยและรูปแบบโครงสร้างการทอดังแสดงในตารางที่ 4.1

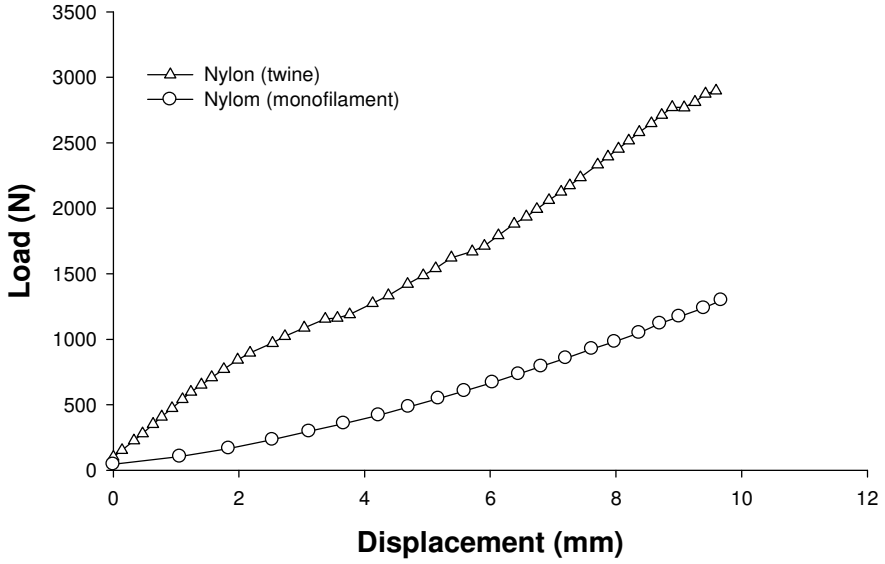
ตารางที่ 4.1 แสดงชนิดของเส้นใยและโครงสร้างการทอที่ใช้ในการทดสอบความสามารถต้านทานการเจาะทะลุ

ชนิดของเส้นใย	โครงสร้างการทอ
เส้นใยไนล่อน แบบ twine	3-D orthogonal และ 3-D angle-interlock
เส้นใยไนล่อนแบบ monofilament	3-D orthogonal และ 3-D angle-interlock



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงการทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยไนล่อนทั้ง 2 แบบ ภายใต้การรับแรงกระแทกสูงสุดในโครงสร้างการทอแบบ 3-D orthogonal

จากข้อมูลในรูปที่ 4.2 การทดสอบความสามารถต้านทานการเจาะทะลุของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยไนล่อนในรูปแบบการทอแบบ 3-D orthogonal พบว่า เส้นใยไนล่อน แบบ twine รับแรงได้สูงสุดเท่ากับ 3.5 kN และเส้นใยไนล่อน แบบ monofilament รับแรงได้สูงสุดเท่ากับ 3.0 kN แต่แบบ monofilament สามารถยืดตัวได้ดีกว่าเล็กน้อย

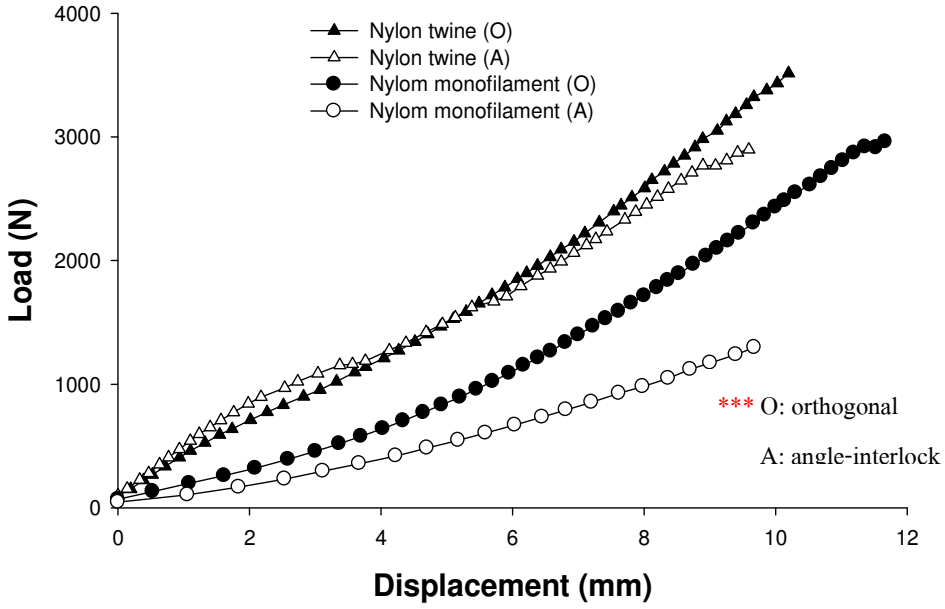


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยไนล่อนทั้ง 2 แบบ ภายใต้การรับแรงกระแทกสูงสุดในโครงสร้างการทอแบบ 3-D angle-interlock

จากข้อมูลในรูปที่ 4.3 การทดสอบความสามารถต้านทานการเจาะทะลุของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยในรูปแบบการทอแบบ 3-D angle-interlock โดยเส้นใยไนล่อน แบบ twine รับแรงได้สูงสุดเท่ากับ 2.9 kN และเส้นใยไนล่อน แบบ monofilament รับแรงได้สูงสุดเท่ากับ 1.3 kN

ผลการทดสอบความสามารถการต้านทานการเจาะทะลุของรูปแบบการทอทั้ง 2 แบบ ในรูปที่ 4.2 และ 4.3 พบว่า ความสามารถในการรับแรงสูงสุดของเส้นใยไนล่อน แบบ twine รับแรงได้มากกว่าแบบ monofilament ในรูปแบบการทอ 3-D orthogonal อยู่ประมาณ 14.29 % และในรูปแบบการทอ 3-D angle-interlock อยู่ประมาณ 84.21% เนื่องจากเส้นใยไนล่อน แบบ monofilament มีลักษณะผิวของเส้นใยที่มันและเส้นใยมีความยืดหยุ่นสูงกว่าเส้นใยไนล่อน แบบ twine ทำให้การจับยึดของมัดเส้นใยได้ไม่ดีในโครงสร้างการทอ สำหรับความสามารถในการ

ยืดตัวของรูปแบบการทอ 3-D orthogonal และในรูปแบบการทอ 3-D angle-interlock มีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงการทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุของวัสดผสมทำมาจากเส้นใยไนล่อนทั้ง 2 แบบ ภายใต้การรับแรงกระแทกสูงสุด ในโครงสร้างการทอแบบ 3-D orthogonal และแบบ 3-D angle-interlock

จากรูปที่ 4.4 เป็นการเปรียบเทียบรูปแบบทอแบบ 3-D orthogonal และแบบ 3-D angle-interlock จากข้อมูลแสดงให้เห็นว่าระหว่างรูปการทอแบบ 3-D orthogonal มีความสามารถในการรับแรงได้มากกว่าแบบ 3-D angle-interlock โดยผลการทดสอบของเส้นใยไนล่อน แบบ twine ในรูปแบบการทอแบบ 3-D orthogonal สามารถรับแรงมากกว่าแบบ 3-D angle-interlock ประมาณ 17.14 % ในทำนองเดียวกันเส้นใยไนล่อน แบบ monofilament แบบ 3-D orthogonal สามารถรับแรงมากกว่าแบบ 3-D angle-interlock ประมาณ 56.67 % ดังนั้น จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า รูปแบบการทอแบบ 3-D orthogonal สามารถต้านทานแรงการเจาะทะลุได้มากกว่าแบบ 3-D angle-interlock จากผลการทดสอบสามารถคำนวณหาค่าพลังงานดูดซับของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยได้จากการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟระหว่างแรงกับระยะที่เปลี่ยนไปของเส้นใยแต่ละชนิด ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าพลังงานดูดซับของชิ้นทดสอบที่เกิดในการทดสอบความสามารถต้านทานการเจาะทะลุภายใต้การรับแรงสูงสุด

Sample	Energy (J)
Nylon twine (O)	17.81
Nylon twine (A)	14.61
Nylon monofilament (O)	14.48
Nylon monofilament (A)	5.39

O: orthogonal weave, A: angle-interlock weave

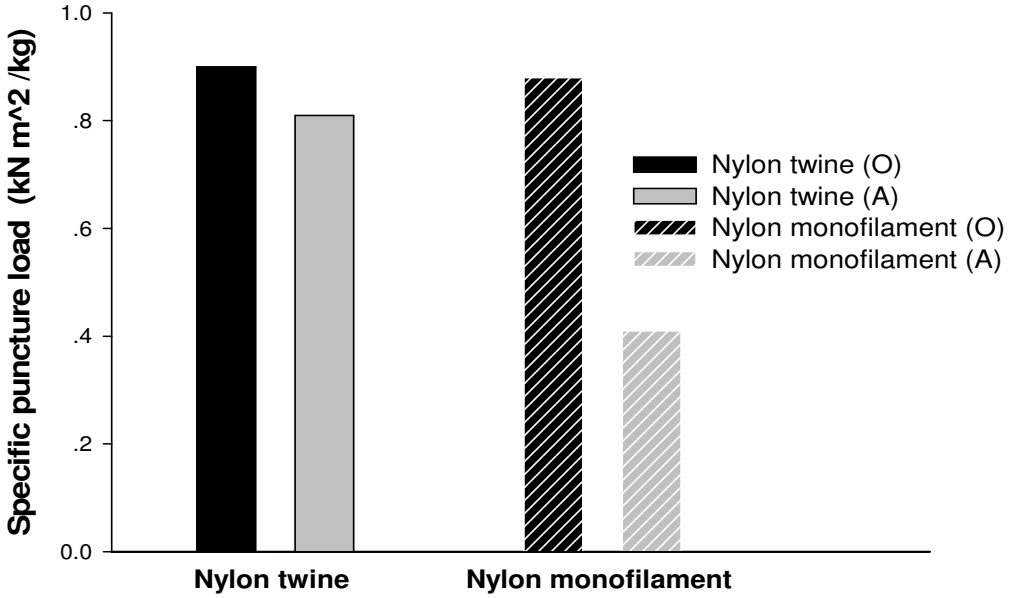
จากตารางที่ 4.2 วัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับพลังงานหรือพลังงานที่เกิดขึ้นมีการกระจายตัวได้ดีในเนื้อของวัสดุหลังการรับแรงเจาะกระแทกสูงสุด จะพบว่าในรูปแบบการทอแบบ 3-D orthogonal ของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยไนล่อน แบบ twine มีการดูดซับพลังงานมากกว่าแบบ 3-D angle-interlock ประมาณ 17.91 % ส่วนวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยไนล่อน แบบ monofilament รูปแบบการทอแบบ 3-D orthogonal มีการดูดซับพลังงานมากกว่าแบบ 3-D angle-interlock ประมาณ 62.78 %

- เปรียบเทียบค่าความต้านการเจาะทะลุจำเพาะ (Specific puncture load) ระหว่างโครงสร้างการทอแบบ 3-D orthogonal weave และแบบ 3-D angle-interlock

ความสามารถในการรับแรงสูงสุด ค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่ และค่าความสามารถต้านทานการเจาะทะลุจำเพาะ ดังค่าในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความต้านการเจาะทะลุจำเพาะ ค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่ (Areal density) และสมบัติของชิ้นทดสอบ (mono: monofilament, O: orthogonal weave , A: angle-interlock weave)

Sample	Thickness (mm)		Density (kg/m^3)	Areal density (kg/m^2)		Max load (kN)	Specific puncture load ($kN\ m^2/kg$)
	Mean	SD		Mean	SD		
Nylon twine (O)	4.41	0.88	862.3	3.9	0.16	3.5	0.90
Nylon twine (A)	4.96	0.94	720.8	3.6	0.18	2.9	0.81
Nylon mono (O)	3.28	1.02	1025.3	3.4	0.42	3.0	0.88
Nylon mono (A)	3.34	0.99	968.8	3.2	0.08	1.3	0.41



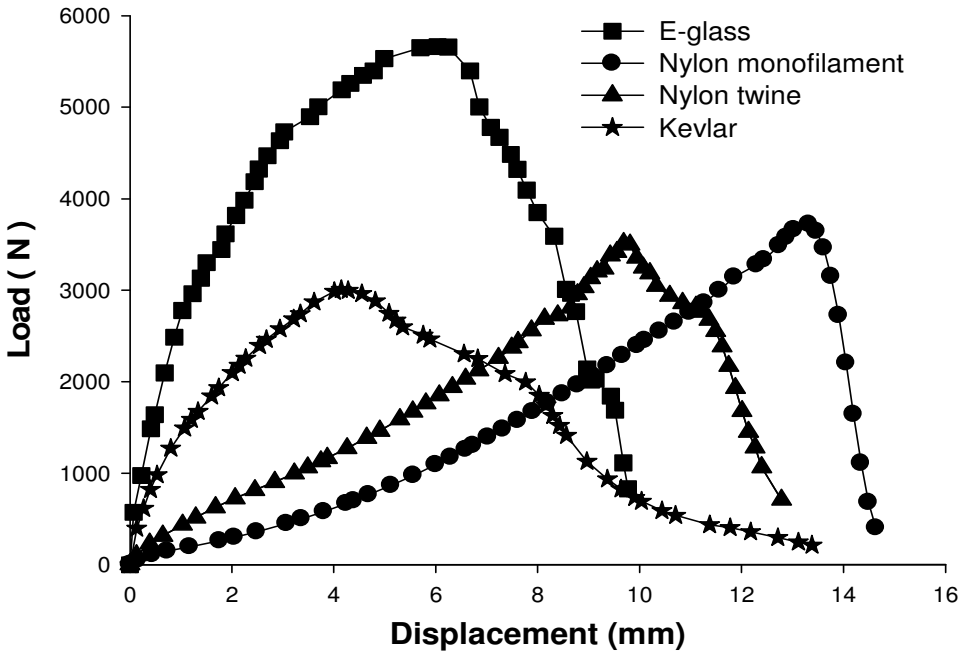
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่าความต้านการเจาะทะลุจำเพาะของวัสดุผสมทำจากเส้นใยไนล่อนทั้ง 2 แบบ รูปแบบการทอแบบ 3-D orthogonal กับ 3-D angle-interlock

นำค่าความสามารถต้านทานการเจาะทะลุจำเพาะมาเขียนกราฟดังรูปที่ 4.5 พบว่า เส้นใยไนล่อนทั้ง 2 แบบ ในรูปแบบโครงสร้างการทอแบบ 3-D Orthogonal มีความสามารถต้านทานการเจาะทะลุได้ดีกว่าโครงสร้างการทอแบบ 3-D Angle-interlock โดยสังเกตจากค่าความสามารถต้านทานการเจาะทะลุจำเพาะของเส้นใยไนล่อนแบบ twine ในรูปแบบการทอแบบ 3-D Orthogonal มากกว่าการทอแบบ 3-D Angle-interlock ประมาณ 10.00 % ส่วนเส้นใยไนล่อนแบบ monofilament ค่าความสามารถต้านทานการเจาะทะลุจำเพาะของรูปแบบการทอแบบ 3-D Orthogonal มากกว่าการทอแบบ 3-D Angle-interlock ประมาณ 53.41 %

4.1.3 การทดสอบความสามารถต้านทานการเจาะทะลุของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยทอเดี่ยวชนิดต่างๆ

การเปรียบเทียบความสามารถต้านทานการเจาะทะลุของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยในรูปแบบการทอแบบ 3-D Orthogonal และการทอแบบ 3-D Angle-interlock ในข้อที่ 4.1.2 พบว่า โครงสร้างการทอแบบ 3-D Orthogonal มีความสามารถต้านทานการเจาะทะลุได้ดีกว่าการทอแบบ 3-D Angle-interlock จึงเลือกที่จะศึกษาคุณสมบัติความสามารถต้านทานการเจาะทะลุของเส้นใยชนิดต่างๆใน รูปแบบการทอแบบ 3-D orthogonal ซึ่งเส้นใย E-glass รับแรงได้สูงสุด

เท่ากับ 5.7 kN เส้นใยไนล่อน แบบ twine รับแรงได้สูงสุดเท่ากับ 3.5 kN เส้นใยเคฟล่าร์ รับแรงได้สูงสุดเท่ากับ 3.1 kN และเส้นใยไนล่อน แบบ monofilament รับแรงได้สูงสุดเท่ากับ 3.0 kN พบว่าเส้นใย E-glass มีความสามารถต้านทานการเจาะทะลุภายใต้การรับแรงสูงสุดได้ดีที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.6 เช่นเดียวกับวิจัยของ W. A. de Morais and J. R. M. d'Almeida ที่ศึกษาการกระแทกของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใย พบว่า เส้นใยแก้วมีความสามารถรับแรงกระแทกได้มากกว่าเส้นใยอะรามิค ประมาณ 70 % แสดงให้เห็นว่าเส้นใยแก้วข้อเด่นในด้านการรับแรงกระแทกได้กว่าเส้นใยอื่นๆ



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสามารถการต้านทานการเจาะทะลุของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยชนิดต่างๆ ในรูปแบบการทอแบบ 3-D orthogonal จนชิ้นทดสอบเกิดการทะลุ

ตารางที่ 4.4 ค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่และค่าการรับแรงสูงสุดของชิ้นทดสอบในรูปแบบการทอแบบ 3-D orthogonal

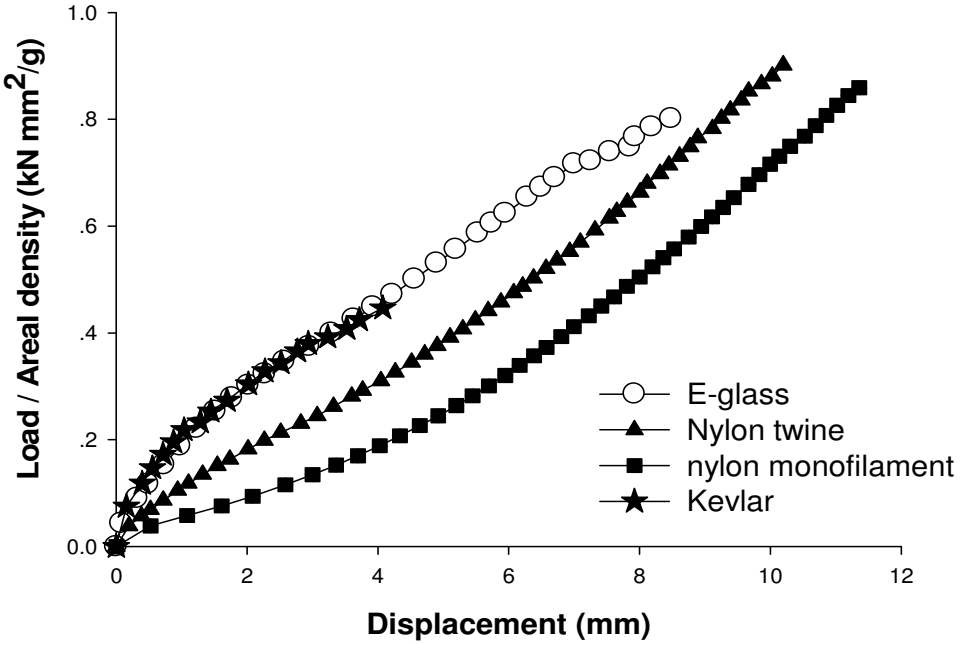
Sample	**Areal density (kg/m^2)**	**Max load (kN)**
E-glass	7.5	5.7
Nylon twine	3.9	3.5
Nylon monofilament	3.4	3.0
Kevlar	6.9	3.1

จากข้อมูลค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่ในตารางที่ 4.4 พบ เส้นใยเคฟล่าร์มีค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่สูงกว่าเส้นใยไนล่อน แบบ twine ทั้งที่เส้นใยทั้งสองชนิดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมัดเส้นใยใกล้เคียงกัน แต่การดูดซึมอีพ๊อกซี่ของเส้นใยเคฟล่าร์ได้ดีกว่าเส้นใยไนล่อน แบบ twine ซึ่งสังเกตได้จากอัตราส่วนน้ำหนักของอีพ็อกซี่ต่อเส้นใยทอ ที่ขนาดชิ้นทดสอบ 60x60 มิลลิเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.5 จึงทำให้มีค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่สูงกว่าเส้นใยไนล่อน แต่สำหรับเส้นใย E-glass เนื่องจากเส้นใยมีน้ำหนักมากกว่าเส้นใยชนิดอื่น จึงทำให้มีค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่สูงสุด

ตารางที่ 4.5 ปริมาณน้ำหนักของเส้นใยทอและอีพ็อกซี่ของชิ้นทดสอบขนาด 60x60 มิลลิเมตร

Sample	Woven fiber (g)	Epoxy (g)	Composite (g)	Epoxy/Fiber
E-glass	20.05	6.95	27.00	0.35
Nylon twine	9.14	4.90	14.04	0.54
Nylon monofilament	7.67	4.57	12.24	0.60
Kevlar	14.54	10.30	24.30	0.71

จากผลการทดสอบและข้อมูลในตารางที่ 4.4 นำมาเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.7 พบว่า ระยะยืดของชิ้นทดสอบที่ 4 มิลลิเมตร ค่าแรง (Load) ต่อความหนาแน่นเชิงพื้นที่ เรียงตามลำดับได้ดังนี้ 1) เส้นใย E-glass 2) เส้นใยเคฟล่าร์ 3) เส้นใยไนล่อน twine และ 4) เส้นใยไนล่อน monofilament มีเท่ากับ 0.47, 0.45, 0.35 และ 0.20 kN m^2/kg ตามลำดับ ซึ่งพบว่าค่าของเส้นใย E-glass และเส้นใย Kevlar มีค่าใกล้เคียงกันและมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ เส้นใยไนล่อน twine และเส้นใยไนล่อน monofilament มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งข้อมูลดังกล่าวบ่งบอกถึงความสามารถต้านทานต่อการเจาะทะลุโดยที่เส้นใย E-glass และเส้นใยเคฟล่าร์ มีความสามารถต้านทานต่อการเจาะทะลุได้ดีใกล้เคียงกันเมื่อเทียบกับเส้นใยไนล่อน twine และเส้นใยไนล่อน monofilament



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงต่อความหนาแน่นเชิงพื้นที่ที่ระยะยืดต่างๆ

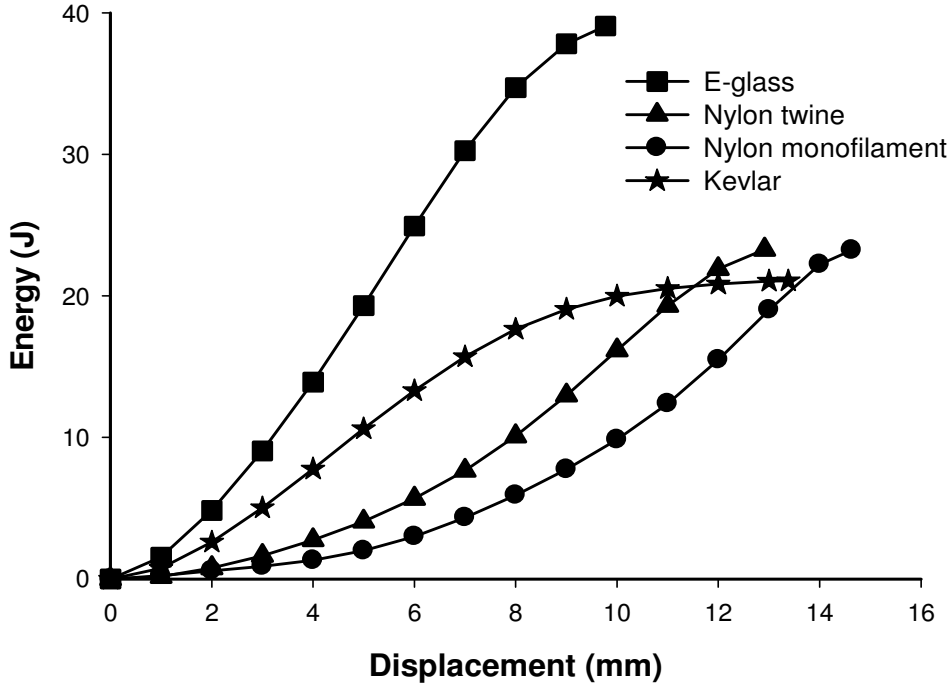
ข้อมูลจากการทดสอบความสามารถต้านทานการเจาะทะลุของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยชนิดต่างๆ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.6 พบว่า วัสดุผสมที่ทำมาจากเส้นใยไนล่อน twine มีค่าความต้านทานการเจาะทะลุจำเพาะมากกว่าเส้นใย E-glass ประมาณ 15.56 % และมีค่ามากกว่าเส้นใยเคฟล่าร์ประมาณ 50.00 %

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความต้านทานการเจาะทะลุจำเพาะของเส้นใยทอเดี่ยว

Sample	Specific puncture load (kN m^2/kg)
E-glass	0.76
Nylon twine	0.90
Nylon monofilament	0.88
Kevlar	0.45

จากข้อมูลในรูปที่ 4.6 สามารถคำนวณหาค่าพลังงานดูดซับ โดยวิธีการคำนวณพื้นที่ภายใต้เส้นกราฟระหว่างแรงที่ระยะต่างๆ ตามงานวิจัยของ Changan Ji และคณะในปี 2007 และนำมาเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.8 พบว่า วัสดุผสมทำมาจากเส้นใย E-glass มีค่าพลังงานดูดซับสูงสุด เท่ากับ 39.1 J ส่วนเส้นใยไนล่อนทั้ง 2 แบบ และเส้นใยเคฟล่าร์ มีค่า

พลังงานดูดซับสูงสุดใกล้เคียงกันอยู่ในช่วงประมาณ 21-23 J ดังนั้นสรุปได้ว่า เส้นใย E-glass มีค่าพลังงานซับมากกว่าเส้นใยชนิดอื่น อยู่ประมาณ 42.5 %



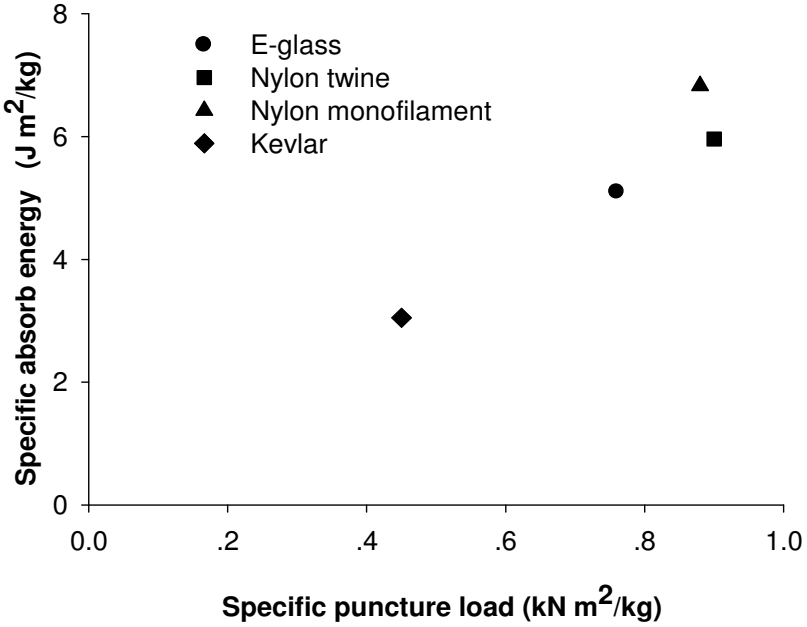
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงพลังงานดูดซับกับระยะยืดของวัสดุผสมที่ทำมาจากเส้นใยชนิดต่างๆ

ตารางที่ 4.7 ค่าพลังงานดูดซับและค่าพลังงานดูดซับจำเพาะของเส้นใยทอเดี่ยว

Sample	**Absorbed energy (J)**	**Specific absorbed energy ($J\ m^2/kg$)**
E-glass	39.1	5.2
Nylon twine	23.3	6.0
Nylon monofilament	23.2	6.8
Kevlar	21.1	3.1

ค่าพลังงานดูดซับจำเพาะ (ตารางที่ 4.7) นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานดูดซับจำเพาะกับความสามารถต้านทานการเจาะทะลุจำเพาะ ดังรูปที่ 4.10 พบว่าวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยไนล่อน twine มีค่าความสามารถต้านทานการเจาะทะลุจำเพาะ มีค่าสูงกว่า

เส้นใยไนล่อน monofilament และค่าพลังดูดซับของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยไนล่อนทั้งสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ค่าพลังงานดูดซับจำเพาะของเส้นใยไนล่อน twine กลับมีค่าน้อยกว่าเส้นใยไนล่อน monofilament เนื่องจากเส้นใยไนล่อน monofilament มีน้ำหนักเบาหรือมีค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่น้อยกว่าเส้นใยไนล่อน twine ดังนั้นจึงทำให้ค่าพลังงานดูดซับจำเพาะของเส้นใยไนล่อน monofilament มีค่าสูงที่สุด ส่วนเส้นใยเคฟล่าร์มีค่าพลังงานดูดซับจำเพาะและค่าความสามารถต้านทานการเจาะทะลุจำเพาะต่ำที่สุด



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานดูดซับจำเพาะกับค่าความสามารถต้านทานการเจาะทะลุจำเพาะของวัสดุผสมที่ทำมาจากเส้นใยชนิดต่างๆ

จากรูปที่ 4.9 สามารถสรุปได้ว่า เส้นใยไนล่อนทั้งสองแบบมีพลังงานดูดซับจำเพาะได้ดีที่สุด รองลงเป็นเส้นใย E-glass ส่วนเส้นใยเคฟล่าร์มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งเส้นใยไนล่อนทั้งสองแบบมีค่าพลังงานดูดซับจำเพาะมากกว่าเส้นใย E-glass เป็น 28.75 % และมากกว่าเส้นใยเคฟล่าร์ประมาณ 51.56 %

4.1.4 การทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยทอผสานร่วม

เส้นใยที่เลือกในการทอผสานร่วมได้แก่ เส้นใย E-glass ที่เลือกเนื่องจากมีคุณสมบัติในการรับแรงต้านการเจาะทะลุได้ดี แต่เมื่อมาเปรียบเทียบด้วยค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่แล้ว จะเห็นได้ว่า เส้นใยไนล่อน twine มีค่าต่ำและความต้านทานการเจาะทะลุดี เนื่องจาก

เส้นใย E-glass รับแรงได้มากที่สุด แต่มีความหนาและน้ำหนักที่มากกว่าเส้นใยไนล่อน twine ในหน่วยพื้นที่มีค่าเท่ากัน ส่วนเส้นใยไนล่อน monofilament มีค่าสมบัติที่ใกล้เคียงกับเส้นใยไนล่อน twine แต่มีลักษณะผิวของเส้นใยที่เรียบมันจึงทำให้กระบวนการทอมีความยากลำบาก เนื่องจากผิวที่มันทำการจับยึดระหว่างมัดเส้นใยในโครงสร้างการทอไม่แน่นและเกิดการเลื่อนไถลของมัดเส้นใย และเส้นใยไนล่อน monofilament มีความยืดหยุ่นสูง ในกระบวนการทอจะต้องดึงเส้นใยให้ตึง แต่เมื่อดึงตึงแล้วเส้นใยจะเกิดการคลายตัวหรือยืดตัวของเส้นใยเมื่อเวลาผ่านไป จึงทำให้มีการจัดเรียงตัวของเส้นใยในกระบวนการทอได้ไม่ดี เมื่อเทียบกับเส้นใย E-glass และเส้นใยไนล่อน twine ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกเส้นใย E-glass กับเส้นใยไนล่อน twine มาทอร่วมกัน ส่วนกรณีที่เลือกเส้นใยเคฟล่าร์มาทอร่วมกับเส้นใยไนล่อน twine เนื่องจากเส้นเคฟล่าร์มีความสามารถรับแรงต้านการเจาะทะลุที่ไม่แตกต่างกับเส้นใยไนล่อน twine แม้เส้นใยเคฟล่าร์มีค่าความยืดหยุ่นต่ำกว่าเส้นใยไนล่อน twine แต่ลักษณะของเส้นใยที่เหมือนกัน คือ เส้นใยเป็นแบบมัดเส้นใยและขนาดของเส้นใยใกล้เคียงกัน อาจจะทอร่วมกันและจับยึดได้ดี จึงได้มีการศึกษาเพิ่มเติมในการทอร่วมของเส้นใยทั้งสองชนิด ดังแสดงลักษณะการทอร่วมในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ชนิดของเส้นใยที่มาทอผสานร่วมในรูปแบบโครงสร้างการทอแบบ 3-D orthogonal

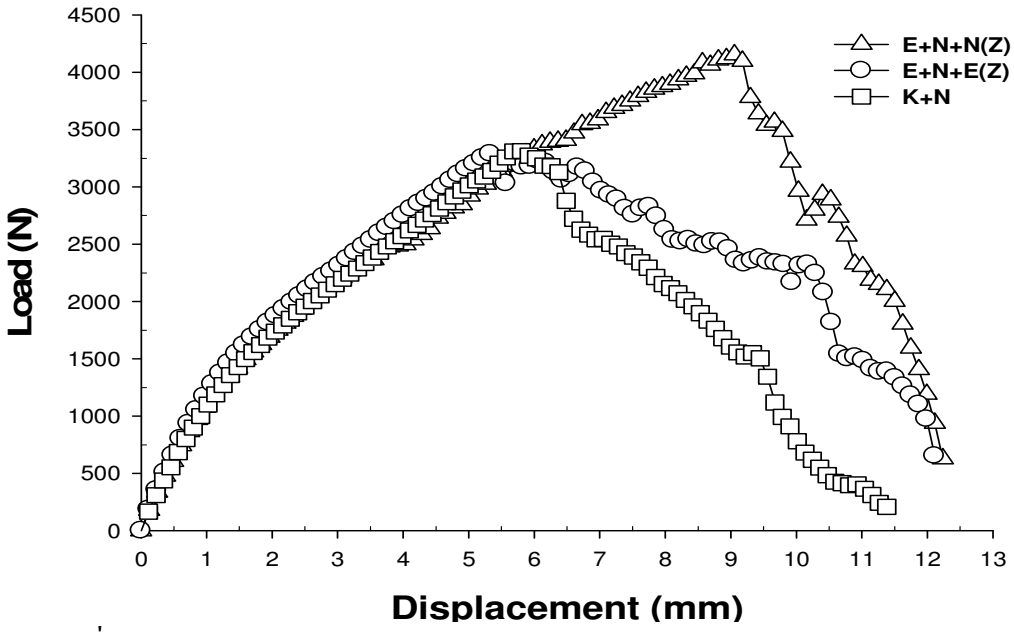
Sample	Warp (X)	Weft (Y)	Z yarn	Symbol of sample
E-glass & Nylon twine	Nylon twine	E-glass	Nylon twine	E+N+N(Z)
E-glass & Nylon twine	E-glass	Nylon twine	E-glass	E+N+E(Z)
Nylon twine & Kevlar	Nylon twine	Kevlar	Nylon twine	K+N

การทอผสานร่วมระหว่างเส้นใย E-glass กับเส้นใยไนล่อน twine แบบ E+N+N(Z)มีความสามารถรับแรงกระแทกได้สูงกว่าการทอผสานร่วมแบบ E+N+E(Z) และแบบ K+N อยู่ 33.60 % ดังแสดงในตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 แต่ความสามารถในการยืดตัวของชิ้นทดสอบที่ระยะการรับแรงสูงสุดของแบบ E+N+N(Z) มากกว่าการแบบ E+N+E(Z) และแบบ K+N อยู่ประมาณ 43.3 % จากงานวิจัยของ Changan Ji et al., 2007 และ B. K. Behera and Rajesh Mishra., 2008 กล่าวไว้ว่า การจัดเรียงตัวของเส้นใยในกระบวนการทอเส้นใยตามยาวและตามขวางเป็นส่วนที่จะต้องมีความยืดหยุ่นและความแข็งแรงสูง ส่วนเส้นใยในทิศทาง Z เป็นตัวจับยึดเส้นใย

ระหว่างเส้นใยตามยาวและตามขวาง ดังนั้น การทอผสานร่วมแบบ E+N+N(Z) มีเส้นใย E-glass มีความสามารถในการรับแรงกระแทกได้ดีอยู่ในเส้นใยตามขวาง และเส้นใยไนล่อน Twine มีความสามารถในการยืดหยุ่นสูงอยู่เส้นใยตามยาวและทิศทาง Z จึงทำให้มีคุณสมบัติการรับแรงและการยืดหยุ่นได้ดีกว่าการทอผสานร่วมแบบอื่นๆ

ตารางที่ 4.9 ค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่และค่าการรับแรงสูงสุดของชิ้นทดสอบ

Sample	Areal density (kg/m^2)	Max load (kN)
E+N+N(Z)	7.4	4.2
E+N+E(Z)	7.0	3.3
K+N	6.5	3.3



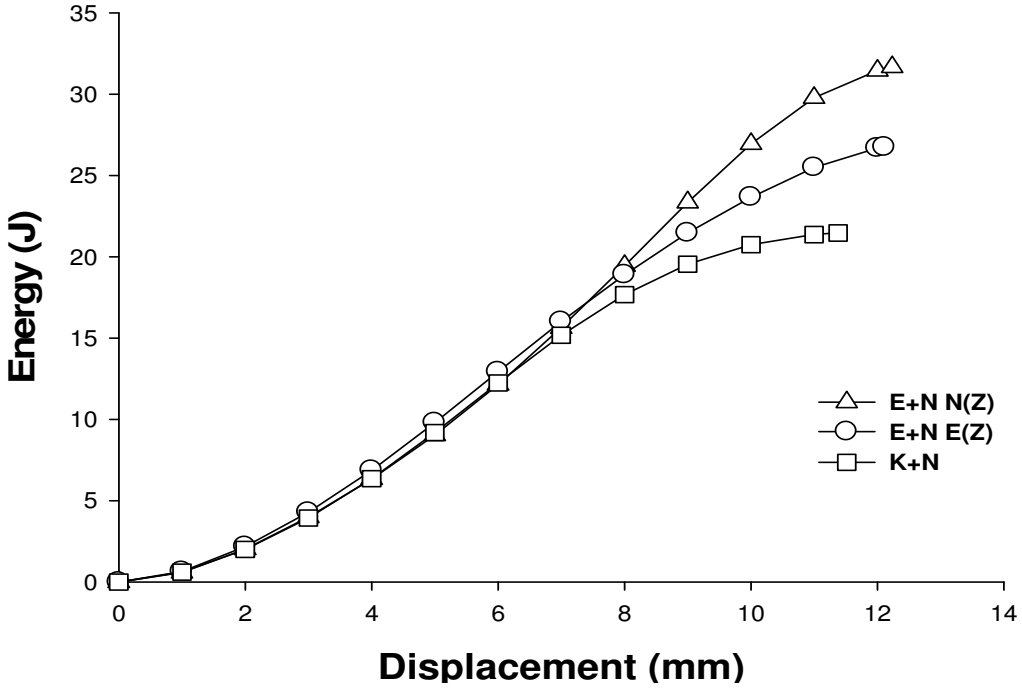
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสามารถการต้านทานการเจาะทะลุของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยทอผสานร่วม

ตารางที่ 4.10 ค่าความต้านการเจาะทะลุจำเพาะ พบว่า เส้นใยทอผสานร่วมแบบ E+N+N(Z)มีค่าความต้านการเจาะทะลุจำเพาะสูงที่สุด รองลงเป็นแบบ K+N ส่วนการทอผสานร่วมแบบ E+N+E(Z) มีค่าต่ำสุด เนื่องจากแบบ E+N+E(Z) มีค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่มากกว่าแบบ K+N เพราะทั้งสองแบบมีค่าความสามารถรับแรงสูงสุดใกล้เคียงกัน จึงทำให้เส้นใยทอผสานร่วมแบบ K+N มีค่าความต้านการเจาะทะลุจำเพาะมากกว่าแบบ E+N+E(Z) อยู่ประมาณ 7.84 %

ตารางที่ 4.10 ค่าความต้านการเจาะทะลุจำเพาะเส้นใยทอผสานร่วม

Sample	Specific puncture load (kN m^2/kg)
E+N+N(Z)	0.56
E+N+E(Z)	0.47
K+N	0.51

จากข้อมูลในรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่า ในช่วงระยะยืดที่ 0-6 มิลลิเมตร เส้นใยทอผสานร่วมทั้ง 3 แบบ มีค่าพลังงานดูดซับที่ใกล้เคียงกัน อาจเนื่องมาจากเส้นใยทอผสานร่วมทั้ง 3 แบบ มีเส้นใยไนล่อน twine เป็นเส้นใยทอร่วมทำให้ค่าพลังงานดูดซับไม่ต่างกัน แต่เมื่อแรงเพิ่มขึ้นทำให้เส้นใยชนิดอื่นที่มาทอผสานร่วมซึ่งมีคุณสมบัติในการรับแรงกระแทกได้ดีกว่าเส้นใยไนล่อน twine จึงทำให้ค่าพลังงานมีค่าแตกต่างกัน อย่างเช่น เส้นใย E-glass ที่มีความสามารถรับแรงการเจาะได้ดี ดังนั้น ทำให้เส้นใยทอผสานร่วมแบบ E+N+N(Z) มีค่าพลังงานดูดซับสูงสุด และมีค่ามากกว่า แบบ E+N+E(Z) อยู่ 15.45 % และมากกว่าแบบ K+N อยู่ 32.18 %

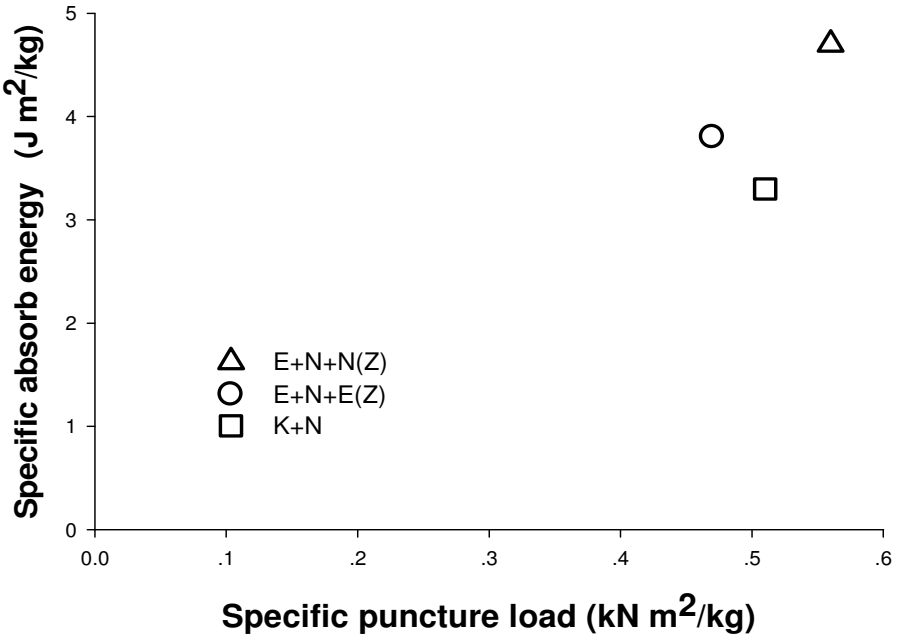


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงพลังงานดูดซับกับระยะยืดของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยทอผสานร่วม

ตารางที่ 4.11 ค่าพลังงานดูดซับและค่าพลังงานดูดซับจำเพาะของเส้นใยทอผสานร่วม

Sample	Absorbed energy (J)	Specific absorbed energy ($J\ m^2/kg$)
E+N+N(Z)	31.7	4.3
E+N+E(Z)	26.8	3.8
K+N	21.5	3.3

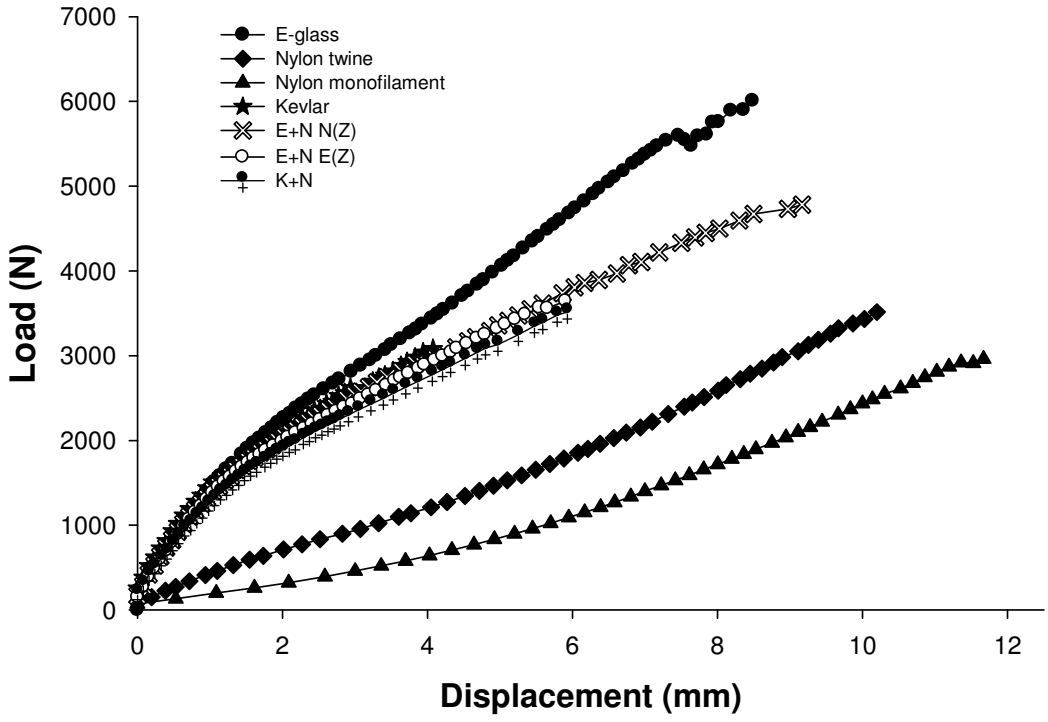
ค่าความสามารถต้านทานการเจาะทะลุจำเพาะและค่าพลังงานดูดซับจำเพาะในตารางที่ 4.10 และ 4.11 นำข้อมูลมาเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.12 พบว่า การทอผสานร่วมแบบ E+N+E(Z) และแบบ K+N มีค่าความสามารถในการรับแรงสูงสุดได้ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อมาเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถต้านทานการเจาะทะลุจำเพาะกับค่าพลังงานดูดซับจำเพาะ พบว่า แบบ E+N+E(Z) มีความสามารถต้านทานการเจาะลุได้ดีกว่าการทอผสานร่วมแบบ K+N ดังนั้น จากการทอผสานร่วมทั้ง 3 แบบ สามารถสรุปได้ว่า เส้นใยที่ทอผสานร่วมแบบ E+N+N(Z) มีความสามารถต้านทานการเจาะลุได้ดีกว่าการทอผสานร่วมแบบอื่นๆ อยู่ประมาณ 13.16-30.30 %



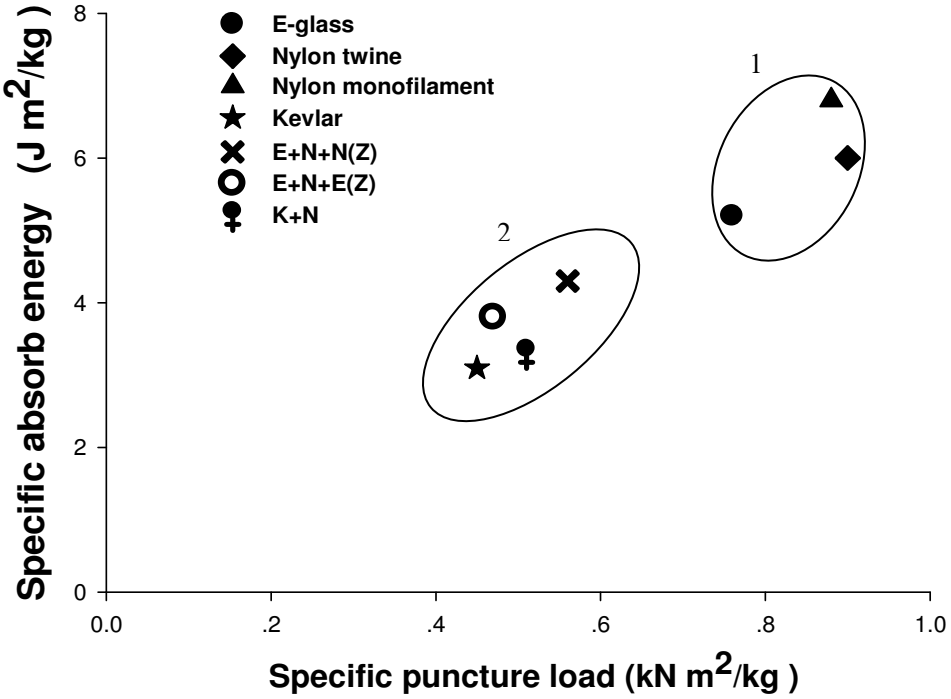
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานดูดซับจำเพาะกับค่าความสามารถต้านทานการเจาะทะลุของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยทอผสานร่วม

4.1.5 เปรียบเทียบผลการทดสอบต้านทานการเจาะทะลุของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยทอเดี่ยวกับเส้นใยทอผสานร่วม

การเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงกระแทกสูงสุดของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยทอเดี่ยวและทอผสานร่วม ในรูปที่ 4.13 พบว่า เส้นใย E-glass สามารถรับแรงกระแทกได้มากที่สุด รองลงมาเป็นเส้นใยทอผสานร่วมแบบ E+N+N(Z) ซึ่งเส้นใย E-glass สามารถรับแรงได้มากกว่าการทอผสานร่วมแบบ E+N+N(Z) ประมาณ 25.63 % แต่การทอผสานร่วมแบบ E+N+N(Z) ความสามารถในยืดหยุ่นได้ดีกว่าเส้นใย E-glass อยู่ประมาณ 7.4 % ซึ่งค่าความหนาแน่นเชิงพื้นของเส้นใย E-glass กับการทอผสานร่วมแบบ E+N+N(Z) มีค่าใกล้เคียงกันและมีความแตกต่างกันเพียง 1.35 % เนื่องจากการทอผสานร่วมมีเส้นใยไนล่อน twine มาทอร่วมซึ่งมีคุณสมบัติความยืดหยุ่นสูง จึงทำให้สามารถยืดตัวได้ดีกว่าเส้นใย E-glass ส่วนเส้นใยเคฟล่าร์รับแรงกระแทกน้อยกว่าการทอผสานร่วมแบบ K+N อยู่ 14.05 % และระยะการยืดตัวของชิ้นทดสอบก็น้อยกว่าการทอผสานร่วมแบบ K+N อยู่ 44.60 % เนื่องจากการทอผสานร่วมแบบ K+N มีเส้นใยไนล่อน twine เป็นส่วนช่วยเสริมแรงและการยืดตัวของชิ้นทดสอบ จากการทดสอบข้างต้น พบว่าเส้นใยไนล่อน twine มีความสามารถต้านทานการเจาะทะลุได้ดีกว่าเส้นใยชนิดอื่นๆ



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยทอเดี่ยวกับเส้นใยทอผสานร่วม



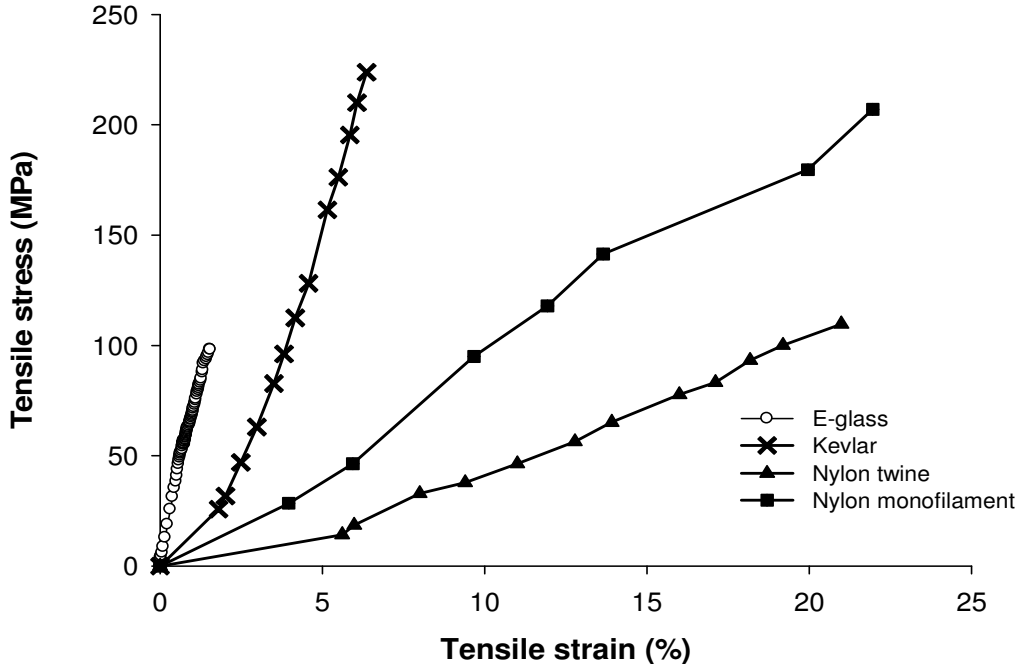
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานดูดซับจำเพาะกับค่าความสามารถต้านทานการเจาะทะลุจำเพาะของวัสดุผสมที่ทำมาจากเส้นใยทอเดี่ยวกับเส้นใยทอผสานร่วม

จากรูปที่ 4.14 ได้แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม โดยจะแบ่งตามค่าความสามารถต้านทานการเจาะทะลุจำเพาะ กลุ่มที่ 1 มีค่าความสามารถต้านทานการเจาะทะลุจำเพาะมากกว่า 0.75 kN m^2/kg ซึ่งในกลุ่มนี้ประกอบด้วยเส้นใยไนล่อนทั้ง 2 แบบ และเส้นใย E-glass ซึ่งกลุ่มนี้มีความสามารถต้านทานการเจาะทะลุได้ดีที่สุด ส่วนกลุ่มที่ 2 มีค่าความสามารถต้านทานการเจาะทะลุจำเพาะต่ำกว่า 0.75 kN m^2/kg ประกอบด้วยเส้นใยเคฟล่าร์ และเส้นใยทอผสานร่วมทั้ง 3 แบบ กลุ่มนี้จะมีความสามารถต้านการเจาะทะลุจำเพาะต่ำกว่ากลุ่มที่ 1 อยู่ประมาณ 37.2 % และค่าพลังงานดูดซับจำเพาะกลุ่มที่ 2 มีค่าต่ำกว่ากลุ่มที่ 1 อยู่ 40.83 % ซึ่งจากข้อมูล พบว่า การเลือกเส้นใยที่มีคุณสมบัติความต้านทานการเจาะทะลุได้ดีมาทอผสานร่วมกัน แต่ผลที่ได้กลับพบว่าเส้นใยทอผสานร่วมมีค่าความสามารถต้านทานการเจาะทะลุจำเพาะและค่าพลังงานดูดซับจำเพาะต่ำกว่าเส้นใยทอแบบเดี่ยว เนื่องจากการทอผสานร่วมเส้นใยแต่ละชนิดมีสมบัติที่แตกต่างกัน ทำให้เส้นใยแสดงความสามารถการรับแรงตามแนวแกนเส้นใยในโครงสร้างการทอ ซึ่งเส้นใยที่มีความแข็งแรงหรือมอดูลัสที่ต่ำจะเกิดความเสียหายก่อน จะส่งผลทำให้โครงสร้างการทอและการจับยึดของมัดเส้นใยถูกทำลาย (X. Wang et al. 2008) จึงทำให้ความสามารถต้านการเจาะทะลุลดลง ต่างจากเส้นใยทอเดี่ยวที่สมบัติของเส้นใยเหมือนกันทั้งโครงสร้างการทอทำให้เส้นใยเกิดความเสียหายไป

พร้อมๆกัน ดังนั้นวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยในกลุ่มที่ 1 จะถูกเลือกไปจัดเรียงชั้นของเส้นใยทอ เพื่อทดสอบการยิงกระสุนจริงต่อไป

4.2 การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile test)

จากการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของเส้นใยเดี่ยวชนิดต่างๆ โดยนำมาทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3822-01 ดังแสดงผลการทดสอบในรูปที่ 4.15 ผลการทดสอบความสามารถต้านทานต่อการดึงหรือเปลี่ยนรูป (เทียบจากค่ามอดูลัสของเส้นใย) ซึ่งเขียนเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้ 1) เส้นใย E-glass 2) เส้นใยเคฟล่าร์ 3) เส้นใยไนล่อน แบบ monofilament และ 4) เส้นใยไนล่อน แบบ twine โดยเส้นใยทั้งหมดมีค่ามอดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 6.14, 3.84, 0.95 และ 0.56 GPa ตามลำดับ ดังนั้น เส้นใย E-glass มีค่าความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปมากที่สุด รองลงมาเป็นเส้นใยเคฟล่าร์ ส่วนเส้นใยไนล่อนทั้งสองแบบมีความสามารถในการยืดตัวได้ดีกว่าเส้นใย E-glass และเส้นใยเคฟล่าร์ ประมาณ 7 เท่า



รูปที่ 4.15 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของเส้นใยชนิดต่างๆ

4.3 การทดสอบความต้านทานแรงดึงของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยทอ

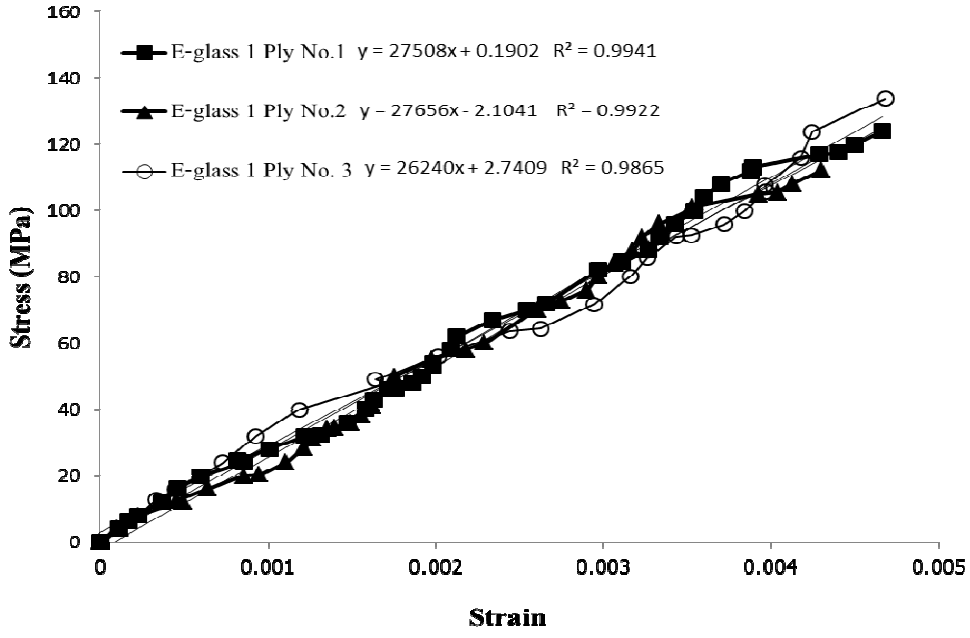
ในการทดสอบชิ้นงานจะทำการทดสอบจนกระทั่งชิ้นทดสอบเกิดความเสียหายด้วยความเร็ว 2 mm/min โดยชิ้นทดสอบมีขนาดความยาว 20.32 เซนติเมตร กว้าง 2.54 เซนติเมตร ผลการทดสอบความสามารถต้านทานต่อการดึงหรือเปลี่ยนรูป โดยเทียบจากค่ามอดูลัสและ

ป๊วซองส์ของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยที่ทำเป็นแผ่นประกบ ซึ่งความหนาและน้ำหนักได้แสดงในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ความหนาและน้ำหนักของชิ้นทดสอบ

Samples	Thickness (mm)	Weight (kg)
E-glass (1 Ply)	6.17	42.80×10^{-3}
Nylon twine (2 Plies)	11.25	64.45×10^{-3}
E-glass+Nylon twine (2 Plies)	10.80	40.95×10^{-3}

การทดสอบแรงดึงของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใย E-glass แบบชั้นเดียว ในการหาค่า $\overline{E}_x$ ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 3039/D 3039M – 00 (2006) ระหว่างช่วงค่าความเครียดกำหนดจะใช้ประโยชน์จากสมการเส้นตรงโดยค่า $\overline{E}_x$ คือ ค่าความชันของกราฟหรือ $\frac{dY}{dX}$ เมื่อทำการลดกราฟให้อยู่ในช่วงความเครียดในแนวยาวของชิ้นงานมีค่าตั้งแต่ 0-0.5%ε จะได้กราฟความสัมพันธ์ในลักษณะดังรูปที่ 4.16 จะได้ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นในแนวยาวของชิ้นทดสอบ คือ 2.751, 2.766 และ 2.624 GPa เมื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย ($\overline{E}_{x,\,average}$) เท่ากับ 2.714±0.078 GPa

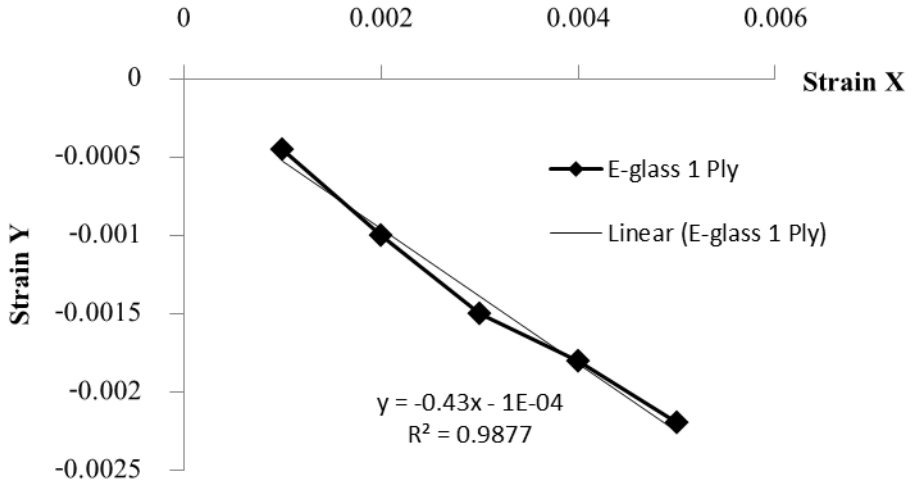


รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใย E-glass แบบชั้นเดียว

สำหรับการหาค่าปัวซองส์แนวแกน XY สามารถใช้ค่าความเครียดที่ได้จากการทดสอบได้ ดังสมการที่ 4.1

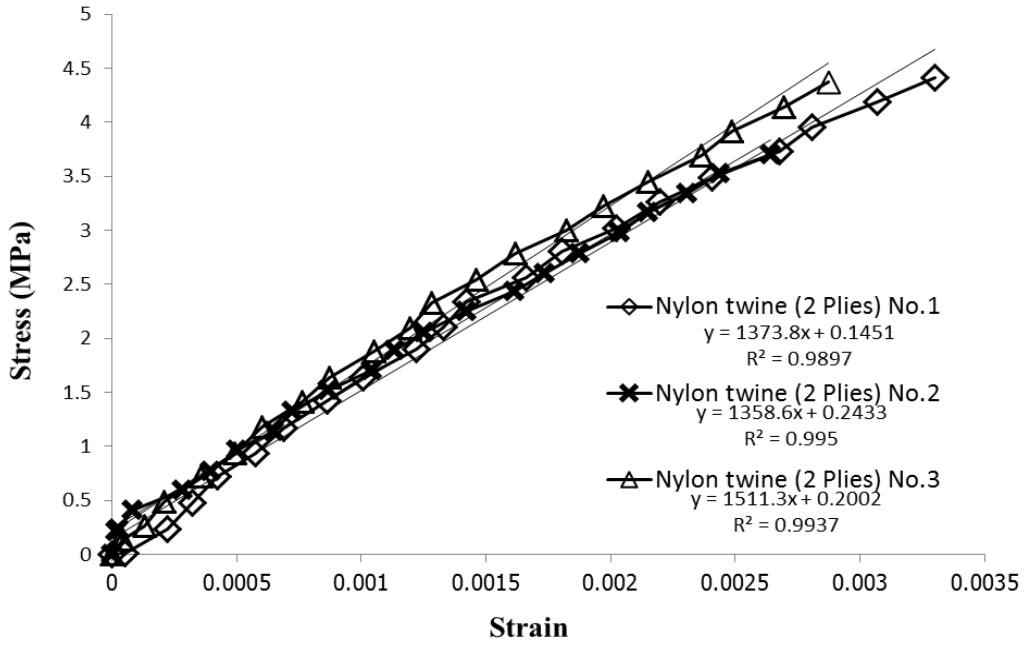
$$\nu_{xy} = \frac{-\varepsilon_{lateral}}{\varepsilon_{longitudinal}} \quad (4.1)$$

โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวขวาง (lateral,y) ของชิ้นงานทดสอบกับความเครียดในแนวยาว (longitudinal, x) ของชิ้นงานทดสอบมีลักษณะดังรูปที่ 4.17 โดยใช้ไมโครมิเตอร์วัดการเปลี่ยนแปลงขนาดในแนวขวาง เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของกราฟจะได้ว่า ν_{xy}= 0.43



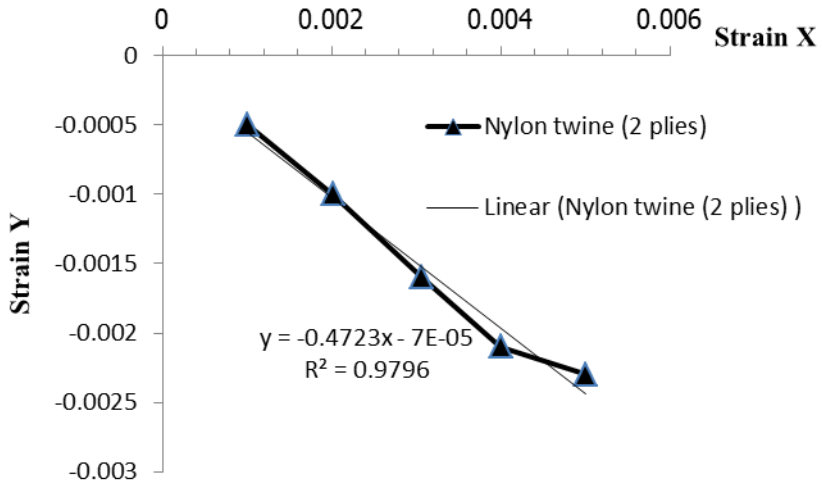
รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดในแนวขวางกับค่าความเครียดในแนวยาวของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใย E-glass แบบชั้นเดียว

การทดสอบแรงดึงของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยไนล่อน twine แบบลามิเนตจำนวน 2 ชั้น ในการหาค่า $\overline{E}_x$ คือ ค่าความชันของกราฟหรือ $\frac{dY}{dX}$ เมื่อทำการลดกราฟให้อยู่ในช่วงความเครียดในแนวยาวของชิ้นงานมีค่าตั้งแต่ 0-0.35%ε จะได้กราฟความสัมพันธ์ในลักษณะดังรูปที่ 4.18 จะได้ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นในแนวยาวของชิ้นทดสอบ คือ 1.374, 1.369 และ 1.515 GPa เมื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยจะได้ 1.419±0.083 GPa

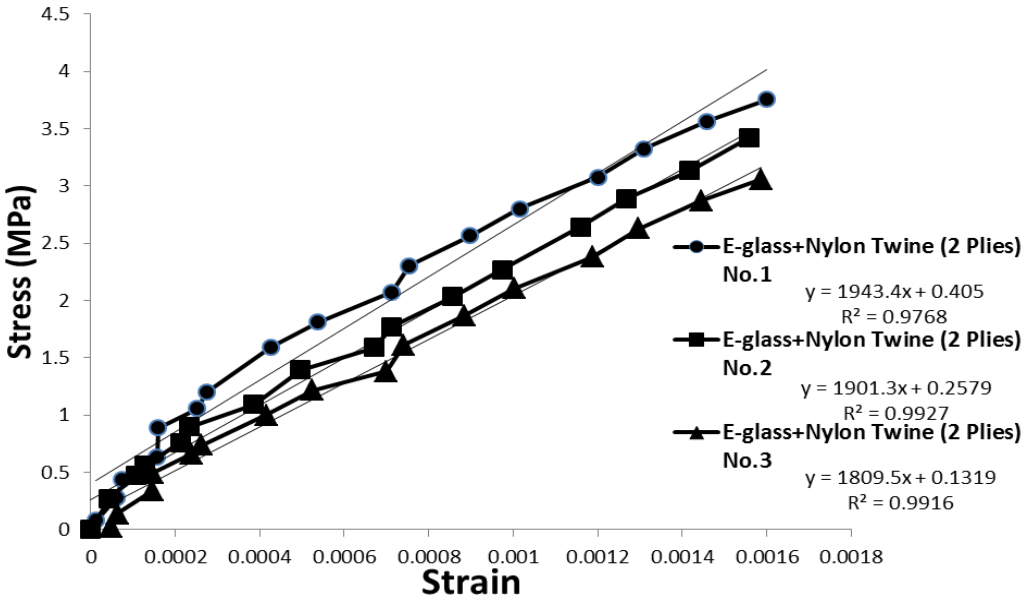


รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียด
ของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยไนล่อน twine แบบลามิเนตจำนวน 2 ชั้น

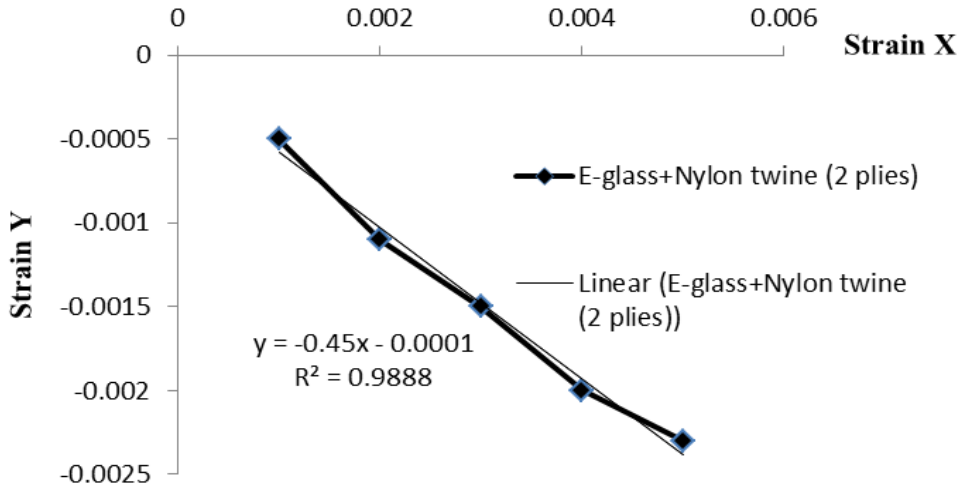
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวขวางของชิ้นงานทดสอบกับความเครียดในแนวยาวของชิ้นงานทดสอบมีลักษณะดังรูปที่ 4.19 เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของกราฟจะได้ว่า $\nu_{xy} = 0.47$



รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดในแนวขวางกับค่าความเครียดในแนวยาว
ของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยไนล่อน twine แบบลามิเนตจำนวน 2 ชั้น



รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดแบบลามิเนตร่วม ของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใย E-glass กับเส้นใยไนล่อน twine จำนวน 2 ชั้น



รูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดในแนวขวางกับค่าความเครียดในแนวยาวแบบลามิเนตร่วมของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใย E-glass กับเส้นใยไนล่อน twine จำนวน 2 ชั้น

ทดสอบแรงดึงชิ้นทดสอบแบบลามิเนตร่วมของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใย E-glass กับเส้นใยไนล่อน twine จำนวน 2 ชั้น ในการหาค่า $\overline{E}_x$ คือ ค่าความชันของกราฟหรือ $\frac{dY}{dX}$ เมื่อทำการลดกราฟให้อยู่ในช่วงความเครียดในแนวยาวของชิ้นงานมีค่าตั้งแต่ 0-0.18%ε จะได้กราฟ

ความสัมพันธ์ในลักษณะดังรูป 4.20 จะได้ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นในแนวยาวของชิ้นทดสอบ คือ 1.943, 1.901 และ 1.859 GPa เมื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยจะได้ 1.901±0.042 GPa

โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวขวางของชิ้นงานทดสอบกับความเครียดในแนวยาวของชิ้นงานทดสอบมีลักษณะดังรูปที่ 4.21 เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของกราฟจะได้ว่า ν_{xy}= 0.44

จากการทดสอบความต้านทานแรงดึงของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยทอทั้งสามแบบสังเกตเห็นได้ว่า ค่ามอดูลัสของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใย E-glass แบบชั้นเดียวมีค่ามากกว่าชิ้นทดสอบแบบลามิเนตร่วมของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใย E-glass กับเส้นใยไนล่อน twine อาจเนื่องมาจากการขึ้นรูปเป็นวัสดุผสมอีพ๊อกซี่ถูกดูดซึมเข้าไปในระหว่างเส้นใยไนล่อนมากเกินไป ทำให้อีพ็อกซี่ที่มาเกาะตัวบนเส้นใย E-glass น้อยลง ทำให้ในระหว่างการทดสอบได้เกิดการแยกชั้นของชิ้นทดสอบลามิเนต จึงทำให้เส้นใย E-glass เกิดการเสียหายเร็วขึ้น เห็นได้จากค่าความเครียดในการทดสอบแรงดึงว่าชิ้นทดสอบแบบลามิเนตร่วมของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใย E-glass กับเส้นใยไนล่อน twine มีค่าน้อยกว่าวัสดุผสมทำมาจากเส้นใย E-glass แบบชั้นเดี่ยว

4.4 การคำนวณสมบัติทางกลด้วยทฤษฎีวัสดุผสมแผ่นประกบของรูปแบบการทอแบบ 3 มิติ

การประมาณค่าสมบัติทางกลด้วยทฤษฎีวัสดุผสมแผ่นประกบ สามารถใช้ในการประมาณค่าวัสดุประกอบที่นำมาจัดเรียงโดยใช้ผลจากคุณสมบัติของวัสดุในแต่ละชั้นแบบชั้นต่อชั้น สำหรับของวัสดุที่จะทำการศึกษาคือวัสดุผสมที่ทำด้วยเส้นใยทอ และอีพ๊อกซี่ ที่จัดเรียงด้วยเส้นใยแนวเดียวแบบ $[(0/90)_s]$ โดยใช้ข้อมูลสมบัติทางกลของแต่ละส่วนประกอบดังตาราง 4.13 ซึ่งเป็นคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้การทดสอบแรงดึงและบริษัทผู้จำหน่าย

ตารางที่ 4.13 ค่าสมบัติทางกลของเส้นใยและอีพอกซี่เรซิ่น

Sample	E (GPa)	G (GPa)	ρ (kg/m^3)	ν
E-glass	6.14	2.44	2550	0.26
Nylon twine	0.56	0.22	1130	0.30
Epoxy	0.92	0.34	1270	0.35

โดยการคำนวณด้วยทฤษฎีวัสดุประกอบแผ่นประกบเป็นวิธีการคำนวณที่มีขั้นตอนในการทำหลายขั้นตอนดังแสดงสมการคำนวณในส่วนของทฤษฎีในบทที่ 2 รวมถึงการ

คำนวณหาค่าความแข็งแรงเมื่อทำการคำนวณด้วยทฤษฎีลามิเนชั่นคลาสสิคสำหรับการหาค่าสมบัติทางกลตามแต่ละรูปแบบจัดเรียงตัวของเส้นใยทอจะได้ค่าดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 แสดงค่า E_1 ,E_2, G_{12} , และ ν_{12}ของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยทอชนิดต่างๆ

Sample	**E_1 (GPa)**	**E_2 (GPa)**	**E_3 (GPa)**	**G_{12} (GPa)**	**G_{13} (GPa)**	**G_{23} (GPa)**	**ν_{12}**	**ν_{13}**	**ν_{23}**
E-glass	2.522	2.48	2.48	0.63	0.63	0.63	0.23	0.23	0.36
Nylon twine	0.71	0.70	0.70	0.26	0.26	0.26	0.25	0.25	0.35

4.5 การเปรียบเทียบสมบัติทางกลที่ได้จากการทดสอบกับการคำนวณ

ค่าสมบัติทางกลที่ได้อาจมีความคลาดเคลื่อนจากทฤษฎีเนื่องจากในกระบวนการผลิตบางครั้ง อาจมีการควบคุมการผลิตที่ไม่ดีพอทำให้ไม่ได้วัสดุที่มีค่าสมบัติทางกลตามที่คำนวณ โดยวิธีการคำนวณเพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\%\text{ความคลาดเคลื่อน} = \frac{X_{testing} - X_{calculation}}{X_{calculation}} \times 100 \qquad (4.2)$$

ซึ่งค่าสมบัติทางกลที่ได้จากการทดสอบและการผลิตชิ้นงานมีค่าดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 ค่าสมบัติทางกลที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี การทดสอบ และ % ค่าความคลาดเคลื่อน

Samples	**E_x (GPa)**		**%error**	**ν_{xy}**		**%error**
	calculation	**testing**		**calculation**	**testing**	
E-glass	2.519	2.714	7.74	0.46	0.43	6.52
Nylon twine (2 Plies)	1.429	1.419	0.70	0.49	0.47	4.08
E-glass+Nylon twine (2 Plies)	1.749	1.901	8.69	0.47	0.45	4.25

จากกการเปรียบเทียบระหว่างค่าการคำนวณกับการทดสอบ พบว่า ค่า E_x และ ν_{xy} มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่า % ความคลาดเคลื่อน มีค่าน้อยกว่า 10 % จึงสรุปได้ว่า การคำนวณทางทฤษฎีมีค่าไม่แตกต่างกับผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของวัสดุผสมเสริมด้วยเส้นใยทอ

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

สำหรับงานวิจัยนี้เพื่อศึกษารูปแบบโครงสร้างการทอและเส้นใยที่มีคุณสมบัติต้านทานการเจาะทะลุได้ดี โดยขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยทอ โดยทำการทดสอบความต้านทานต่อการเจาะทะลุ และทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงเพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดสอบ สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผล

1. การทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุ

- ความเร็วในการทดสอบมีผลต่อความสามารถต้านทานการเจาะทะลุของชิ้นทดสอบ กล่าวคือ ความเร็วที่เพิ่มขึ้นในการทดสอบทำให้ชิ้นทดสอบสามารถรับแรงกระแทกได้เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากความเร็วที่สูงในการทดสอบทำให้ชิ้นทดสอบมีเวลาสำหรับการเปลี่ยนแปลงรูปน้อย จึงทำให้การไถลของเส้นใยเกิดขึ้นได้ยากและเกิดแรงต้านภายใต้เส้นใย

- โครงสร้างการทอแบบ 3-D orthogonal weave มีความสามารถต้านทานการเจาะทะลุจำเพาะได้ดีกว่าโครงสร้างการทอแบบ 3-D angle-interlock โดยเฉลี่ยประมาณ 31 % เนื่องจากโครงสร้างการทอแบบ 3-D angle-interlock มีความแตกต่างของการสลับลายเส้นใยและจำนวนชั้นของมัดเส้นใยในแนวตามยาว (แกน X) น้อยกว่าโครงสร้างการทอแบบ 3-D orthogonal weave อยู่หนึ่งมัดเส้นใย จึงส่งผลต่อความสามารถต้านทานการเจาะทะลุลดลง

-การทดสอบของเส้นใยทอเดี่ยว พบว่า เส้นใย E-glass มีความสามารถต้านทานการเจาะทะลุภายใต้การรับแรงสูงสุดและพลังงานดูดซับได้ดีที่สุด แต่เมื่อวิเคราะห์ผลกับค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่ พบว่า วัสดุผสมทำมาจากเส้นใยไนล่อน twine มีค่าความสามารถต้านทานการเจาะทะลุจำเพาะสูงสุด แต่ค่าพลังงานดูดซับจำเพาะของเส้นใยไนล่อน monofilament มีค่าสูงที่สุด เนื่องจากเส้นใยไนล่อน monofilament มีน้ำหนักเบาหรือมีค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่น้อยกว่าเส้นใยไนล่อน twine ส่วนเส้นใย E-glass มีค่าความสามารถต้านทานการเจาะทะลุจำเพาะและค่าพลังงานดูดซับจำเพาะรองลงมา เส้นเคฟล่าร์มีค่าต่ำที่สุด

- การทดสอบต้านทานการเจาะทะลุของเส้นใยทอผสานร่วม เส้นใยที่เลือกในการทอผสานร่วมได้แก่ เส้นใย E-glass และเส้นใยไนล่อน twine เนื่องจากมีคุณสมบัติ

ต้านการเจาะทะลุได้ดี ส่วนเส้นใยไนล่อน monofilament มีค่าสมบัติต้านการเจาะทะลุได้ดีที่สุด แต่มีลักษณะผิวของเส้นใยที่เรียบมันจึงทำให้การทอมีความยากลำบาก เนื่องจากผิวที่มันทำการจัดยึดระหว่างมัดเส้นใยในโครงสร้างการทอไม่แน่นและเกิดการเลื่อนไถลของมัดเส้นใยจึงไม่ได้เลือกมาทอร่วม แต่ได้ทำการเลือกเส้นใยเคฟล่าร์ เพราะว่า เส้นใยเป็นแบบมัดเส้นใยและขนาดของเส้นใยใกล้เคียงกับเส้นใยไนล่อน twine อาจจะทอร่วมและจับยึดกันได้ดี จึงได้ศึกษาเพิ่มเติมในการทอร่วมของเส้นใยทั้งสองชนิด พบว่า การทดสอบเส้นใยที่ทอผสานร่วมแบบ E+N+N(Z) มีความสามารถต้านทานการเจาะลุจำเพาะได้ดีกว่าการทอผสานร่วมแบบอื่นๆ อยู่ประมาณ 15-32 %

- เปรียบเทียบผลการทดสอบต้านทานการเจาะทะลุของเส้นใยทอเดี่ยวกับเส้นใยทอผสานร่วม พบว่า เส้นใยทอผสานร่วมมีค่าความสามารถต้านทานการเจาะทะลุจำเพาะและค่าพลังงานดูดซับจำเพาะต่ำกว่าเส้นใยทอแบบเดี่ยว อยู่ประมาณ 38.09 %

2. เส้นใยแก้ว (E-glass) ในการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของเส้นใยเดี่ยว มีค่ามอดูลัส 6.14 GPa และมีค่าความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปมากที่สุด รองลงมาเป็นเส้นใยเคฟล่าร์ ส่วนเส้นใยไนล่อนทั้งสองแบบมีความสามารถในการยืดตัวได้ดีกว่าเส้นใย E-glass และเส้นใยเคฟล่าร์ ประมาณ 7 เท่า

3. การทดสอบความต้านทานแรงดึงของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใย พบว่า วัสดุผสมทำมาจากเส้นใย E-glass แบบชั้นเดี่ยว มีค่ามอดูลัสยืดหยุ่นในแนวยาวของชิ้นทดสอบเท่ากับ 2.96 GPa วัสดุผสมทำมาจากเส้นใยไนล่อน twine แบบลามิเนตจำนวน 2 ชั้น มีค่ามอดูลัสยืดหยุ่นในแนวยาวของชิ้นทดสอบเท่ากับ 1.4 GPa และชิ้นทดสอบแบบลามิเนตร่วมของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใย E-glass กับเส้นใยไนล่อน twine จำนวน 2 ชั้น มีค่ามอดูลัสยืดหยุ่นในแนวยาวของชิ้นทดสอบ เท่ากับ 2.1 GPa

4. การเปรียบเทียบสมบัติทางกลที่ได้จากการทดสอบแรงดึงกับการคำนวณทฤษฎีลามิเนชั่น พบว่า การคำนวณทางทฤษฎีมีค่าไม่แตกต่างกับผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของวัสดุผสมเสริมด้วยเส้นใย โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 10 %

จากการศึกษาในงานวิจัยนี้รูปแบบโครงสร้างการทอแบบ 3D orthogonal มีความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุได้ดีกว่าโครงสร้างการทอแบบ 3D angle-interlock และการเปรียบเทียบผลระหว่างเส้นใยทอเดี่ยวกับเส้นใยทอผสานร่วม พบว่าเส้นใยทอผสานร่วมมีความสามารถต้านทานการเจาะทะลุต่ำกว่าเส้นใยทอแบบเดี่ยว โดยเส้นใยทอเดี่ยวที่มีความสามรถในการรับแรงได้ดีที่สด คือ เส้นใย E-glass ส่วนของเส้นใยไนล่อนทั้ง 2 แบบ มีค่าาความสามารถต้านทานการเจาะทะลุจำเพาะและค่าพลังงานดูดซับจำเพาะมากกว่าเส้นใยทอชนิดอื่น จึงนำไปสู่การศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับแผ่นกันกระสุน โดยการทดสอบการยิงจะเลือกรูปแบบโครงสร้างการทอ

และเส้นใยที่มีความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุได้ดีไปศึกษา ซึ่งแสดงวิธีการทดสอบและผลการทดลองในส่วนของภาคผนวก ง.

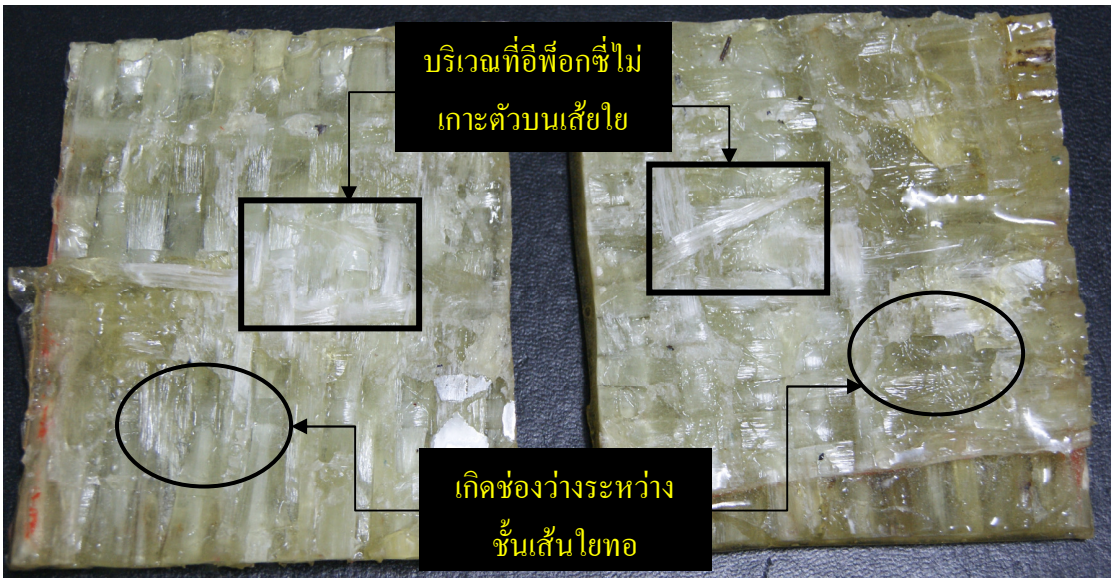
5.2 ข้อเสนอแนะ

1. กระบวนการทอเส้นใยควรปรับการตึงให้เหมาะสมสำหรับเส้นใยแต่ละชนิด เช่น เส้นใยแก้วไม่ควรดึงให้ตึงเกินไปเพราะเส้นใยมีความเปราะและขาดง่าย ส่วนเส้นใยไนล่อนควรปรับความตึงอยู่เสมอ เนื่องจากเส้นใยมีความยืดหยุ่นสูง

2. สำหรับการทอเส้นใยแก้วในการทอด้วยมือไม่ควรทอผืนเส้นใยให้มีขนาดใหญ่เกินไป เพราะเส้นใยที่ผืนขนาดใหญ่จะมีจำนวนครั้งในการยกลายที่มากจึงส่งผลทำให้เส้นใยขาดได้

3. กระบวนการขึ้นรูปวัสดุผสมด้วยวิธีทามือควรทาอีพ๊อกซี่บนเส้นใยทอให้เสมอและไล่ฟองอากาศทุกครั้งพยายามให้ฟองอากาศน้อยที่สุด เพื่อไม่ให้ส่งผลต่อผลการทดสอบเพราะฟองอากาศอาจทำให้เกิดรอยร้าวหรือรอยตำนิ (crack) เกิดขึ้นในการทดสอบได้

4. สำหรับการเตรียมชิ้นทดสอบที่ต้องจัดเรียงเส้นใยทอหลายชั้น ในการขึ้นรูปวัสดุผสมอาจจะเกิดช่องว่างระหว่างชั้นเส้นใยทอและอีพ็อกซี่ไม่เกาะตัวกับเส้นใยที่อยู่ภายในได้ แสดงดังรูปที่ 5.1 โดยทำการแยกชั้นของชิ้นทดสอบวัสดุผสมเส้นใยแก้วทอจัดเรียงซ้อนกัน 3 ชั้น เพื่อไม่ให้เกิดช่องว่างจะต้องใช้แรงกดอัดเส้นใยให้ติดกันและมีการไม่แยกชั้นตลอดจนกว่าอีพ๊อกซี่จะแข็งตัว



รูปที่ 5.1 ภายในของชิ้นทดสอบวัสดุผสมเส้นใยแก้วทอที่ทำการแยกชั้นออก

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. ตารางค่าสมบัติทางกลต่างๆ ที่ใช้อ้างอิง

ตารางที่ ก.1 ค่าสมบัติทางกลของเส้นใยและอีพ๊อกซี่เรซิน

Sample	**E (GPa)**	**G (GPa)**	**ρ (kg/m^3)**	**ν**
E-glass	6.14	2.44	2550	0.26
Nylon twine	0.56	0.22	1130	0.30
Epoxy	0.92	0.34	1270	0.35

ตารางที่ ก.2 ความหนาและความกว้างเฉลี่ยของชิ้นงานแต่ละชิ้นงานที่ผลิตได้

ชิ้นทดสอบ	**ความกว้างเฉลี่ย (cm)**	**ความหนาเฉลี่ย (cm)**	**น้ำหนักชิ้นงานทดสอบ (g)**
E-glass	2.54	6.17	42.80
Nylon twine (2 Plies)	2.54	11.25	64.45
E-glass+Nylon twine (2 Plies)	2.54	10.8	40.95

ตารางที่ ก.3 ค่าสัดส่วนของเส้นใยและสัดส่วนของเมทริกซ์

ชิ้นทดสอบ	**การจัดเรียง**	**V_f**	**V_m**
E-glass	-	0.39	0.27
Nylon twine 2 laminate	$(0/90)_2$	0.59	0.35

ภาคผนวก ข. การคำนวณสมบัติทางกลด้วยทฤษฎี

การประมาณค่าสมบัติทางกลด้วยทฤษฎีลามิเนชั่นคลาสสิค สามารถใช้ในการประมาณค่าวัสดุประกอบที่นามาจัดเรียงโดยใช้ผลจากคุณสมบัติของวัสดุในแต่ละชั้นแบบชั้นต่อชั้น ในกรณีของวัสดุที่ทางกลุ่มเลือกจะทำการศึกษาคือวัสดุประกอบที่ทาด้วยเส้นใยไนล่อน twine และอีพ๊อกซี่ ที่จัดเรียงด้วยเส้นใยแนวเดียวแบบ $[0/90]_2$ โดยทางกลุ่มได้ใช้ข้อมูลสมบัติทางกลของแต่ละส่วนประกอบจาก ภาคผนวก ก.1 และภาคผนวก ก.2

การคำนวณค่าสัดส่วนของเส้นใยและสัดส่วนของเมทริกซ์

การคำนวณค่าสัดส่วนของเส้นใยจะต้องคำนวณจากตัวแปรเพิ่มเติมจากค่าคุณสมบัติของภาคผนวก ก. โดยแสดงตัวอย่างการคานวณค่าสัดส่วนของเส้นใยทอแบบทามือที่มีการจัดเรียงแบบ $[(0/90)_2]$ โดยการหาน้ำหนักก่อนการจัดเรียงหาได้โดยใช้ค่าขนาดของวัสดุที่ผลิตด้วยวิธีการผลิตแบบทามือจากตารางภาคผนวก ก.2 ดังนี้

เส้นใยไนล่อน twine แบบลามิเนตจำนวน 2 ชั้น

- น้ำหนักเส้นใย (m_f) เท่ากับ 38.5 g
- น้ำหนักเมตริกซ์ (m_m) เท่ากับ 26.0 g
- น้ำหนักของวัสดผสม (m_c) เท่ากับ 64.5 g

$$V_f = \frac{W_f \rho_c}{\rho_f} = \left(m_f / m_{total}\right) \rho_c \Big/ \rho_f = \left(3.85\text{x}10^{-2} / 6.45\text{x}10^{-2}\right) 1109.89 \Big/ 1130.0 = 0.59$$

$$V_m = \frac{W_m \rho_c}{\rho_f} = \left(m_m / m_{total}\right) \rho_c \Big/ \rho_m = \left(2.60\text{x}10^{-2} / 6.45\text{x}10^{-2}\right) 1109.89 \Big/ 1270.05 = 0.35$$

การคำนวณหาสมบัติทางกลด้วยทฤษฎีลามิเนชั่นคลาสสิค

สมบัติการเปลี่ยนแปลงคงที่แบบอิลาสติกตามแนวแกนวัสดุผสมโดยใช้สมการพื้นฐานในการคำนวณสมบัติออิลาสติกตามแนวแกนวัสดุผสมของเส้นใยไนล่อน แบบ twine (ดังกล่าวมาแล้วในบทที่ 2) โดยใช้ความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.27

$$E_1 = (0.56)(0.59) + (0.92)(1-0.59) = 0.71 \text{ GPa}$$

$$E_2 = E_3 = (0.92)\left[\frac{(0.56)+(0.92)+(0.56-0.92)(0.59)}{(0.56)+(0.92)-(0.56-0.92)(0.59)}\right] = 0.69 \text{ GPa}$$

$$\nu_{12} = \nu_{13} = (0.30)(0.59) + (0.35)(1-0.59) = 0.32$$

$$\nu_{23} = (0.30)(0.59) + (0.35)(1-0.59)\left[\frac{1+(0.35)-(0.32)(0.92)/(0.71)}{1-(0.35)^2+(0.35)(0.32)(0.92)/(0.71)}\right] = 0.31$$

$$G_f = \frac{E_f}{2(1+\nu_f)} = \frac{0.56}{2(1+0.3)} = 0.22 \text{ GPa}$$

$$G_m = \frac{E_m}{2(1+\nu_m)} = \frac{0.92}{2(1+0.35)} = 0.34 \text{ GPa}$$

$$G_{12} = G_{13} = (0.34)\left[\frac{0.22+0.34+(0.22-0.34)(0.59)}{0.22+0.34-(0.22-0.34)(0.59)}\right] = 0.26 \text{ GPa}$$

$$G_{23} = \frac{0.69}{2(1+0.31)} = 0.26 \text{ GPa}$$

นำคงที่อิลาสติกตามแนวแกนวัสดุผสมในข้างต้น มาคำนวณค่าอีลาสติกของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยทอโดยใช้ความสัมพันธ์จากสมการที่ 2.28 ซึ่งวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยทอ แบบ 3 มิติ จะมีค่า E_2 จะมีค่าเท่ากับ E_3 ค่า $\nu_{12}=\nu_{13}$ และค่า $G_{12}=G_{13}$

$$\left[\frac{2}{0.71}\frac{0.71(0.71+(1-0.32^2)0.69)-(0.32^2)(0.69^2)}{0.71(0.71+2(0.69))+(1+0.32^2)0.69^2}\right]^{UD} = \left[\frac{1}{E_1}\right]^{WF}$$

$$[E_1]^{WF} = \left[1/1.40\right] = 0.714 \text{ GPa}$$

$$\left[\frac{4}{0.71}\frac{(0.32)(0.69)(0.71-(0.32^2)(0.69))}{0.71(0.71+2(0.69))+(1+0.32^2)0.69^2}\right]^{UD} = \left[\frac{\nu_{12}}{0.714}\right]^{WF}$$

$$[\nu_{12}]^{WF} = (0.346)(0.714) = 0.25$$

$$\left[\frac{1}{0.71}\frac{0.71(0.32+0.31+(0.32)(0.31))+(0.32^2)(0.69^2)}{0.71+(1+2(0.32))(0.69)}\right]^{UD} = \left[\frac{\nu_{23}}{0.714}\right]^{WF}$$

$$[\nu_{23}]^{WF} = (0.501)(0.714) = 0.357$$

$$\left[\frac{(1-0.31^2)0.71^2+(1+2(0.32)+2(0.32)(0.31))(0.71\times0.69)-(0.32^2)(0.69^2)}{(0.71\times0.69)(0.71+(1+2(0.32))0.69)}\right]^{UD}=\left[\frac{1}{E_3}\right]^{WF}$$

$$[E_2]^{WF}=\left[1/1.421\right]=0.704\ \text{GPa}$$

$$\left[\frac{1}{0.26}\right]^{UD}=\left[\frac{1}{G_{12}}\right]^{WF}$$

$$[G_{12}]^{WF}=0.26\ \text{GPa}$$

$$\left[\frac{1+0.32}{0.69}+\frac{1}{2(0.26)}\right]^{UD}=\left[\frac{1}{G_{23}}\right]^{WF}$$

$$[G_{23}]^{WF}=0.262\ \text{GPa}$$

ดังนั้นในการค่าอีลาสติกของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยแก้ว (E-glass) ก็ในทำนองเดียวกันไนล่อน แบบ twine ดังแสดงในตารางที่ ข.1

ตารางที่ ข.1 แสดงค่า E_1 ,E_2, G_{12} , และ ν_{12}ของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยทอชนิดต่างๆ

Sample	$\mathbf{E_1}$ **(GPa)**	$\mathbf{E_2}$ **(GPa)**	$\mathbf{E_3}$ **(GPa)**	$\mathbf{G_{12}}$ **(GPa)**	$\mathbf{G_{13}}$ **(GPa)**	$\mathbf{G_{23}}$ **(GPa)**	$\boldsymbol{\nu_{12}}$	$\boldsymbol{\nu_{13}}$	$\boldsymbol{\nu_{23}}$
E-glass	2.522	2.48	2.48	0.63	0.63	0.63	0.23	0.23	0.36
Nylon twine	0.71	0.70	0.70	0.26	0.26	0.26	0.25	0.25	0.35

ค่า Stiffness and Compliances Matrices สำหรับในหน่วยเซลล์รูปแบบ 3 มิติ ดังต่อไปนี้

[C] คือ stiffness matrix และ [S] คือ compliance matrix โดยที่ [S] เป็นอินเวิร์สเมตริกซ์ของเมตริกซ์ [C]

$$[S]=[C]^{-1}=\begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{13}/E_1 & -\nu_{13}/E_1 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{23}/E_2 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{31} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix}$$

โดยที่ E_1, E_2, E_3, G_{12}, G_{13}, G_{23}, v_{12}, v_{13}, v_{23} คือ ค่ายังมอดูลัส ค่าอัตราส่วนปัวส์ซอง และมอดูลัสเฉือน ของวัสดุเส้นใยไนล่อน แบบ twine รูปแบบ 3-D orthogonal ตามลำดับ

สำหรับค่า transformation matrix [T] มีดังนี้

$$[T]_\varepsilon = \begin{bmatrix} l_1^2 & m_1^2 & n_1^2 & 2m_1n_1 & 2l_1n_1 & 2l_1m_1 \\ l_2^2 & m_2^2 & n_2^2 & 2m_2n_2 & 2l_2n_2 & 2l_2m_2 \\ l_3^2 & m_3^2 & n_3^2 & 2m_3n_3 & 2l_3n_3 & 2l_3m_3 \\ 2l_2l_3 & 2m_2m_3 & 2n_2n_3 & 2(m_2n_3+m_3n_2) & 2(l_2n_3+l_3n_2) & 2(l_2m_3+l_3m_2) \\ 2l_1l_3 & 2m_1m_3 & 2n_1n_3 & 2(m_1n_3+m_3n_1) & 2(l_1n_3+l_3n_1) & 2(l_1m_3+l_1m_3) \\ 2l_1l_2 & 2m_1m_2 & 2n_1n_3 & 2(m_1n_2+m_2n_1) & 2(l_1n_2+l_2n_1) & 2(l_1m_2+l_1m_2) \end{bmatrix}$$

โดย $l_i = \cos(i,x), m_i = \cos(i,y), n_i = \cos(i,z)\ (i = 1,2,3)$

ค่า Transformed compliance matrix คือ $[\bar{S}]$

$$[\bar{S}] = [T_\varepsilon]^{-1}[S][T_\varepsilon]$$

สำหรับเส้นใยตามยาวในหน่วยเซลล์ จะได้ว่า $[\bar{S}]_1 = [S]_1$

สำหรับเส้นใยตามขวาง ค่า Transformed compliance matrix จะได้ว่า $[\bar{S}]_2 = [T_2]^{-1}[S]_1[T_2]$ โดยที่ $[T_2]$ มีค่า l_1=0, l_2=-1, l_3=0, m_1=1, m_2=0, m_3=0, n_1=0, n_2=0, n_3=1

สำหรับเส้นใยตามแกน Z ค่า Transformed compliance matrix จะได้ว่า $[\bar{S}]_3 = [T_3]^{-1}[S]_1[T_3]$ โดยที่ $[T_3]$ มีค่า l_1=0, l_2=0, l_3=1, m_1=0, m_2=1, m_3=0, n_1=-1, n_2=0, n_3=0

ค่า Transformed compliance matrix รวมทั้งหมด $[\bar{S}]_{total} = \sum_{i=s}[T_i]^{-1}[S_i][T_i]$

$$[S]_1 = \begin{bmatrix} S_{11}^{(1)} & S_{12}^{(1)} & S_{12}^{(1)} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12}^{(1)} & S_{22}^{(1)} & S_{23}^{(1)} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12}^{(1)} & S_{23}^{(1)} & S_{22}^{(1)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\left(S_{22}^{(1)} - S_{23}^{(1)}\right) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55}^{(1)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55}^{(1)} \end{bmatrix}$$

$$\left[\overline{S}_1\right] = [S]_1 = \begin{bmatrix} 1.40 & -0.346 & -0.346 & 0 & 0 & 0 \\ -0.346 & 1.42 & -0.50 & 0 & 0 & 0 \\ -0.4346 & -0.50 & 1.42 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.840 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3.846 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3.846 \end{bmatrix}$$

$$[T_2] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & -2 \end{bmatrix}$$

$$[T_3] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\left[\overline{S}\right]_2 = [T_2]^{-1}[S]_1[T_2]$$

$$\left[\overline{S}\right]_2 = \begin{bmatrix} 0 & -0.346 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.346 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.42 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3.846 \end{bmatrix}$$

$$[\bar{S}]_3 = [T_3]^{-1}[S]_1[T_3]$$

$$[\bar{S}]_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -0.346 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.42 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.346 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3.846 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[\bar{S}] = [\bar{S}]_1 + [\bar{S}]_2 + [\bar{S}]_3$$

$$[\bar{S}] = \begin{bmatrix} 1.40 & -0.692 & -0.692 & 0 & 0 & 0 \\ -0.692 & 2.84 & -0.50 & 0 & 0 & 0 \\ -0.692 & -0.50 & 2.84 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.84 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 7.692 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 7.692 \end{bmatrix}$$

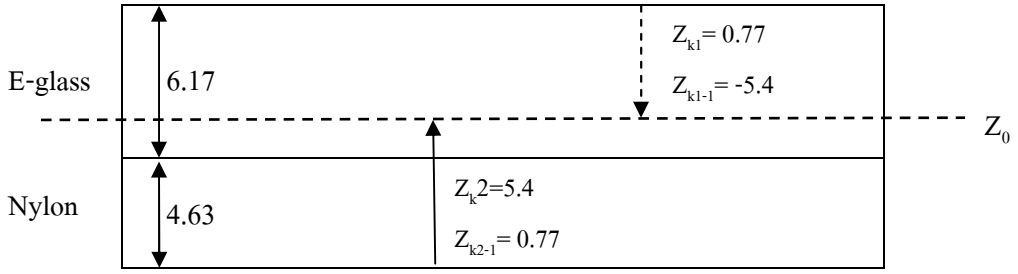
ไนล่อน แบบ twine $[\bar{C}]_2 = [\bar{S}]^{-1} =$

$$\begin{bmatrix} 1.009 & 0.299 & 0.299 & 0 & 0 & 0 \\ 0.299 & 0.452 & 0.152 & 0 & 0 & 0 \\ 0.299 & 0.152 & 0.452 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.260 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.130 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.130 \end{bmatrix}$$

และสำหรับค่า $[\bar{C}]$ ของเส้นใย E-glass แบบ 3-D orthogonal คำนวณในทำนองเดียวกับเส้นใยไนล่อน แบบ twine ได้ค่าดังนี้

เส้นใย E-glass $[\bar{C}]_2 = [\bar{S}]^{-1} =$

$$\begin{bmatrix} 3.39 & 0.94 & 0.94 & 0 & 0 & 0 \\ 0.94 & 1.55 & 0.50 & 0 & 0 & 0 \\ 0.94 & 0.50 & 1.55 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.91 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.32 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.32 \end{bmatrix}$$



$$A_{rs} = \sum_{k=1}^{N} \overline{C}_{rs}[Z_k - Z_{k-1}] = \sum_{k=1}^{N} \overline{C}_{rs} t_k$$

$$A_{11} = \overline{C}_{11}^{1}[0.77 - (-5.4)] + \overline{C}_{11}^{2}[5.4 - 0.77]$$
$$A_{11} = 3.39[6.17] + 1.01[4.63] = 25.59$$
$$A_{12} = A_{21} = \overline{C}_{12}^{1}[0.77 - (-54.4)] + \overline{C}_{12}^{2}[5.4 - 0.77] = 0.94[6.17] + 0.30[4.63] = 7.19$$

วิธีการคำนาณ A_{23} A_{22} A_{44} และ A_{55} ในทำนองเดียวกับ A_{11} จะได้ว่า

$$A = \begin{bmatrix} 25.59 & 7.19 & 7.19 & 0 & 0 & 0 \\ 7.19 & 11.65 & 3.78 & 0 & 0 & 0 \\ 7.19 & 3.78 & 11.65 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 6.82 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.58 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.58 \end{bmatrix}$$ kN/mm หรือ GPa*mm

ในกรณีที่วัสดุเป็นวัสดุจัดเรียงแบบสมมาตร ค่าความสัมพันธ์ของความเครียดในระนาบอ้างอิงสัมพันธ์กับภาระที่กระทำต่อชิ้นงานแสดงมีค่าดังนี้

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_s^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{xx} & a_{xy} & a_{xs} \\ a_{yx} & a_{yy} & a_{ys} \\ a_{sx} & a_{sy} & a_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_s \end{bmatrix}$$

เมื่อ [a] =[A]$^{-1}$ โดยที่ [a] เป็นอินเวิร์สเมทริกซ์ของเมทริกซ์ [A] ดังสมการ

$$[A^{-1}] = \frac{1}{\det[A]} \text{adj}[A] = \begin{bmatrix} a_{xx} & a_{xy} & a_{xs} \\ a_{yx} & a_{yy} & a_{ys} \\ a_{sx} & a_{sy} & a_{ss} \end{bmatrix}$$

ดังนั้น $$[a]=[A]^{-1}=\begin{bmatrix} 0.053 & -0.0247 & -0.0247 & 0 & 0 & 0 \\ -0.0247 & 0.107 & -0.0196 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0247 & -0.0186 & 1.160 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.583 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4.186 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & & 0 & 4.186 \end{bmatrix} \quad (\text{kN/mm})^{-1}$$

ในการหาสมบัติทางกลของลามิเนตจากสมการและสาหรับลามิเนตที่สมมาตร สามารถหาค่าสมบัติทางกลได้ดังนี้ $E_x=\frac{1}{ha_{xx}}, E_y=\frac{1}{ha_{yy}}, \nu_{xy}=-\frac{a_{ys}}{a_{xx}}, \nu_{yx}=-\frac{a_{xs}}{a_{yy}}$

โดยค่า h (ความหนาของลามิเนต) = 10.8 mm

$$E_x=\frac{1}{ha_{xx}}=\frac{1}{(10.8)(0.053)}=1.75 \text{ GPa}$$

$$E_y=E_z=\frac{1}{ha_{yy}}=\frac{1}{(10.8)(0.107)}=0.86 \text{ GPa}$$

$$\nu_{xy}=-\frac{a_{ys}}{a_{xx}}=-\frac{0.0247}{0.053}=0.47$$

$$\nu_{xz}=-\frac{a_{xs}}{a_{zz}}=-\frac{0.0247}{0.107}=0.23$$

$$\nu_{yz}=-\frac{a_{yz}}{a_{yy}}=-\frac{0.0196}{0.107}=0.18$$

ตารางที่ ข.1 แสดงค่ามอดูลัสและสัดส่วนปัวส์ซองของวัสดุผสมเส้นใยแบบต่างๆจากคำนวณ

Sample	**E_x (GPa)**	**E_y (GPa)**	**E_z (GPa)**	**ν_{xy}**	**ν_{xz}**	**ν_{yz}**
E-glass	2.52	1.24	01.24	0.46	0.23	0.21
Nylon twine (2 Plies)	1.49	0.70	0.70	0.49	0.24	0.17
E-glass+Nylon twine (2 Plies)	1.75	0.86	0.86	0.47	0.23	0.18

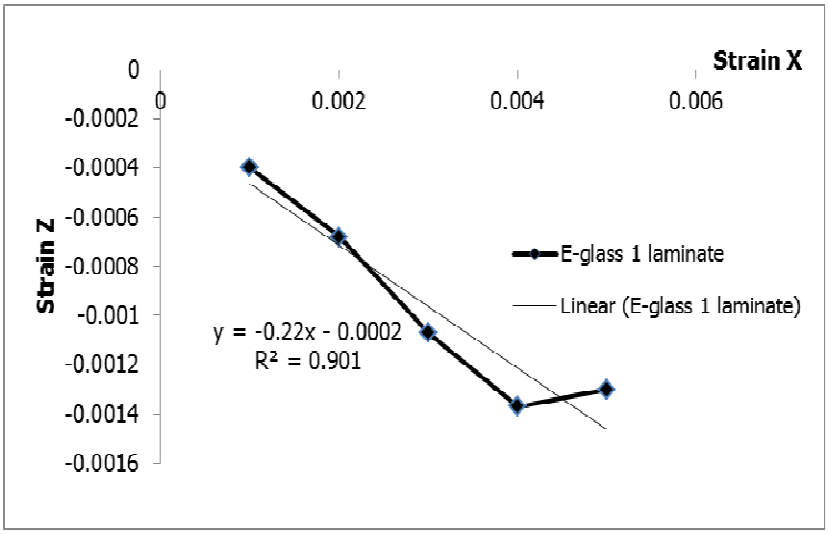
ภาคผนวก ค. ผลการทดสอบแรงดึงของวัสดุผสม

- วัสดุผสมทำมาจากเส้นใยแก้วชั้นเดี่ยว (E-glass)

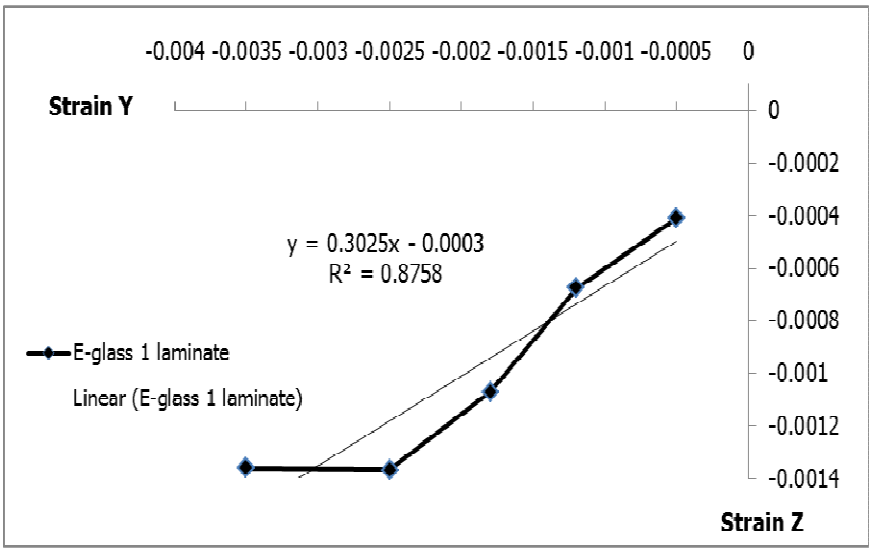
ขนาดความยาว 20.32 cm กว้าง 2.54 cm และหนา 0.617 cm ซึ่งมีระยะการยืดตัวในแกน X วัดด้านจากเครื่องทดสอบแรงดึง และระยะยุบในแนวแกน Y วัดด้วยไมโครมิเตอร์ มีค่าดังตารางที่ ค.1 โดยทำการวัดเมื่อ strain X ยืดไปทุกๆ 1% แล้ววัดค่าระยะแกน Y และนำมาคำนวณระยะที่เปลี่ยนไปในแนวแกน Z

ตารางที่ ค.1 ระยะที่เปลียนไปเนื่องจากแรงดึงของเส้นใยแก้วชั้นเดี่ยว (E-glass)

Extension X (cm)	**Strain X**	**Extension Y (cm)**	**Strain Y**	**Extension Z (cm)**	**Strain Z**
0.02032	0.0010	-0.00127	-0.00045	-0.000258	-0.00040
0.04064	0.0020	-0.00305	-0.001	-0.000425	-0.00070
0.06096	0.0030	0.00457	-0.0015	-0.000676	-0.00110
0.08128	0.0040	-0.00635	-0.0018	-0.000861	-0.00140
0.10160	0.0050	-0.00889	-0.0022	-0.000857	-0.00135



(a)



(b)

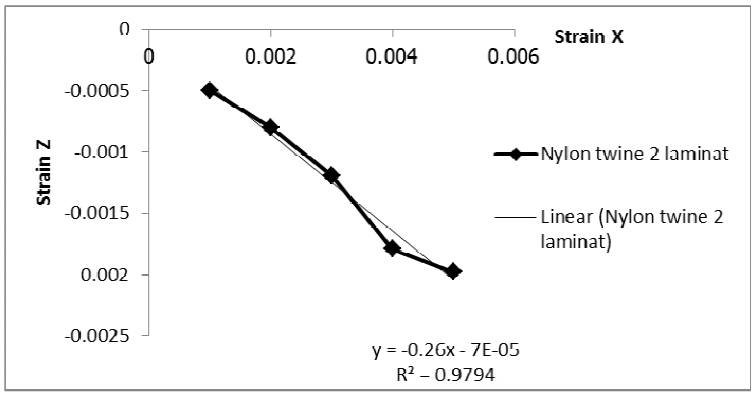
รูปที่ ค.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain Z กับ Strain X (a) และ Strain Z กับ Strain Y (b) ของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยแก้ว (E-glass) แบบชั้นเดี่ยว

- วัสดุผสมทำมาจากเส้นใยไนล่อน twine แบบลามิเนตจำนวน 2 ชั้น

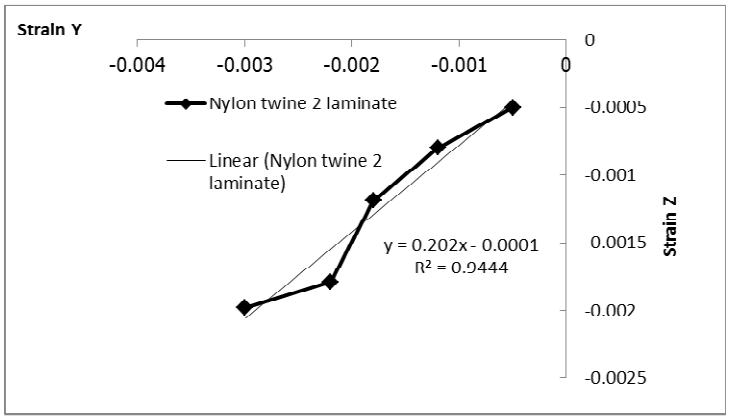
ขนาดความยาว 20.32 cm กว้าง 2.54 cm และหนา 0.563 cm ซึ่งมีระยะการยืดตัวในแกน X วัดด้านจากเครื่องทดสอบแรงดึง และระยะยุบในแนวแกน Y วัดด้วยไมโครมิเตอร์ มีค่าดังตารางที่ ค.2 โดยทำการวัดเมื่อ strain X ยืดไปทุกๆ 1% แล้ววัดค่าระยะแกน Y และนำมาคำนวณระยะที่เปลี่ยนไปในแนวแกน Z

ตารางที่ ค.2 ระยะที่เปลียนไปเนื่องจากแรงดึงของเส้นใยไนล่อน twine แบบลามิเนตจำนวน 2 ชั้น

Extension X (cm)	**Strain X**	**Extension Y (cm)**	**Strain Y**	**Extension Z (cm)**	**Strain Z**
0.02032	0.0010	-0.00127	-0.00050	-0.000281	-0.00050
0.04064	0.0020	-0.00305	-0.0010	-0.000448	-0.00080
0.06096	0.0030	-0.00457	-0.0016	-0.000672	-0.00119
0.08128	0.0040	-0.00559	-0.0021	-0.001006	-0.00179
0.10160	0.0050	-0.00762	-0.0023	-0.001153	-0.00198



(a)



(b)

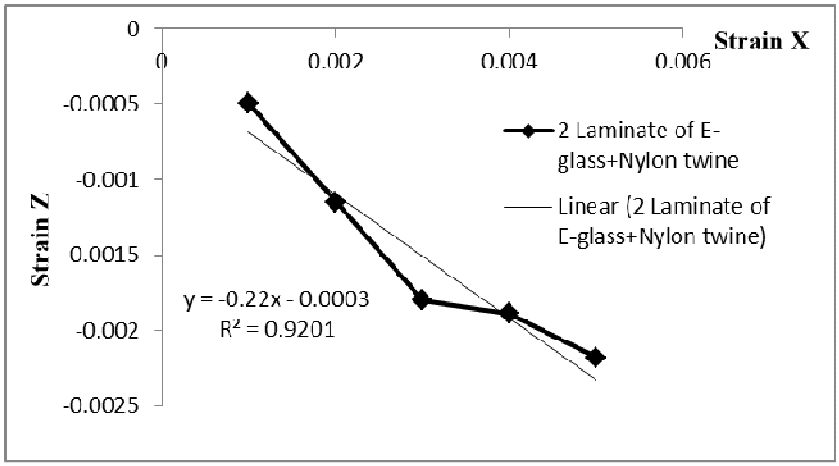
รูปที่ ค.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain Z กับ Strain X (a) และ Strain Z กับ Strain Y (b) ของวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยไนล่อน twine แบบลามิเนตจำนวน 2 ชั้น

- วัสดุผสมทำมาจากเส้นใย E-glass กับเส้นใยไนล่อน twine จำนวน 2 ชั้น

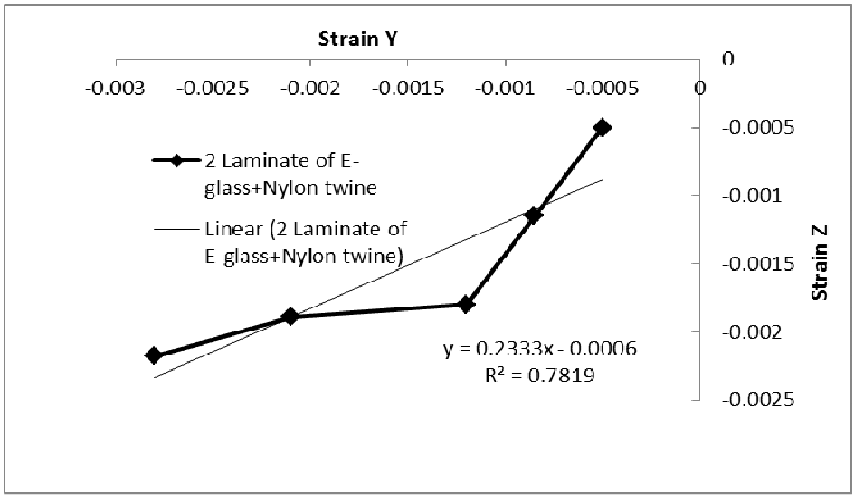
ขนาดความยาว 20.32 cm กว้าง 2.54 cm และหนา 1.08 cm ซึ่งมีระยะการยืดตัวในแกน X วัดด้านจากเครื่องทดสอบแรงดึง และระยะยุบในแนวแกน Y วัดด้วยไมโครมิเตอร์ มีค่าดังตารางที่ ค.3 โดยทำการวัดเมื่อ strain X ยืดไปทุกๆ 1% แล้ววัดค่าระยะแกน Y และนำมาคำนวณระยะที่เปลี่ยนไปในแนวแกน Z

ตารางที่ ค.3 ระยะที่เปลี่ยนไปเนื่องจากแรงดึงของเส้นใยไนล่อน twine แบบลามิเนตจำนวน 2 ชั้น

Extension X (cm)	Strain X	Extension Y (cm)	Strain Y	Extension Z (cm)	Strain Z
0.02032	0.0010	-0.00127	-0.0005	-0.00054	-0.00050
0.04064	0.0020	-0.00216	-0.0011	-0.00124	-0.00115
0.06096	0.0030	-0.00305	-0.0015	-0.00194	-0.00180
0.08128	0.0040	-0.00533	-0.0020	-0.00204	-0.00189
0.10160	0.0050	-0.00711	-0.0023	-0.00336	-0.00218



(a)



(b)

รูปที่ ค.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain Z กับ Strain X (a) และ Strain Z กับ Strain Y (b)วัสดุผสมทำมาจากเส้นใย E-glass กับเส้นใยไนล่อน twine จำนวน 2 ชั้น

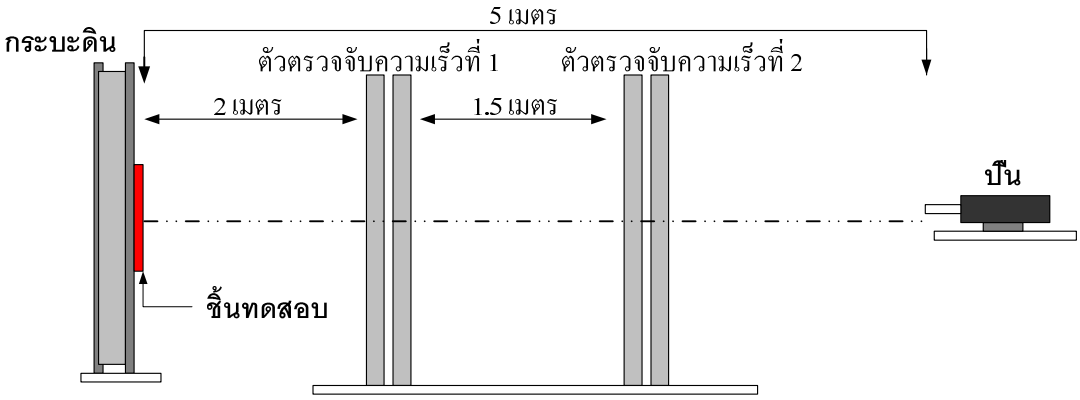
ตารางที่ ค.4 ค่าสมบัติทางกลที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี การทดสอบ และ% ค่าความคลาดเคลื่อน

Samples	ν_{yz}		**%error**	ν_{xz}		**%error**
	calculation	**testing**		**calculation**	**testing**	
E-glass	0.21	0.30	42.85	0.23	0.20	13.04
Nylon twine 2 laminate	0.17	0.20	17.64	0.24	0.26	8.33
2 Laminate of E-glass+Nylon twine	0.18	0.23	27.78	0.23	0.22	4.34

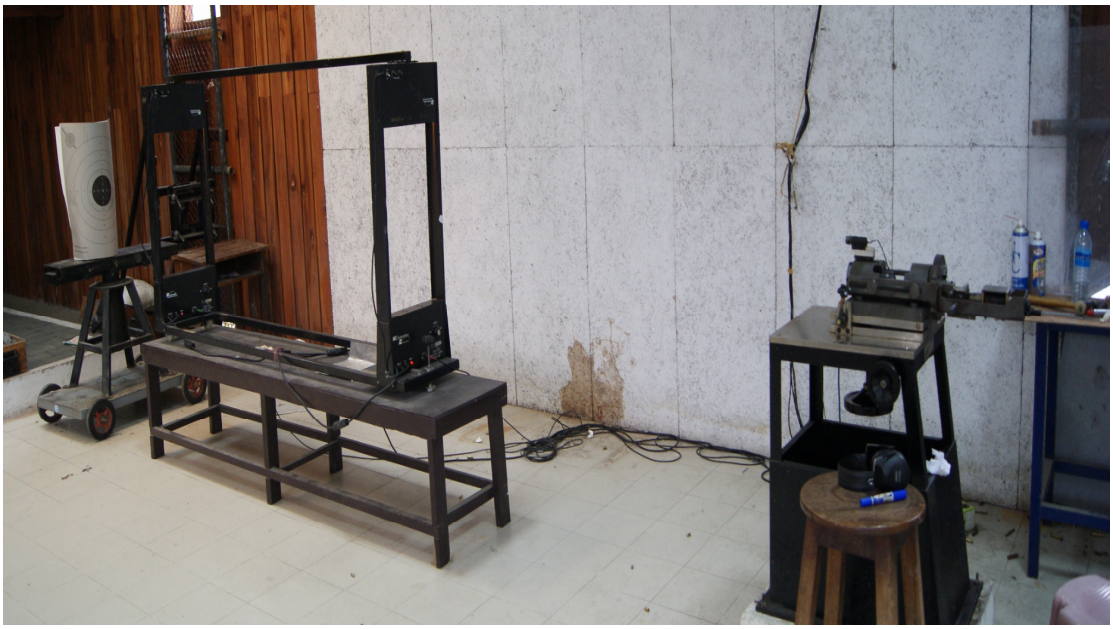
ภาคผนวก ง. การทดสอบการยิงด้วยกระสุนในระดับ 3A

1. การทดสอบการยิงด้วยกระสุนจริง

การทดสอบการยิงตัวปืนห่างจากชิ้นทดสอบและกระบะดินเป็นระยะห่าง 5 เมตร โดยมีตัวตรวจจับความเร็วกระสุนตัวที่ 1 (Start Sensor Set) ห่างจากตัวปืน 1.5 เมตร และอยู่ห่างจากตัวตรวจจับความเร็วกระสุนตัวที่ 2 (Stop Sensor Set) เป็นระยะ 1.5 เมตร แสดงดังรูปที่ ง.1 ซึ่งกระสุนที่ใช้ทดสอบกระสุน .44 Mag. น้ำหนักหัวกระสุน 240 gr (15.6 g) และความเร็ว 1400 f/s (436 m/s) ตามมาตรฐาน NIJ โดยทดสอบในระดับ 3A กระสุนจะต้องไม่ทะลุและมีรอยผิดรูปหรือรอยยุบตัวของดินไม่เกิน 44 มิลลิเมตร



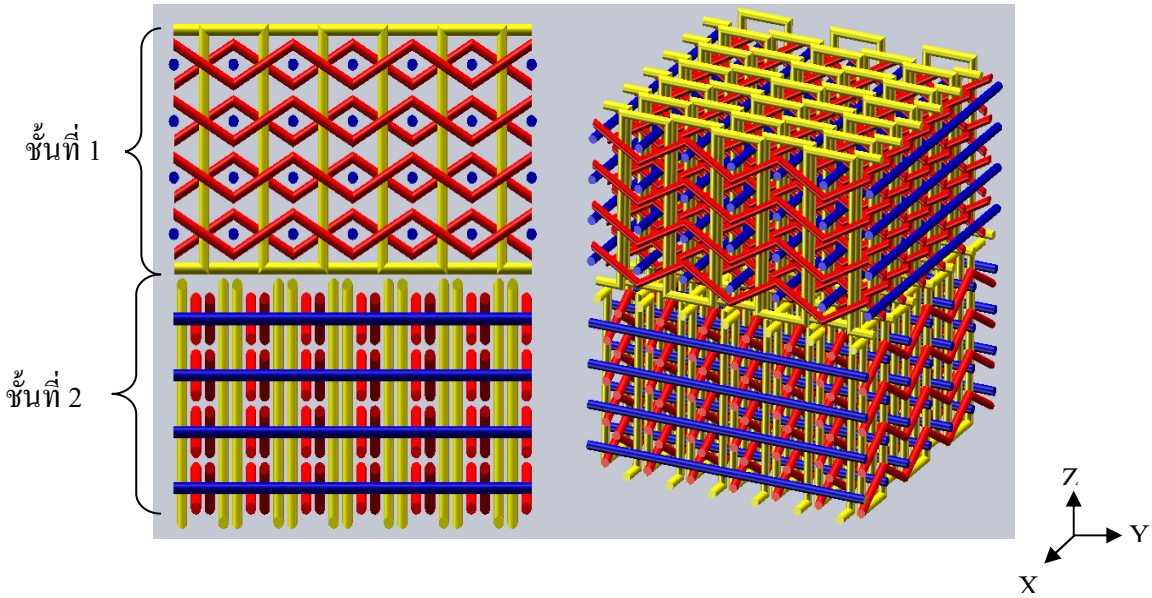
(NIJ STANDARD–0101.04)



รูปที่ ง.1 ชุดทดสอบการยิงด้วยกระสุนจริง

2. จัดเรียงชั้นเส้นใยและชั้นเส้นใยที่ขึ้นรูปเป็นวัสดุผสม

วัสดุเส้นใยที่มีสมบัติทนแรงดึงสูงมาทอขึ้นรูปเป็นผืนอย่างแน่นหนาและนำมาเรียงซ้อนกันเป็นชั้นๆ โดยแผ่นเส้นใยทอแบบ 3 มิติ แต่ละผืนจะวางสลับแนวกันให้เส้นใยทำมุม $[(0/90)_S]$ องศา ดังแสดงในรูปที่ ง.2 ซึ่งเส้นใยสีน้ำเงินเป็นเส้นใยตามแนวแกนตามยาว เส้นใยสีแดงเป็นเส้นใยตามแนวแกนตามขวาง และเส้นใยสีเหลืองเป็นเส้นใยตามแนวแกน Z เพื่อเพิ่มความแข็งแรง และความยืดหยุ่น (flexible) เมื่อกระสุนปืนพุ่งชนชิ้นทดสอบ พลังงานหรือแรงกระแทกของกระสุนปืนจะถูกดูดซับและกระจายออกไปตามแนวเส้นใยในชั้นต่างๆ เป็นผลให้หัวกระสุนสูญเสียพลังงานจนกระทั่งลูกกระสุนหยุดการเคลื่อนที่ในที่สุด และรูปแบบการจัดเรียงชั้นของเส้นใยทอแบบ 3-D orthogonal แสดงในรูปที่ ง.3



รูปที่ ง.2 รูปแบบการจัดเรียงชั้นของเส้นใยทอแบบ 3-D orthogonal $[(0/90)_2]$

แบบที่ 1 $[(0/90)_4]$

E-glass
E-glass
E-glass
E-glass

แบบที่ 2 $[(0/90)_5]$

Nylon twine
Nylon twine
Nylon twine
Nylon twine
Nylon twine

แบบที่ 3 $[(0/90_5)]$

Nylon twine
E-glass
Nylon twine
E-glass
Nylon twine

แบบที่ 4 $[(0/90)_5]$

E-glass
Nylon twine
Kevlar
Nylon twine
E-glass

รูปที่ ง.3 รูปแบบการจัดเรียงเส้นใยทั้ง 4 แบบ

3. ผลการทดสอบการยิง

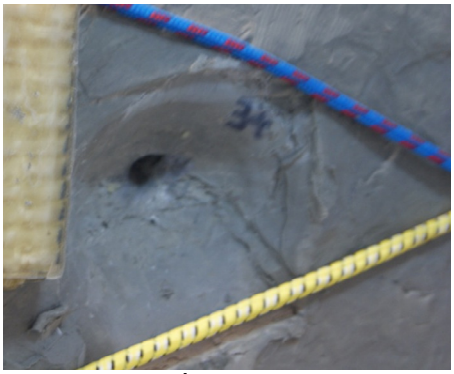
3.1 การทดสอบการยิงในระดับ 3A ชิ้นทดสอบขนาด 10x10 เซนติเมตร

ชิ้นทดสอบในการทดสอบการยิงในระดับ 3A ชุดที่ 1 ของชิ้นทดสอบทั้ง 4 แบบ พบว่า ชิ้นทดสอบแบบที่ 4 สามารถต้านทานการยิงในระดับ 3A ส่วนชิ้นทดสอบแบบที่ 1, 2 และ 3 ไม่สามารถต้านทานการยิงได้ รอยผิดรูปของดินของชิ้นทดสอบแบบที่ 1 และ4 สามารถวัดค่าได้ดังแสดงในตารางที่ ง.1 และลักษณะรอยยุบของดินแสดงดังรูปที่ ง.4 ซึ่งชิ้นทดสอบแบบที่ 1 ที่มีรอยทะลุเป็นรูเล็กๆเกิดจากการทะลุผ่านของเศษลูกกระสุน และสามารถวัดรอยบุ๋มได้ แสดงว่าชิ้นทดสอบสามารถต้านทานการยิงได้ในระดับหนึ่ง แต่อาจจะสามารถต้านทานการยิงได้เพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มจำนวนชั้นของเส้นใยในมากขึ้นกว่าเดิม

ตารางที่ ง.1 ผลการทดสอบการยิงของชั้นเส้นใยในรูปแบบต่างๆ

นัดที่	แบบชั้นของเส้นใย	น้ำหนักของชิ้นทดสอบ (kg)	ชนิดกระสุน	ความเร็วของกระสุน (m/s)	การทะลุ	รอยผิดรูป (ระยะยุบตัว) ของดิน (mm)
1	-	-	.44 Mag	441.15	-	ไม่ผ่าน
2	แบบที่ 1	0.27	.44 Mag	438.15	ทะลุ	35.3
3	แบบที่ 2	0.25	.44 Mag	470.12	ทะลุ	ไม่ผ่าน
4	แบบที่ 3	0.30	.44 Mag	472.80	ทะลุ	ไม่ผ่าน
5	แบบที่ 4	0.36	.44 Mag	441.80	ไม่ทะลุ	28.5

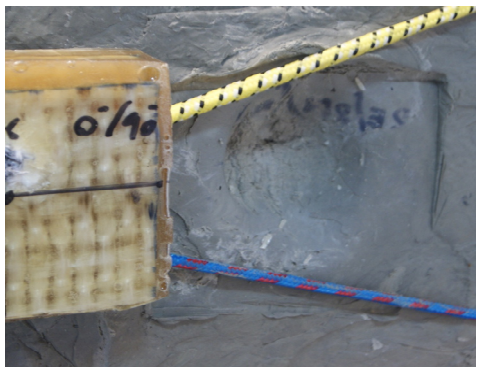
หมายเหตุ: รอยผิดรูป (ระยะยุบตัว) ของดินที่ไม่ผ่านเกิดจากกระสุนทะลุกระบะดินลึกมากและไม่ผ่านเกณฑ์



(แบบที่ 1)

(แบบที่ 2)

(แบบที่ 3)



(แบบที่ 4)

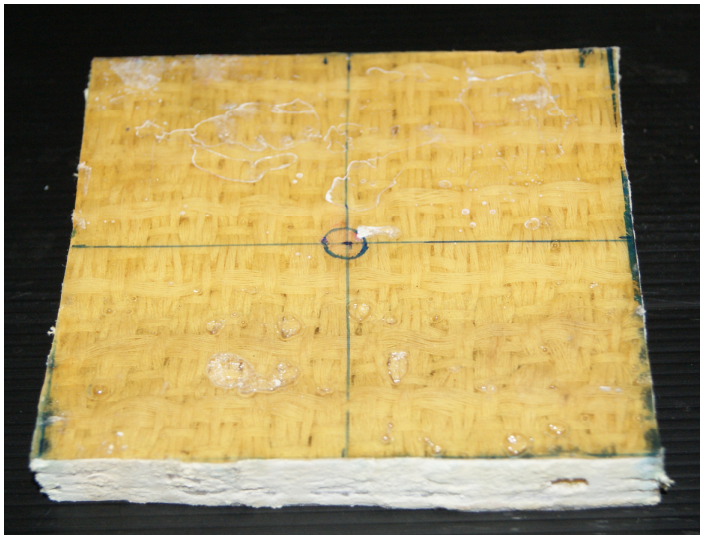
รูปที่ ง.4 รอยยุบของดินแบบที่ 1 แบบที่ 2 แบบที่ 3 และแบบที่ 4

จากตารางที่ ง.1 ความเร็วของกระสุนของชิ้นทดสอบแบบที่ 2 และแบบที่ 3 สูงกว่าชิ้นทดสอบแบบที่ 1 และแบบที่ 4 ซึ่งอาจทำให้ชิ้นทดสอบเกิดความเสียหายสูง แต่เมื่อสังเกตจากรูปที่ ง.4 ชิ้นทดสอบแบบที่ 1 กระสุนทะลุผ่าน แต่รอยบุ๋มของดินสามารถวัดค่าได้ ซึ่งมีความเร็วที่ต่ำกว่าชิ้นทดสอบแบบที่ 2 อยู่ประมาณ 32 m/s แต่รอยบุ๋มของดินของชิ้นทดสอบแบบที่ 2 มีความลึกมากกว่า 44 มิลลิเมตร เมื่อสังเกตจากกระบะดินแล้วจะเห็นได้ว่า ชิ้นทดสอบแบบที่ 2 และแบบที่ 3 ไม่สามารถต้านกระสุนได้เลย เพราะรูที่กระสุนออกไปปะทะกับกระบะดินมีความกว้างมาก ซึ่งต่างจากชิ้นทดสอบแบบที่ 1 ที่กระสุนไม่ทะลุผ่านชิ้นทดสอบโดยหัวกระสุนยังติดอยู่ด้านหลังชิ้นทดสอบทำให้เกิดรูขนาดเล็กที่กระบะดินมีความกว้างประมาณ 25 มิลลิเมตร ที่เกิดจากเศษสะเก็ดของกระสุน

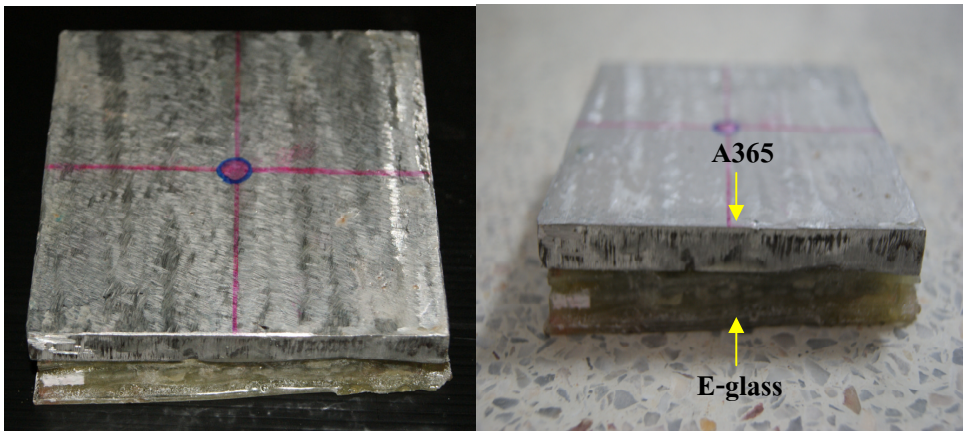
ชิ้นทดสอบในการทดสอบการยิงในระดับ 3A ชุดที่ 2 มีชิ้นทดสอบทั้งหมด 3 แบบ โดยชิ้นทดสอบมีขนาด 10x10 cm มีดังนี้ 1)แบบที่ 5 เป็นเส้นใย E-glass ทอแบบ 3-D orthogonal จัดเรียงซ้อนกัน 6 ชั้น ไม่ขึ้นรูปเป็นวัสดุผสม 2)แบบที่ 6 เป็นวัสดุผสมทำมาจากเส้นใยเคฟล่าทอแบบ 3-D orthogonal จัดเรียงซ้อนกัน 3 ชั้น และ3)แบบที่ 7 เป็นวัสดุผสมทำมาจาก

เส้นใย E-glass ทอแบบ 3-D orthogonal จัดเรียงซ้อนกัน 3 ชั้น มาประกบกับแผ่นอะลูมิเนียม (A356) โดยแผ่นอะลูมิเนียมมีความหนา 10 มิลลิเมตร ดังแสดงที่รูปที่ ง.5 ง.6 และง.7 ตามลำดับ ซึ่งแต่ละแผ่นจะวางสลับกันให้เส้นใยทำมุม $[(0/90)_s]$ องศา เช่นเดียวกับการทดสอบในชุดที่ 1

รูปที่ ง.5 เส้นใย E-glass จัดเรียงซ้อนกัน 6 ชั้น ไม่ขึ้นรูปเป็นวัสดุผสม
(เส้นใยทอแบบ 3-D orthogonal วางซ้อนกันเป็นชั้นๆ : แบบที่ 5)



รูปที่ ง.6 วัสดุผสมทำมาจากเส้นใยเคฟล่าจัดเรียงซ้อนกัน 3 ชั้น(แบบที่ 6)



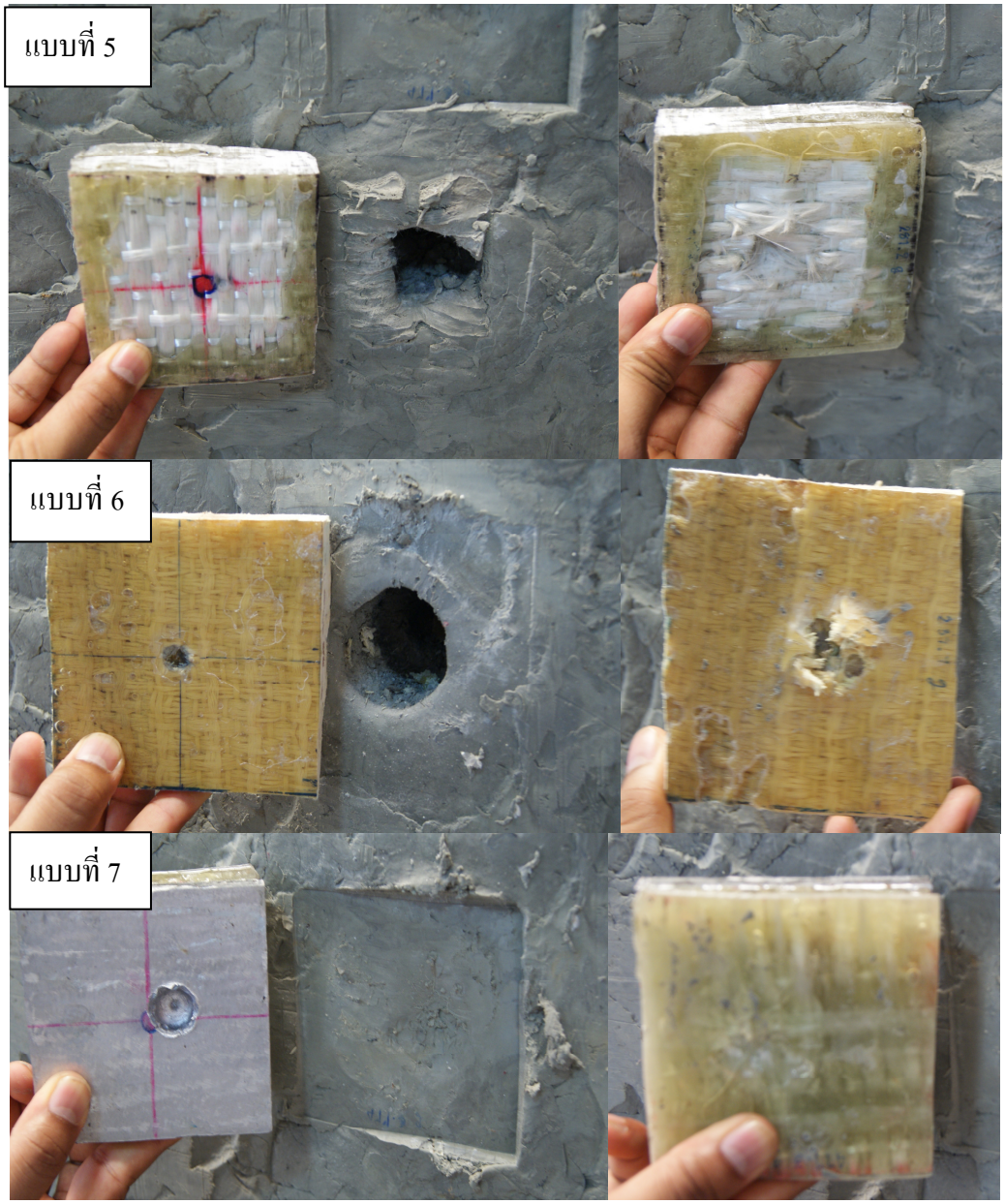
รูปที่ ง.7 วัสดุผสมทำมาจากเส้นใย E-glass จัดเรียงซ้อนกัน 3 ชั้น
มาประกบกับอะลูมิเนียม A356 (แบบที่ 7)

ผลการทดสอบการยิงของชิ้นทดสอบทั้ง 3 แบบ พบว่า แบบที่ 7 กระสุนยิงไม่ทะลุและไม่เกิดรอยผิดรูปของดิน แต่ชิ้นทดสอบแบบอื่นๆ กระสุนยิงทะลุ ดังแสดงผลการทดสอบในตารางที่ ง.2 และความเสียของรอยผิดรูปของดินดังแสดงรูปที่ ง.8 จากชิ้นทดสอบแบบที่ 1 จัดเรียงชั้นของเส้นใย E-glass ต้านทานการยิงได้ในระดับ เพื่อลดแรงปะทะของกระสุนที่มากระทำต่อเส้นใยโดยตรง จึงได้นำแผ่นอะลูมิเนียมมาประกบกับเส้นใย E-glass เพื่อศึกษาว่าชิ้นทดสอบสามารถต้านการยิงได้

ตารางที่ ง.2 ผลการทดสอบการยิงในระดับ 3A ที่ชิ้นทดสอบขนาด 10x10 เซนติเมตร

ชิ้นทดสอบ	**น้ำหนักของชิ้นทดสอบ (kg)**	**ชนิดกระสุน**	**ความเร็วของกระสุน (m/s)**	**การทะลุ**	**รอยผิดรูป (ระยะยุบตัว) ของดิน (mm)**
-	-	.44 Mag	441.15	-	ไม่ผ่าน
แบบที่ 5	0.28	.44 Mag	438.15	ทะลุ	ไม่ผ่าน
แบบที่ 6	0.24	.44 Mag	470.12	ทะลุ	ไม่ผ่าน
แบบที่ 7	0.48	.44 Mag	472.80	ไม่ทะลุ	0

ผลของชิ้นทดสอบแบบที่ 1 จัดเรียงชั้นของเส้นใย E-glass ต้านทานการยิงได้ในระดับ เพื่อลดแรงปะทะของกระสุนที่มากระทำต่อเส้นใยโดยตรง จึงได้นำแผ่นอะลูมิเนียมมาประกบกับเส้นใย E-glass เพื่อศึกษาว่าชิ้นทดสอบสามารถต้านการยิงได้ แต่ที่ไม่ได้เลือกแบบที่ 4 มาประกบกับแผ่นอะลูมิเนียม เนื่องจากจะต้องใช้เส้นใยเคฟล่ามีไม่พอสำหรับการทอและแบบที่ 4 สามารถต้านทานการยิงได้อยู่แล้ว ถ้ามาประกบกับแผ่นอะลูมิเนียมทำให้น้ำหนักของชิ้นทดสอบเพิ่มขึ้น ซึ่งแบบที่ 4 มีน้ำหนักมากกว่าแบบที่ 1 อยู่ประมาณ 25 % จึงไม่ได้เลือกมาศึกษา



รูปที่ ง.8 รอยยุบของดิน แบบที่ 5 แบบที่ 6 และแบบที่ 7

ชิ้นทดสอบในการทดสอบการยิงในระดับ 3A ชุดที่ 1 มีรอยความเสียหายของชิ้นทดสอบหลังการยิงทั้งด้านหน้าและด้านหลังของชิ้นทดสอบ ดังแสดงตารางที่ ง.3 พบว่าพื้นที่ความเสียหายบริเวณด้านหน้าของชิ้นทดสอบในแบบที่ 4 และแบบที่ 1 พื้นที่ความเสียหายมีค่าใกล้เคียงกัน ในส่วนพื้นความเสียหายบริเวณด้านหลังของชิ้นทดสอบ พบว่า แบบที่ 1 มีพื้นที่ความเสียหายน้อยที่สุด เนื่องมาจากชิ้นทดสอบเกิดการแยกชั้นของแผ่นเส้นใยและชิ้นทดสอบทะลุ จึงทำให้รอยเสียหายที่ด้านหลังเกิดขึ้นได้น้อย ซึ่งต่างจากแบบที่ 4 ที่ชิ้นทดสอบไม่ทะลุทำให้รอยพื้นที่ความเสียเกิดเป็นวงกว้างและมีค่ามากที่สุด ซึ่งแรงและพลังงานของกระสุนถูกกระจายไปตามเส้นใยที่อยู่ภายในชิ้นทดสอบ แต่เมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ความเสียหายบริเวณด้านหลังในแบบที่ 4 มีความเสียหายมากกว่าแบบที่ 1 อยู่ประมาณ 2 เท่า พบว่า ในแบบที่ 4 มีความสามารถต้านกระสุนในระดับ 3A ได้ดีที่สุด

ตารางที่ ง.3 รัศมีและพื้นที่ของรอยเสียหายที่เกิดขึ้นหลังการยิง ชุดที่ 1

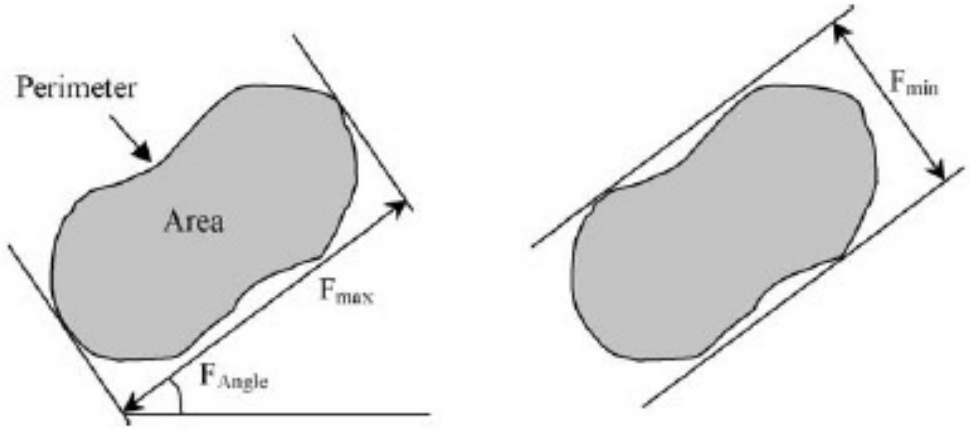
แบบชั้นของเส้นใย	รัศมี (cm)		พื้นที่ (cm^2)	
	ด้านหน้า	ด้านหลัง	ด้านหน้า	ด้านหลัง
แบบที่ 1	1.25	1.67	4.91	8.76
แบบที่ 2	1.70	2.11	9.08	13.99
แบบที่ 3	1.33	2.19	5.31	15.08
แบบที่ 4	1.23	2.48	4.75	19.32

ชิ้นทดสอบในการทดสอบการยิงในระดับ 3A ชุดที่ 2 มีรอยความเสียหายของชิ้นทดสอบหลังการยิงทั้งด้านหน้าและด้านหลังของชิ้นทดสอบ ดังแสดงตารางที่ ง.4 พบว่าชิ้นทดสอบแบบที่ 6 มีพื้นที่เสียหายด้านหน้าน้อยที่สุด ส่วนด้านหลังชิ้นทดสอบแบบที่ 7 ที่มีอะลูมิเนียม A356ประกบกับเส้นใย E-glass 3 ชั้น พื้นที่เสียหายมากที่สุดและมีค่ามากกว่าชิ้นทดสอบแบบอื่นๆ โดยเฉลี่ยประมาณ 36.27 %

ตารางที่ ง.4 รัศมีและพื้นที่ของรอยเสียหายที่เกิดขึ้นหลังการยิง ชุดที่ 2

แบบชั้นของเส้นใย	รัศมี (cm)		พื้นที่ (cm^2)	
	ด้านหน้า	ด้านหลัง	ด้านหน้า	ด้านหลัง
แบบที่ 5	1.35	1.85	5.73	10.75
แบบที่ 6	0.43	2.25	0.58	15.90
แบบที่ 7	1.10	2.58	3.80	20.91

การหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางหลัก (Major Feret diameter : F_{max}) กับเส้นผ่านศูนย์กลางรอง (Minor Feret diameter : F_{min}) แสดงในรูปที่ ง.9 อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางหลักกับเส้นผ่านศูนย์กลางรอง ดังสมการ 4.3



รูปที่ ง.9 ขนาดและการกำหนดทิศทางลักษณะของรอยความเสียหาย

$$\text{Feret Ratio} = F_{min} / F_{max} \tag{4.3}$$

ซึ่งค่า Feret ratio เป็นการวัดพื้นฐานสำหรับบริเวณที่เส้นใยเกิดการยืดตัวออก จะบ่งบอกถึงการเป็นไอโซทรอปิกของชิ้นทดสอบ เมื่อ Feret ratio มีค่าเข้าใกล้ 1 และถ้ามีค่าเป็น 0 แสดงว่าวัสดุมีความแข็งแรงและยืดตัวออกไปในทิศทางเดียว [L.M. Nunes et al. 2004] ดังแสดงในตารางที่ ง.5

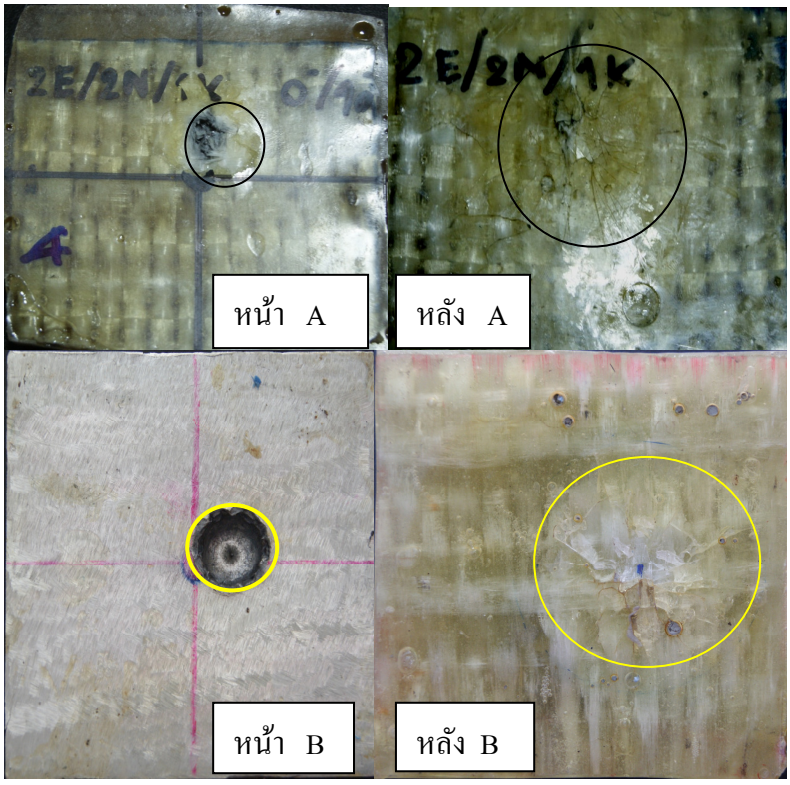
ตารางที่ ง.5 เส้นผ่านศูนย์กลางหลักกับเส้นผ่านศูนย์กลางรองและอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางหลักกับเส้นผ่านศูนย์กลางรอง (ด้านหน้า:FS และด้านหลัง:RS) ชิ้นทดสอบขนาด 10x10 เซนติเมตร

แบบชั้นของเส้นใย	F_{min} (cm)		F_{max} (cm)		Feret ratio	
	ด้านหน้า	ด้านหลัง	ด้านหน้า	ด้านหลัง	ด้านหน้า	ด้านหลัง
แบบที่ 1	1.63	2.98	2.03	3.51	0.81	0.85
แบบที่ 2	3.31	5.73	3.80	6.82	0.87	0.84
แบบที่ 3	2.66	5.49	2.83	5.56	0.94	0.99
แบบที่ 4	2.79	3.92	3.15	4.87	0.89	0.81
แบบที่ 5	0.86	3.93	0.88	4.93	0.97	0.88
แบบที่ 6	1.91	3.14	2.01	4.21	0.95	0.75
แบบที่ 7	2.20	5.29	2.20	5.47	1.00	0.97

ข้อมูลในตารางที่ ง.5 พบว่า ชิ้นทดสอบทั้งหมดเป็นไอโซทรอปิกและชิ้นทดสอบแบบที่ 3 และชิ้นทดสอบแบบที่ 7 ที่มีอะลูมิเนียม A356 ประกบกับเส้นใย E-glass เรียงซ้อนกัน 3 ชั้น มีความเป็นไอโซทรอปิกมากที่สุด ส่วนชิ้นทดสอบเส้นใยเคฟล่า เรียงซ้อนกัน 3 ชั้น มีความเป็นไอโซทรอปิกต่ำสุด ซึ่งความเป็นไอโซทรอปิกจะบอกความสามารถในการกระจายแรงและดูดซับพลังงานของชิ้นทดสอบไปในทุกทิศทาง และชิ้นทดสอบแบบที่ 7 มีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางหลักกับเส้นผ่านศูนย์กลางรองระหว่างด้านหน้าและด้านหลัง อยู่ประมาณ 3.45 % ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างน้อยกว่าแบบอื่น

3.2 เปรียบเทียบชิ้นทดสอบที่ยิงไม่ทะลุ ขนาด 10x10 เซนติเมตร

จากทดสอบการยิงชิ้นทดสอบที่ไม่ทะลุ คือ ชิ้นทดสอบแบบที่ 4 และแบบที่ 7 พบว่า ค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของชิ้นทดสอบแบบที่ 4 มีน้อยกว่าชิ้นทดสอบแบบที่ 7 อยู่ประมาณ 25 % และพื้นความเสียจากการยิงด้านหน้าชิ้นทดสอบแบบที่ 7 มีน้อยกว่าชิ้นชิ้นทดสอบแบบที่ 4 อยู่ประมาณ 20 % ส่วนด้านหลังชิ้นทดสอบแบบที่ 4 มีน้อยกว่าชิ้นทดสอบแบบที่ 7 อยู่ประมาณ 58 % ดังแสดงในตารางที่ ง.6 และรูปที่ ง.10



รูปที่ ง.10 รอยพื้นที่ความเสียหายด้านหน้าและด้านหลังของชิ้นทดสอบแบบที่ 4 (A) และชิ้นทดสอบแบบที่ 7 (B)

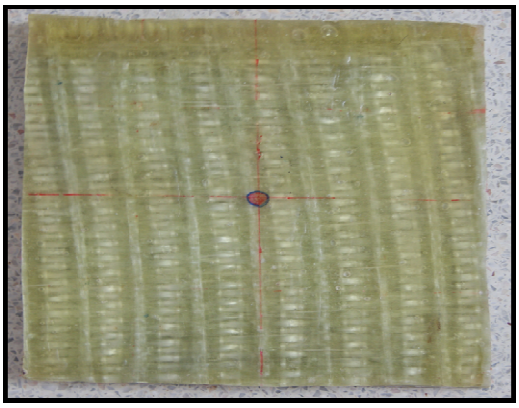
ตารางที่ ง.6 รัศมีและพื้นที่ของรอยเสียหายที่เกิดขึ้นหลังการยิงของชิ้นทดสอบที่ไม่ทะลุ

แบบชั้นของเส้นใย	รัศมี (cm)		พื้นที่ (cm^2)		ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ (kg/m^2)
	ด้านหน้า	ด้านหลัง	ด้านหน้า	ด้านหลัง	
แบบที่ 4	1.23	2.48	4.75	19.32	36
แบบที่ 7	1.10	2.58	3.80	20.91	48

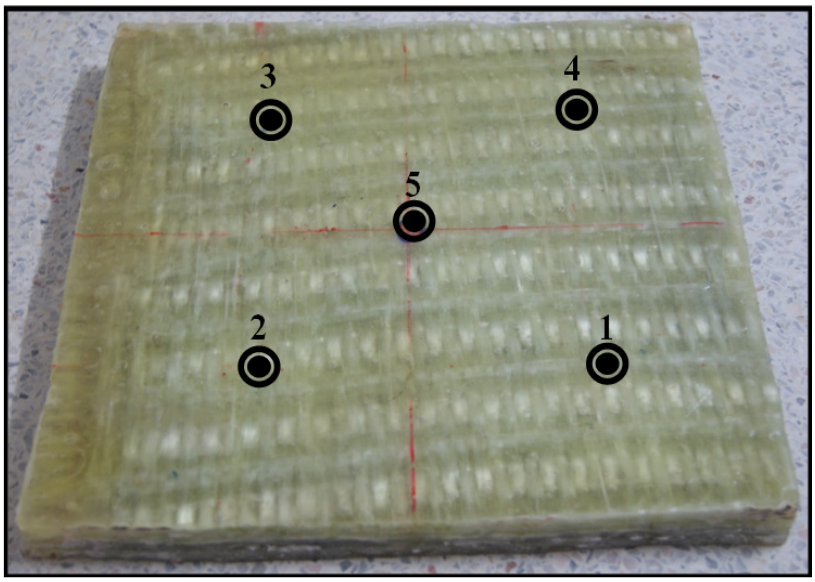
ชิ้นทดสอบที่ยิงไม่ทะลุในชิ้นทดสอบแบบที่ 4 จะมีน้ำหนักที่เบาและพื้นความเสียหายด้นหลังที่น้อยกว่าชิ้นทดสอบแบบที่ 7 และดูดซับพลังงานของลูกกระสุนที่มากระทำเท่ากับ 1522.46 J แต่สำหรับในการกระจายแรงชิ้นทดสอบแบบที่ 7 ดูดซับพลังงานของลูกกระสุนที่มากระทำเท่ากับ 1,737.72 J แต่ไม่เกิดรอยผิดรูปของดินต่างจากชิ้นทดสอบแบบที่ 4 ที่มีรอยผิดรูปของดิน เท่ากับ 28.5 มิลลิเมตร ถ้านำไปใช้งานสำหรับเสื้อเกราะกันกระสุนชิ้นทดสอบแบบที่ 7 จะส่งผลกระทบต้องผิวหนังมนุษย์น้อยกว่าชิ้นทดสอบแบบที่ 4 เพราะแรงที่มากระทำได้กระจายตัวไปบนชิ้นทดสอบจึงทำให้เกิดพื้นที่เสียหายที่กว้างกว่าชิ้นทดสอบแบบที่ 4 แต่ชิ้นทดสอบแบบที่ 7 มีน้ำหนักมาก อาจจะปรับลดน้ำหนักของชิ้นทดสอบโดยการลดขนาดความหนาของแผ่นอะลูมิเนียม A356 ที่มาประกบให้เหมาะสม และเพิ่มปริมาณชั้นเส้นใยมาทดแทน

3.3 การทดสอบการยิงในระดับ 3A ชิ้นทดสอบมีขนาด 12x12 นิ้ว

นำเส้นใย E-glass ทอแบบ 3D Orthogonal มาจัดเรียงกัน5 ชั้น มีความหนาประมาณ 2.45 เซนติเมตร แสดงในรูปที่ ง.11 มีน้ำหนักรวมทั้งหมด 2.58 กิโลกรัม และมีค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่ (Areal density) เท่ากับ 27.77 kg/m^2 ซึ่งทดสอบการยิงด้วยกระสุน .44 Mag จำนวน 5 นัด บนชิ้นทดสอบและกำหนดเป้าในการยิง ดังรูปที่ ง.12

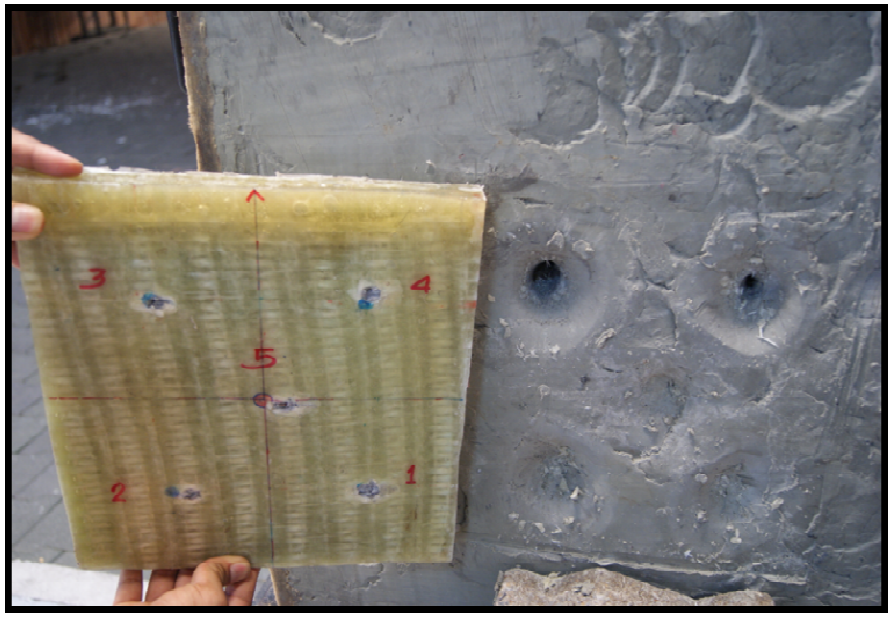


รูปที่ ง.11 เส้นใย E-glass ทอแบบ 3D Orthogonal มาจัดเรียงกัน 5 ชั้น

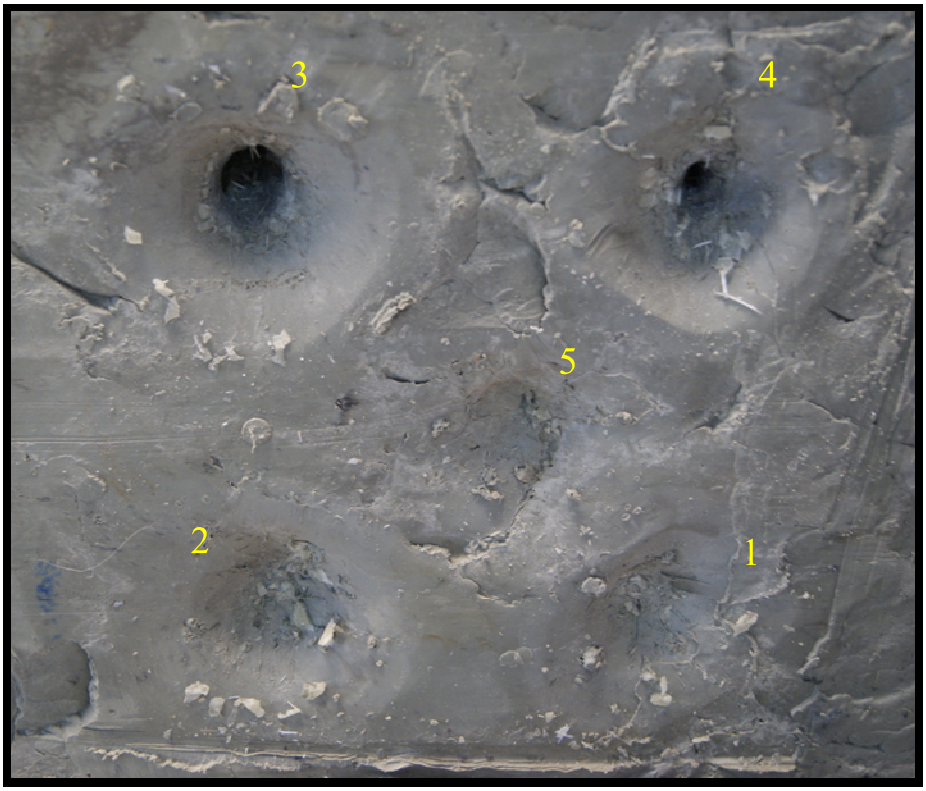


รูปที่ ง.12 กำหนดเป้ากระสุนที่จะยิงบนชิ้นทดสอบ

หลังจากทดสอบการยิงกระสุนที่ตำแหน่งที่ 1, 2 และ 5 กระสุนไม่ทะลุ แต่ตำแหน่งที่ 3 และ 4 เกิดการทะลุ ดังรูปที่ ง.13 และจากรูปที่ ง.14 สามารถวัดรอยบุ๋มลึกของดินที่กระสุนที่ไม่ทะลุและความเร็วของกระสุนในตารางที่ ง.7



รูปที่ ง.13 รอยการยิงบนชิ้นทดสอบและรอยบุ๋มบนกระบะดิน



รูปที่ ง.14 รอยผิดรูป (ระยะยุบตัว) ของดิน

รอยผิดรูปของดินในตารางที่ ง.7 ความเร็วของกระสุนเฉลี่ยเท่ากับ 438.58 เมตร/วินาที น้ำหนักลูกกระสุน 15.6 กรัม และพลังงานของกระสุนมีค่า เท่ากับ 1,500.35 J ตำแหน่งกระสุนนัดที่ 5 มีรอยผิดรูปของดินน้อยที่สุด รองลงมาเป็นตำแหน่งกระสุนนัดที่ 1 และ 2 แต่เมื่อเปรียบเทียบรอยผิดรูปของดินระหว่างตำแหน่งกระสุนนัดที่ 5 กับ 1 จะได้ว่านัดที่ 5 มีรอยผิดรูปน้อยกว่านัดที่ 1 อยู่ประมาณ 11.69 % เหตุผลที่ทำให้ตำแหน่งกระสุดนัดที่ 5 มีรอยผิดรูปของดินน้อยอาจเนื่องมาจากเป็นตำแหน่งตัวกลางของชิ้นทดสอบ ทำให้มีพื้นที่ในการกระจายแรงออกบริเวณด้านข้างได้มากกว่าตำแหน่งอื่นๆ ส่วนตำแหน่งกระสุนนัดที่ 3 และ 4 ที่กระสุนเจาะทะลุ แต่ตำแหน่งนัดที่ 4 กระสุนไม่ทะลุผ่านชิ้นทดสอบยังติดอยู่ที่ด้านหลังชิ้นทดสอบ เหตุผลที่ทำให้กระสุนทะลุผ่าน เพราะว่ากระบวนการทอเส้นใยด้วยมืออาจทำให้เกิดข้อพลาดได้ จึงทำให้มัดเส้นใยบางส่วนที่ทอสานกันไม่แน่นและเกิดช่องว่างระหว่างเส้นใยได้ และเนื่องจากเส้นใย E-glass ความเปราะ ซึ่งการทอในแต่ละครั้งมีพื้นที่การทอขนาด 1x2 ฟุต ซึ่งมีขนาดใหญ่เกินไปจึงทำให้เส้นใยบางส่วนเกิดการเสียดสีและตึงมากทำให้เกิดการขาดของเส้นใย และจากการขึ้นรูปเป็นวัสดุผสมอาจมีช่องว่างหรือฟองอากาศภายในชิ้นทดสอบซึ่งเกิดอยู่ระหว่างชั้นของเส้นใย

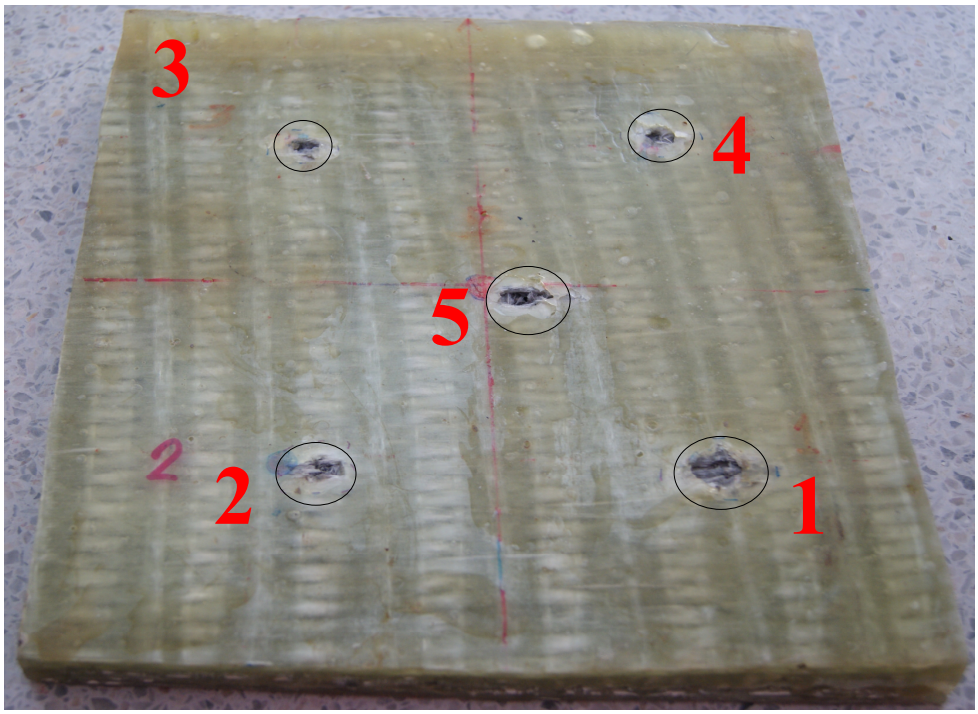
ตารางที่ ง.7 ผลการทดสอบการยิงในระดับ 3A ที่ชิ้นทดสอบขนาด 12x12 นิ้ว

นัดที่	ชนิดกระสุน	ความเร็วกระสุน (m/s)	การทะลุ	รอยผิดรูป (ระยะยุบตัว)ของดิน (mm)
1	.44 Mag	440.46	ไม่ทะลุ	16.30
2	.44 Mag	436.94	ไม่ทะลุ	19.30
3	.44 Mag	437.09	ทะลุ	ไม่ผ่าน
4	.44 Mag	439.20	ทะลุ	ไม่ผ่าน
5	.44 Mag	439.20	ไม่ทะลุ	14.35

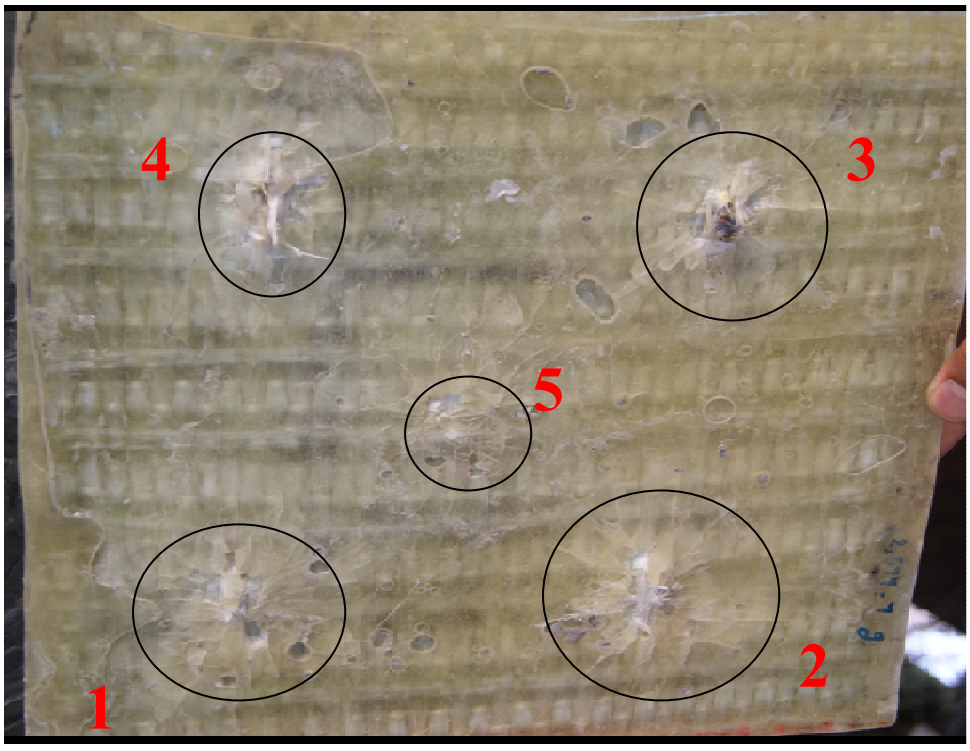
ตารางที่ ง.8 รัศมีและพื้นที่ของรอยเสียหายที่เกิดขึ้นหลังการยิง

นัดที่	รัศมี (cm)		พื้นที่ (cm^2)	
	ด้านหน้า	ด้านหลัง	ด้านหน้า	ด้านหลัง
1	1.61	2.97	8.14	27.71
2	1.32	3.34	5.47	35.05
3	1.34	2.73	5.64	23.41
4	1.38	2.80	5.98	24.63
5	1.53	1.98	7.35	12.32

ขนาดพื้นที่รอยเสียหายของชิ้นทดสอบด้านหน้าและด้านหลัง ดังแสดงในรูปที่ ง.15 และ ง.16 มีค่าดังตารางที่ ง.8 พบว่า ตำแหน่งกระสุนนัดที่ไม่ทะลุ คือ นัดที่ 5 มีพื้นที่ของรอยเสียหายด้านหลังน้อยที่สุด รองลงมาเป็นนัดที่ 1 และนัดที่ 2 ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ของรอยเสียหายด้านหลังของชิ้นทดสอบระหว่างนัดที่ 5 กับนัดที่ 1 จะเห็นว่านัดที่ 1 มีพื้นที่มากกว่านัดที่ 5 อยู่ประมาณ 55.54 % สำหรับการเปรียบเทียบพื้นที่ของรอยเสียหายด้านหลังของชิ้นทดสอบระหว่างนัดที่ 5 กับนัดที่ 2 จะเห็นว่านัดที่ 2 มีพื้นที่มากกว่านัดที่ 5 อยู่ประมาณ 64.85 % และชิ้นทดสอบสามารถต้านทานการยิงได้ 60 % จากจำนวนนัดกระสุนที่ยิงทั้งหมด



รูปที่ ง.16 รอยเสียหายจากการยิงที่ด้านหน้าของชิ้นทดสอบ



รูปที่ ง.17 รอยเสียหายจากการยิงที่ด้านหลังของชิ้นทดสอบ

ตารางที่ ง.9 พบว่า ชิ้นทดสอบทั้งหมดเป็นไอโซทรอปิกและนัดที่ 3 มีความเป็นไอโซทรอปิกมากที่สุด ส่วนนัดที่ 4 มีความเป็นไอโซทรอปิกต่ำสุด แต่นัดที่ 4 มีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางหลักกับเส้นผ่านศูนย์กลางรองระหว่างด้านหน้าและด้านหลัง อยู่ประมาณ 15.30 % ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างน้อยกว่าตำแหน่งอื่น

ตารางที่ ง.9 เส้นผ่านศูนย์กลางหลักกับเส้นผ่านศูนย์กลางรองและอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางหลักกับเส้นผ่านศูนย์กลางรอง (ด้านหน้า:FS และด้านหลัง:RS) ชิ้นทดสอบขนาด 12x12 นิ้ว

นัดที่	F_{min} (cm)		F_{max} (cm)		Feret ratio	
	ด้านหน้า	ด้านหลัง	ด้านหน้า	ด้านหลัง	ด้านหน้า	ด้านหลัง
1	2.60	5.93	3.73	6.82	0.70	0.87
2	1.98	5.60	2.93	6.48	0.68	0.86
3	2.20	5.60	3.02	5.95	0.73	0.94
4	2.15	4.22	3.30	5.48	0.65	0.77
5	2.23	3.40	3.53	3.97	0.63	0.86

จากตารางที่ ง.10 เป็นข้อมูล ขนาด น้ำหนัก และความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของชิ้นทดสอบในงานวิจัยนี้ กับแผ่นเกราะกันกระสุนที่จำหน่ายในต่างประเทศ จากตารางเมื่อนำค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่ (Areal density) ของชิ้นทดสอบที่กระสุนไม่ทะลุผ่านมาเปรียบเทียบกับแผ่นเกราะกันกระสุนที่มีจำหน่ายในต่างประเทศ ตามมาตราฐาน NIJ ที่ระดับ 3A โดยชิ้นทดสอบแบบ ENK, AE และ E5 เป็นชิ้นทดสอบในงานวิจัยนี้ ส่วนแผ่นกันกระสุนแบบ ST, S และ K เป็นแผ่นกันกระสุนที่จำหน่ายในต่างประเทศ เมื่อเปรียบเทียบกัน พบว่า ชิ้นทดสอบแบบ ENK และ AE มีค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่มากกว่าชิ้นทดสอบแบบ E5 แต่เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นกันกระสุนที่มีจำหน่ายในต่างประเทศ พบว่า ชิ้นทดสอบแบบ E5 ที่มีค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่น้อยกว่าแผ่นกันกระสุนแบบ ST อยู่ 6.71 % แต่ชิ้นทดสอบแบบ E5 มีค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่มากกว่าแผ่นกันกระสุนแบบ S และแบบ K อยู่ 53.96 % และ 75.43 % ตามลำดับ อย่างไรก็ตามชิ้นทดสอบแบบ E5 ที่ผลิตจากเส้นใย E- glass สามารถต้านทานการยิงได้ 60 % จากจำนวนนัดกระสุนที่ใช้ยิงทั้งหมด จากผลการทดสอบของชิ้นทดสอบแบบ E5 จะนำไปสู่การพัฒนาต่อไปในอนาคต โดยจะศึกษาในส่วนกระบวนการขึ้นรูปวัสดุผสมด้วยวิธีการใหม่ เพื่อช่วยในการลดน้ำหนักของชิ้นทดสอบ เนื่องจากน้ำหนักของชิ้นทดสอบมีค่ามากเมื่อเทียบกับเส้นใยชนิดอื่นๆ ที่ใช้ผลิตเป็นแผ่นกันกระสุน เช่น เส้นใย Spectra และเส้นใยเคฟล่า เป็นต้น

ตารางที่ ง.10 ขนาด น้ำหนัก และความหนาแน่นเชิงพื้นที่ ของชิ้นทดสอบในงานวิจัยนี้ กับแผ่นเกราะกันกระสุนที่จำหน่ายในต่างประเทศ

Type	material	Size (cm)	Weight (kg)	Areal density (kg/m^2)
ENK	E-glass+Nylon+Kevlar (5 layer)	10.0x10.0	0.36	36.0
AE	Alminium+E-glass (4 layer)	10.0x10.0	0.48	48.0
E5	E-glass (5 layer)	30.5x30.5	2.58	27.8
ST	Steel-Trauma	25.4x30.5	2.31	29.8
S	Spectra (UHMWPE)	30.5x40.6	1.59	12.8
K	Kevlar	43.2x30.5	0.90	6.83

ที่มา : http://www.pinnaclearmor.com/body-armor/plates/

http://www.laruetactical.com/backpack-shield.

http://www.specialforces.com/tactical-gear/armor-plate-carriers/s-t-r-i-k-e-cutaway-armor-3a-stv-nij-06-v-i-p-perfrmnc-3d