

**เปรียบเทียบความต้านทานการเจาะทะลุของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยทอสามมิติ
แบบออร์โธโกนอล**

**Puncture Resistance Comparison of Composites Reinforced with 3D-Orthogonal
Woven Fibers**

เจษฎาภรณ์ ชัยชนะ^{1*}, เจริญยุทธ เดชวายุกุล² และ วิริยะ ทองเรือง³

¹ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

^{2,3} ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่

จ.สงขลา 90112

* E-mail: thailand1233@hotmail.com, โทร. 083-1854978

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบชนิดของเส้นใยที่มีผลต่อความสามารถต้านทานการเจาะทะลุของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยทอสามมิติแบบออร์โธโกนอล เส้นใยที่ใช้ทอประกอบด้วยเส้นใยแก้ว เส้นใยไนลอนแบบเดี่ยว (Monofilament) เส้นใยไนลอนแบบมัด (Twine) และเส้นใยเคฟล่า (Kevlar brand fiber) ก่อนขึ้นรูปเป็นวัสดุผสมด้วยอีพอกซีซึ่งงานถูกทดสอบและเปรียบเทียบความต้านทานการเจาะทะลุโดยวิเคราะห์ผลของแรงสูงสุดในการต้านทานการเจาะทะลุ ค่าพลังงานกระแทกสูงสุด ความทนทานต่อการเปลี่ยนรูป จากผลการศึกษาพบว่า เส้นใยแก้วมีความสามารถต้านทานการเจาะทะลุได้ดีที่สุด อย่างไรก็ตามเส้นใยไนลอน (Twine) มีค่าพลังงานดูดซับจำเพาะกับค่าความสามารถต้านทานการเจาะทะลุจำเพาะได้ดีที่สุด

คำสำคัญ: เส้นใย, วัสดุผสม, การเจาะทะลุ, การทอ

Abstract

This research focuses to compare the fiber types on the puncture resistance of composites reinforced with Fibers. Four fibers of E-glass, nylon (Monofilament), nylon (Twine) and Kevlar brand fiber were used in this study. All fibers were woven to obtain the 3D-Orthogonal structure before forming the composite samples with epoxy resin. The samples were tested with the puncture resistance testing method and analyzed the maximum resisting force to puncture, maximum impact energy and stiffness. The result showed that the glass fiber has the best ability of puncture resistance. However nylon fiber (Twine) has the maximum specific energy absorption and specific puncture load.

Keywords: Fiber, Composites, Puncture resistance, weaving.

1. บทนำ

ในปัจจุบันได้มีการนำรูปแบบการทอสามแบบ 3 มิติ มาใช้ในงานอุตสาหกรรมสิ่งทอกันมากขึ้น เนื่องจากการทดสอบแล้วว่ารูปแบบการทอสามแบบ 3 มิติ มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีกว่ารูปแบบการทอสามแบบ 2 มิติ ซึ่งรูปแบบการทอสามแบบ 3 มิติ ที่มีการศึกษากันมากในงานวิจัยส่วนใหญ่ คือ รูปแบบการทอแบบ 3-D orthogonal weave และแบบ 3-D angle-interlock weave เพราะมีกระบวนการทอที่ไม่สลับ ซับซ้อนมากนัก และมีความสามารถในการรับแรงได้ดี โดยในส่วนของรูปแบบการทอแบบ 3-D orthogonal weave มีความสามารถในการรับแรงดึงได้ดี ทนทานต่อการเปลี่ยนรูปในการรับแรงดัดและแรงกระแทกได้ดี [1] ส่วนรูปแบบการทอแบบ 3-D angle-interlock weave มีความสามารถต้านทานต่อแรงเฉื่อย และสามารถยืดตัวในแนวแกนยาว (warp direction) ได้ดีกว่าในแนวแกนขวาง (weft direction) [2] ซึ่งได้มีการทดสอบการกระแทกวัสดุผสมในรูปแบบการทอแบบ 3-D orthogonal weave เปรียบเทียบการทอแบบ 2-D weave โดยศึกษาความเสียหายที่เกิดขึ้นในวัสดุและมาเปรียบเทียบโดยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ พบว่าผลของความเสียหายที่เกิดขึ้นอธิบายด้วยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ได้ว่าแบบ 3-D orthogonal weave มีความเสียหายน้อยกว่าการทอแบบ 2-D weave [3] และได้มีการทดสอบการยิงที่ strain rate ต่างๆ ของตัวอย่างที่ทอแบบ 3-D angle-interlock weave พบว่าเมื่อค่า strain rate เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความเค้นเพิ่มขึ้น [4] และจากงานวิจัยเบื้องต้น ได้ทำการศึกษาความสามารถต้านทานการเจาะทะลุของเส้นใยในโครงสร้างการทอแบบ 3-D orthogonal weave กับ 3-D angle-interlock weave [5] พบว่า วัสดุผสมโครงสร้างการทอแบบ 3-D orthogonal weave มีได้มากกว่าความสามารถต้านทานการเจาะทะลุได้มากกว่า 3-D orthogonal weave

งานวิจัยนี้ได้เลือกศึกษาโครงสร้างการทอในรูปแบบทอสามมิติแบบออร์โธโกนอล และเลือกเส้นใยที่จัดหาได้ง่ายในประเทศ (ไทย) ไม่มีข้อห้ามในการ

นำเข้า ราคาไม่แพง มาพัฒนาใช้ทดแทน โดยจะศึกษาถึงชนิดของเส้นใย ผลของโครงสร้างการทอ ความหนาที่มีผลต่อความต้านทานพลังงานกระแทกสูง (พุ่งชน) มาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

2. วัสดุและวิธีการทดลอง

2.1 ชนิดของเส้นใย

เส้นใยที่ทำการศึกษาเป็นเส้นใยชนิด เส้นใยในลอนและเส้นใยแก้วเป็นเส้นใยที่สามารถจัดหาได้ง่ายในประเทศและมีราคาถูก โดยเส้นใยที่เลือกใช้ในการศึกษาผลของโครงสร้างต่อความสามารถต้านทานการเจาะทะลุ มีดังนี้

1. เส้นใยแก้ว ชนิด E-glass แบบ Roving
2. เส้นใยในลอน แบบ twine No.210 D/2
3. เส้นใยในลอน แบบ monofilament No.15
4. เส้นใยเคฟล่า

นำเส้นใยชนิดต่างๆมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และพื้นที่หน้าตัดดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่หน้าตัด

ชนิดของเส้นใย	เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)	พื้นที่หน้าตัด (mm ²)
เส้นใยแก้ว (Roving)	1.860	2.717
เส้นใยในลอน (twine)	0.380	0.114
เส้นใยในลอน (monofilament)	0.160	0.020
เส้นใยเคฟล่า (Roving)	0.409	0.131

2.2 สารเคมี

1. อีพ็อกซี่ เกรด 850
2. ฮาร์ทอีพ็อกซี่ 982
3. ทินเนอร์ อีพ็อกซี่

2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องทอขึ้นรูปเส้นใย
2. เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM, Instron Model 8872)

2.4 วิธีการขึ้นรูป

ทำได้โดยการนำมัดเส้นใยชนิดต่างๆ มาทอขึ้นรูปแบบ 3-D orthogonal weave ด้วยเครื่องทอขึ้นรูป

เส้นใย หลังจากทอเสร็จแล้ว นำมาขึ้นรูปเป็นวัสดุผสมด้วยอีพ็อกซีเมทริกซ์ โดยวิธี Hand lay-up

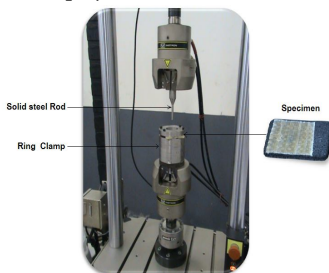
2.5 วิธีการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile test)

การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของเส้นใยแต่ละชนิด ตามมาตรฐาน ASTM D3822-01 โดยทดสอบการดึงจนขาด ที่ความเร็วในการดึง 30 มิลลิเมตรต่อนาที

2.6 วิธีการทดสอบ Puncture resistance test (ASTM D4833)

ชุดทดสอบ Puncture resistance test ประกอบด้วย ฐานจับยึดชิ้นทดสอบ (Ring Clamp) ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 มิลลิเมตร และหัวเจาะชิ้นทดสอบ (Solid steel Rod) ยาว 50 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 8 มิลลิเมตร ส่วนปลายของหัวเจาะถูก Chamfer ขนาด 0.8 มิลลิเมตร [6] ที่ความเร็วในการกระทำ 5,000 มิลลิเมตรต่อนาที

วิธีการทดสอบจะนำเส้นใยที่ขึ้นรูปเป็นวัสดุผสมเสร็จแล้ว มาตัดให้ได้ขนาด 60 x 60 มิลลิเมตร แล้วนำมาทดสอบกับชุดทดสอบ Puncture resistance test ที่ทำการติดตั้งบนเครื่อง Instron Model 8872 แสดงในรูปที่ 1 จากนั้นนำข้อมูลมาทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบแรงสูงสุด



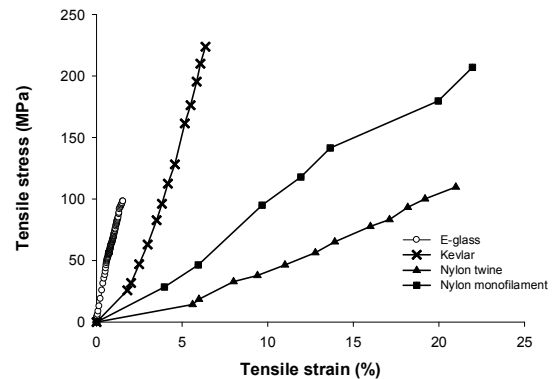
รูปที่ 1 ชุดทดสอบ Puncture resistance test ที่ติดตั้งบนเครื่อง Instron

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

3.1 การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile test)

จากการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของเส้นใยชนิดต่างๆ ดังแสดงผลการทดสอบในรูปที่ 2 ผล

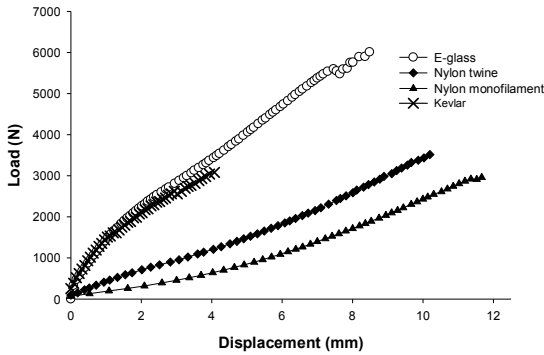
การทดสอบพบว่า ความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนรูป เขียนเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้ 1) เส้นใยแก้ว 2) เส้นใยเคฟล่า 3) เส้นใยไนลอน (Monofilament) และ 4) เส้นใยไนลอน (Twine) โดยเส้นใยทั้งหมดดังกล่าวมีค่ามอดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 0.614, 0.384, 0.095, และ 0.056 MPa ตามลำดับ เห็นได้ว่า เส้นใยแก้วมีค่าความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปมากที่สุด รองลงมาเป็นเส้นใยเคฟล่า ส่วนเส้นใยไนลอนทั้งสองแบบมีความสามารถในการยึดตัวได้ดีกว่าเส้นใยแก้ว และเส้นใยเคฟล่า ประมาณ 7 เท่า



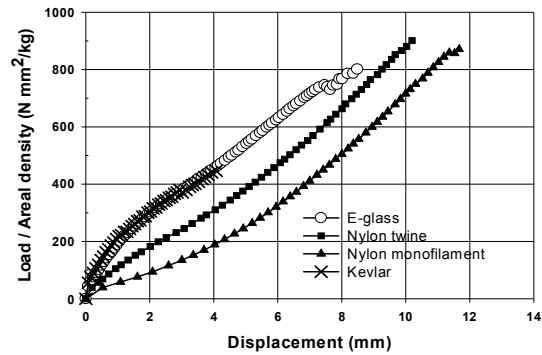
รูปที่ 2 การทดสอบ tensile test ของเส้นใยชนิดต่างๆ

3.2 การทดสอบความสามารถต้านทานการเจาะทะลุ (Puncture resistance test)

ผลการทดสอบความสามารถการต้านทานการเจาะทะลุของวัสดุผสมที่ทำมาจากเส้นใยชนิดต่างๆ ในรูปแบบการทอแบบ 3-D orthogonal weave ในรูปที่ 3 พบว่า ค่าแรงสูงสุดที่ชิ้นทดสอบสามารถรับได้ เขียนเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้ 1) เส้นใยแก้ว 2) เส้นใยไนลอน (Twine) 3) เส้นใยเคฟล่า และ 4) เส้นใยไนลอน (Monofilament) โดยเส้นใยทั้งหมดดังกล่าวมีค่าการรับแรงสูงสุดเท่ากับ 6,009.1, 3,515.4, 3,081.6 และ 2,898.1 นิวตัน ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเส้นใยแก้วให้ความสามารถต้านทานการเจาะทะลุได้ดีกว่าเส้นใยไนลอน (Twine) ประมาณ 70.94 % แต่เส้นใยไนลอน (Twine) มีความสามารถในการยึดตัวมากกว่าเส้นใยแก้วอยู่ประมาณ 2 เท่า



รูปที่ 3 กราฟแสดงการความสามารถการต้านทานการเจาะทะลุของวัสดุผสมที่ทำมาจากเส้นใยชนิดต่างๆ



รูปที่ 4 กราฟแสดงสัมพัทธ์ของแรงต่อความหนาแน่นเชิงพื้นที่ที่ระยะยืดต่างๆ

จากรูปที่ 4 แสดงสัมพัทธ์ของแรงต่อความหนาแน่นเชิงพื้นที่ (Areal Density) ซึ่งค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่หาได้จาก น้ำหนักของชิ้นทดสอบหารด้วยพื้นที่หน้าตัด ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 2 จากข้อมูลในรูปที่ 4 พบว่าที่ระยะยืดเท่ากับ 4 มิลลิเมตร ค่าแรง (Load) ต่อความหนาแน่นเชิงพื้นที่ เรียงตามลำดับได้ดังนี้ 1) เส้นใยแก้ว 2) เส้นใยเคพล่า 3) เส้นใยไนลอน (Twine) และ 4) เส้นใยไนลอน (Monofilament) มีเท่ากับ 469.0, 447.0, 350.0, และ 198.1 N m²/kg ตามลำดับ ซึ่งพบว่าค่าของเส้นใย E-glass และเส้นใย Kevlar มีค่าใกล้เคียงกันและมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ เส้นใยไนลอน (Twine) และเส้นใยไนลอน (Monofilament) มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งข้อมูลดังกล่าวบ่งบอกถึงความแข็งแรงและความต้านทานต่อการเจาะทะลุโดยที่เส้นใยแก้ว และเส้นใยเคพล่า มีความสามารถต้านทานต่อการเจาะทะลุที่ใกล้เคียงกันเนื่องมาจากเส้นใยทั้งสองชนิดมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับเส้นใยไนลอน (Twine) และเส้นใยไนลอน (Monofilament)

ตารางที่ 2 แสดงค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่

Sample	Areal density (kg/m ²)
E-glass	7.5
Nylon twine	3.9
Nylon monofilament	3.4
Kevlar	6.9

3.3 ค่าความต้านทานการเจาะทะลุจำเพาะ ค่าพลังงานดูดซับ และค่าพลังงานดูดซับจำเพาะ

ข้อมูลจากการทดสอบความสามารถต้านทานการเจาะทะลุของวัสดุผสมที่ทำมาจากเส้นใยชนิดต่างๆ เมื่อทำการทดสอบและนำผลมาคำนวณค่าความต้านทานการเจาะทะลุจำเพาะ (Specific Puncture Load) ซึ่งหาได้จากค่าแรงสูงสุดหารด้วยค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าวัสดุผสมที่ทำมาจากเส้นใยไนลอน (Twine) มีค่าความต้านทานการเจาะทะลุจำเพาะมากกว่าเส้นใยแก้ว ประมาณ 1.13 เท่า และมีค่ามากกว่าเส้นใยเคพล่า ประมาณ 2.02 เท่า

ตารางที่ 3 แสดงค่าความต้านทานการเจาะทะลุจำเพาะ

Sample	Specific absorb energy (J m ² /kg)
E-glass	3.3
Nylon twine	4.6
Nylon monofilament	4.3
Kevlar	0.9

จากข้อมูลในรูปที่ 3 สามารถนำมาคำนวณหาค่าพลังงานที่วัสดุผสมต่างๆ ได้ดูดซับก่อนจะทำให้วัสดุผสมเสียหาย (หาได้จากพื้นที่ใต้กราฟ) แสดงในตารางที่ 4 และมาคำนวณค่าพลังงานดูดซับจำเพาะ (Specific Absorb Energy) ซึ่งหาได้จาก ค่าพลังงาน

ดูดซับหารด้วยค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 5 แล้วนำมาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานดูดซับจำเพาะกับค่าความสามารถต้านทานการเจาะทะลุจำเพาะในรูปที่ 5

ตารางที่ 4 แสดงค่าพลังงานดูดซับของชิ้นทดสอบที่เกิดในการทดสอบความสามารถต้านทานการเจาะทะลุ

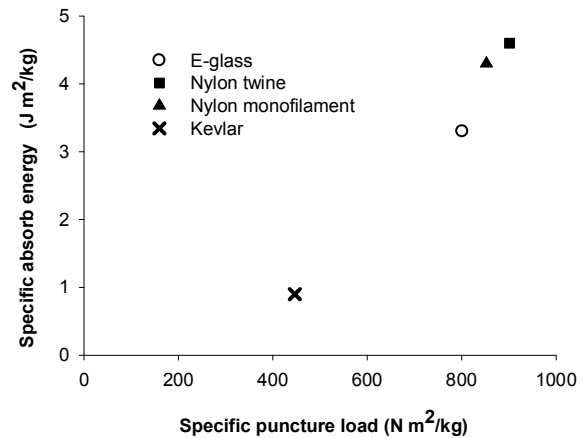
ชนิดของชิ้นทดสอบ	พลังงานดูดซับ (J)
E-glass	24.65
Nylon twine	17.81
Nylon monofilament	14.48
Kevlar	6.53

จากตารางที่ 4 พบว่า ค่าพลังงานที่ดูดซับก่อนทำให้เกิดความเสียหายต่อวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วมีค่าพลังงานดูดซับที่เกิดในการทดสอบความสามารถต้านทานการเจาะทะลุมีค่ามากกว่าเส้นใยไนลอน (Twine) ประมาณ 1.38 เท่า และมากกว่าเส้นใยเคฟล่าประมาณ 3.77 เท่า ซึ่งเห็นได้ว่าเส้นใยแก้วมีค่าพลังงานดูดซับมากที่สุด

ตารางที่ 5 แสดงค่าพลังงานดูดซับจำเพาะ

Sample	Specific absorb energy (J m ² /kg)
E-glass	3.3
Nylon twine	4.6
Nylon monofilament	4.3
Kevlar	0.9

จากตารางที่ 5 จากค่าพลังงานดูดซับเส้นใยแก้วมีค่ามากที่สุด แต่เมื่อมาศึกษาพลังงานดูดซับจำเพาะ (Specific absorb energy) พบว่า วัสดุผสมที่ทำมาจากเส้นใยไนลอน (Twine) มีค่าพลังงานดูดซับจำเพาะมากกว่าเส้นใยแก้วอยู่ 28.26 % และมีค่ามากกว่าเส้นใยเคฟล่าอยู่ 80.43 % เนื่องจากเส้นใยไนลอนมีค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่ต่ำ



รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานดูดซับจำเพาะกับค่าความสามารถต้านทานการเจาะทะลุของวัสดุผสมที่ทำมาจากเส้นใยชนิดต่างๆ

จากรูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานดูดซับจำเพาะกับค่าความสามารถต้านทานการเจาะทะลุจำเพาะ พบว่า วัสดุผสมที่ทำมาจากเส้นใยไนลอน (Twine) มีค่าพลังงานดูดซับจำเพาะ เท่ากับ 4.6 Jm²/kg และค่าความสามารถต้านทานการเจาะทะลุจำเพาะ เท่ากับ 901.4 N m²/kg ซึ่งมีค่าสูงที่สุด รองลงมาเป็นเส้นใยไนลอน (Monofilament) มีค่าพลังงานดูดซับจำเพาะ เท่ากับ 4.3 Jm²/kg และค่าความสามารถต้านทานการเจาะทะลุจำเพาะ เท่ากับ 852.4 N m²/kg

สรุปผลการทดลอง

1. การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงพบว่าเส้นใยแก้วมีค่าความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปมากมากที่สุด ส่วนเส้นใยไนลอนทั้งสองแบบมีความสามารถในการยืดตัวได้ดีกว่าเส้นใยแก้ว และเส้นใยเคฟล่า อยู่ประมาณ 7 เท่า

2. จากการทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุ พบว่า วัสดุผสมที่ทำมาจากเส้นใยแก้วมีค่ามากกว่าเส้นใยไนลอน (Twine) ประมาณ 70.94 %

3. วัสดุผสมที่ทำมาจากเส้นใยแก้วมีค่าพลังงานดูดซับที่เกิดในการทดสอบความสามารถต้านทานการเจาะทะลุมีค่ามากกว่าเส้นใยไนลอน (Twine) ประมาณ 38.41 %

4. วัสดุผสมทำมาจากเส้นใยไพล่อน Twine มีค่าพลังงานดูดซับจำเพาะสูงกว่าเส้นใยแก้ว ประมาณ 39.39 % และค่าความสามารถต้านทานการเจาะทะลุจำเพาะสูงกว่าเส้นใยแก้ว ประมาณ 12.51 %

จากทดสอบค่าต่างๆ พบว่า เส้นใยแก้วมีความสามารถต้านทานการเจาะทะลุได้ดีที่สุด และเส้นใยไพล่อน (Twine) มีค่าพลังงานดูดซับจำเพาะกับค่าความสามารถต้านทานการเจาะทะลุจำเพาะได้ดีที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ทำงานวิจัยนี้ ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยจากรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ และอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

เอกสารอ้างอิง

- [1] Chen X, Spola M, Gisbert Paya J, and Mollst Sellabona P, An experimental investigation into the structure and mechanical properties of multi-layer and angle-interlock woven structures, *J Text Inst*, 90 (1999) 91
- [2] Chen X and Zanini I, An experimental investigation into the structure and mechanical properties of 3D woven orthogonal structures, *J Text Inst*, 88 (1997) 449.
- [3] Changgan, Ji., Baozhong, Sun., Yiping, Qiu., and Bohong, Gu. Impact Damage of 3D Orthogonal Woven Composite Circular Plates, *Springer Science, October 2007, pp. 343–362*
- [4] Baozhong Sun ., Dongmei Hu., and Xin Ding. Compressive behavior of 3-D angle-interlock woven fabric composites at various strain rates, *Polymer Testing 24 (2005), pp. 447–454*
- [5] เจษฎาภรณ์ ชัยชนะ, เจริญยุทธ เดชวายุกุล และ วิริยะ ทองเรือง (2553). ผลของชนิดเส้นใยและโครงสร้างการทอต่อความสามารถต้านทานการเจาะทะลุ, *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 8, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา*
- [6] S.J. Russell, A. Pourmohammadi, I. Ezra and M. Jacobs, Formation and properties of fluid jet

entangled HMPE impact resistant fabrics, *Composites Science and Technology*, 65, 2005, 899–907.