

รหัสโครงการ SUT7-710-46-12-36



รายงานการวิจัย

การใช้เส้นใยจากตัวไหมเป็นวัสดุเสริมแรงสำหรับ
วัสดุเชิงประกอบอีพอกซี
(Silkworm Fiber for Reinforcing Epoxy Composite)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การใช้เส้นใยจากตัวไหมเป็นวัสดุเสริมแรงสำหรับ
วัสดุเชิงประกอบอีพอกซี
(Silkworm Fiber for Reinforcing Epoxy Composite)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิมลลักษณ์ สุตะพันธ์

สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2546

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

ตุลาคม 2549

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยเรื่อง การใช้เส้นใยจากตัวไหมเป็นวัสดุเสริมแรงสำหรับวัสดุเชิงประกอบอีพอกซี ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2546 ผู้วิจัยขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณคุณแม่บุญช่วย สุตะพันธ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์เส้นไหมพันธุ์นางน้วย นักศึกษาปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่เป็นผู้ช่วยวิจัยของโครงการนี้ได้แก่ นายบุญมา กาวาฬ นายสรายุทธ เต็มนาค นายเหมราช แสงสว่าง นายประโดม รสสุพล นายสุริยา เขียวอ่อน นายแสวงหวิ วงศ์กระโซ่ นายนเรน พิลาเทศ นายเดชสิทธิ์ กิตติเลิศกุล นายคณัย รัตนสกุลกาญจน์ นางสาวจิรวดี อุลหัสสา และนางสาวศรียรัตน์ พิชัยกรศิลป์ และนักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี คือ นายจตุพร ศรีดี และ นายจงรัก กลิ่งสำโรงที่ได้ให้ความช่วยเหลือด้านอื่น ๆ แก่โครงการวิจัย โครงการนี้ไม่สามารถเกิดขึ้นได้หากไม่ได้รับความคิดริเริ่มจาก รศ.ดร. จรัสศรี ลอประยูร จึงใคร่ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์มา ณ ที่นี้

บทคัดย่อ

วัสดุเชิงประกอบระหว่างอีพอกซีและเส้นไหมสั้นถูกเตรียมที่ปริมาณเส้นไหม 1, 2, 4, 6, และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก. วัสดุเชิงประกอบระหว่างอีพอกซีและเส้นไหมแบบต่อเนื่องถูกเตรียมที่ปริมาณเส้นไหม 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เส้นไหมสั้นมีขนาดความยาวประมาณ 1 เซนติเมตรและอัตราส่วนระหว่างความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 40 เส้นไหมแบบต่อเนื่องมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.3 มิลลิเมตร เมื่อปริมาณเส้นไหมสั้นเพิ่มขึ้นค่า flexural strength, strain at break, และ impact strength ของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีลดลง แต่ flexural strength เปลี่ยนแปลงโดยไม่มีนัยสำคัญ ปริมาณการดูดน้ำของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นไหมสั้นเพิ่มขึ้น การปรับสภาพพื้นผิวเส้นไหมสั้นด้วย 3-อามิโนโพรพิลไตรเอทอกรีไซเลนไม่มีประสิทธิภาพต่อการปรับปรุงสมบัติทางกลและความทนทานต่อการดูดน้ำ ถ้าใช้เส้นไหมแบบต่อเนื่องที่จัดเรียงในทิศทางเดียววัสดุเชิงประกอบอีพอกซีมี flexural strength และ impact strength สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมสั้น ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อเส้นไหมถูกขึงตั้งอย่างเป็นระเบียบจะทำให้ impact strength มีค่าเพิ่มขึ้นอีก การทำความสะอาดเส้นไหมแบบต่อเนื่องด้วยเอทานอลหรือการทำความสะอาดด้วยเอทานอลแล้วต่อด้วยการปรับสภาพพื้นผิวด้วย 3-อามิโนโพรพิลไตรเอทอกรีไซเลนไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซี

Abstract

Short silk-epoxy composites were prepared with fiber loading of 1, 2, 4, 6, and 8 wt%. Continuous silk-epoxy composite was also prepared at 1 wt% of fibers. The short silk was about 1 cm. in length with an aspect ratio of 40 and the continuous silk was about 0.3 mm. in diameter. With increasing the short silk contents, flexural strength, strain at break, and impact strength decreased but flexural modulus insignificantly changed. In addition, water absorption increased with increasing the silk content. The treatment of short silk with 3-aminopropyltriethoxysilane (APS) did not effectively improve mechanical properties and water resistance of the epoxy composite. If the continuous fiber with unidirectional orientation was used, the epoxy composite had higher flexural strength and impact strength than those of the short silk-epoxy composite. Moreover, impact strength of that epoxy composite was further improved when continuous silk was well stretched in unidirection. Either cleaning the continuous silk with ethanol or cleaning with ethanol and then APS treatment has no significant effect on the mechanical properties of the composites.

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| กิตติกรรมประกาศ..... | ก |
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ข |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | ค |
| สารบัญ..... | ง |
| สารบัญตาราง..... | ฉ |
| สารบัญรูปภาพ..... | ช |
| บทที่ 1 บทนำ | |
| 1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย และการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย..... | 3 |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... | 3 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 3 |
| บทที่ 2 วิธีดำเนินการวิจัย | |
| 2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง..... | 4 |
| 2.2 การเตรียมเส้นไหม..... | 4 |
| 2.2.1 การเตรียมเส้นไหมแบบสั้น (Short Silk)..... | 4 |
| 2.2.2 การเตรียมเส้นไหมแบบต่อเนื่อง (Continuous Silk)..... | 4 |
| 2.2.3 การปรับสภาพพื้นผิวเส้นไหมด้วยสารประสานไซเลน..... | 4 |
| 2.3 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหม..... | 5 |
| 2.3.1 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมแบบสั้นที่เรียงตัวไม่เป็นระเบียบ..... | 5 |
| 2.3.2 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมแบบต่อเนื่องที่เรียงตัวเป็นระเบียบ..... | 5 |
| 2.3.3 การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมด้วยวิธีลามิเนตด้วยมือ..... | 5 |
| 2.4 การทดสอบสมบัติของเส้นไหมและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหม..... | 6 |
| 2.4.1 การวัดขนาดของเส้นไหม..... | 6 |
| 2.4.2 การทดสอบความทนต่อแรงดึง (Tensile Test) ของเส้นไหม..... | 6 |
| 2.4.3 การทดสอบสมบัติทางความร้อนและการตรวจสอบปริมาณความชื้นของเส้นไหม..... | 6 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 2.4.4 การทดสอบความทนต่อแรงดัด (Flexural Test) ของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซี | 6 |
| 2.4.5 การทดสอบความทนต่อแรงกระแทก (Impact Test) ของวัสดุเชิงประกอบ อีพอกซี..... | 6 |
| 2.4.6 การทดสอบการดูดน้ำของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซี | 6 |
| 2.4.7 การตรวจสอบความสามารถในการยึดติดระหว่างพื้นผิวของเส้นไหมและ อีพอกซีเรซิน | 6 |
| บทที่ 3 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง | |
| 3.1 สมบัติทางกายภาพของเส้นไหม | 7 |
| 3.1.1 ขนาดของเส้นไหม..... | 7 |
| 3.1.2 ความทนต่อแรงดึงของเส้นไหม | 7 |
| 3.1.3 สมบัติทางความร้อนและปริมาณความชื้นของเส้นไหม | 8 |
| 3.2 สมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหม..... | 10 |
| 3.2.1 ผลของปริมาณเส้นไหมแบบสั้นที่เรียงตัวไม่เป็นระเบียบต่อสมบัติทางกล ของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซี | 10 |
| 3.2.2 ผลของความยาวและการเรียงตัวของเส้นไหมต่อสมบัติทางกลของวัสดุเชิง ประกอบอีพอกซีจากเส้นไหม | 13 |
| 3.2.3 ผลของการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นไหมแบบต่อเนื่องเรียงตัวแบบ Well- Stretched Unidirection ต่อสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซี..... | 16 |
| 3.3 ปริมาณการดูดความน้ำของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมแบบสั้นที่เรียงตัว แบบไม่เป็นระเบียบ | 19 |
| 3.4 การยึดติดระหว่างพื้นผิวของเส้นไหมและอีพอกซีเรซิน | 20 |
| บทที่ 4 บทสรุป | |
| 4.1 สรุปผลการวิจัย..... | 22 |
| 4.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการวิจัยขั้นต่อไป | 23 |
| บรรณานุกรม..... | 24 |
| ประวัติผู้วิจัย..... | 26 |

สารบัญตาราง

| ตาราง | หน้า |
|--|------|
| 3.1 ขนาดของเส้นไหมแบบสั้นและแบบต่อเนื่อง | 7 |
| 3.2 ค่าความทนต่อแรงดึงของเส้นไหม..... | 8 |

สารบัญรูปลูกภาพ

| รูปลูกภาพ | หน้า |
|--|------|
| 3.1 กราฟ TGA (a) และ DTGA (b) ของเส้นไหมที่ไม่ผ่านการทำความสะอาดด้วยเอทานอล (uncleaned silk) เส้นไหมที่ผ่านการทำความสะอาดด้วยเอทานอลเป็นเวลา 3 และ 5 ชั่วโมง (3hr- and 5hr-cleaned silk) และเส้นไหมที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วย 3-อมีโน โพรพิล ไตรเอทอกซีไซเลน (EtAPS-treated silk) | 9 |
| 3.2 กราฟระหว่าง flexural modulus และ ปริมาณเส้นไหมของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมแบบสั้นที่เรียงตัวไม่เป็นระเบียบ | 11 |
| 3.3 กราฟระหว่าง strain at break และ ปริมาณเส้นไหมของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมแบบสั้นที่เรียงตัวไม่เป็นระเบียบ..... | 11 |
| 3.4 กราฟระหว่าง flexural strength และ ปริมาณเส้นไหมของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมแบบสั้นที่เรียงตัวไม่เป็นระเบียบ | 12 |
| 3.5 กราฟระหว่าง impact strength และ ปริมาณเส้นไหมของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมแบบสั้นที่เรียงตัวไม่เป็นระเบียบ..... | 12 |
| 3.6 กราฟระหว่าง flexural modulus และ ชนิดวัสดุ: อีพอกซีเรซิน วัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมแบบสั้น และวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมแบบต่อเนื่องที่มีการจัดเรียงในทิศทางเดียว (unidirection) และ ในสองทิศทาง (bidirection [0/90]) | 14 |
| 3.7 กราฟระหว่าง strain at break และ ชนิดวัสดุ: อีพอกซีเรซิน วัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมแบบสั้น และวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมแบบต่อเนื่องที่มีการจัดเรียงในทิศทางเดียว (unidirection) และ ในสองทิศทาง (bidirection [0/90])..... | 14 |
| 3.8 กราฟระหว่าง flexural strength และ ชนิดวัสดุ: อีพอกซีเรซิน วัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมแบบสั้น และวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมแบบต่อเนื่องที่มีการจัดเรียงในทิศทางเดียว (unidirection) และ ในสองทิศทาง (bidirection [0/90])..... | 15 |
| 3.9 กราฟระหว่าง impact strength และ ชนิดวัสดุ: อีพอกซีเรซิน วัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมแบบสั้น และวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมแบบต่อเนื่องที่มีการจัดเรียงในทิศทางเดียว (unidirection) และ ในสองทิศทาง (bidirection [0/90])..... | 15 |
| 3.10 กราฟระหว่าง flexural modulus และชนิดของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมแบบต่อเนื่องที่มีการจัดเรียงแบบ well-stretched unidirection..... | 17 |

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

| รูปภาพ | หน้า |
|--|------|
| 3.11 กราฟระหว่าง strain at break และชนิดของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมแบบ ต่อเนื่องที่มีการจัดเรียงแบบ well-stretched unidirection | 17 |
| 3.12 กราฟระหว่าง flexural strength และชนิดของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหม แบบต่อเนื่องที่มีการจัดเรียงแบบ well-stretched unidirection..... | 18 |
| 3.13 กราฟระหว่าง impact strength และชนิดของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหม แบบต่อเนื่องที่มีการจัดเรียงแบบ well-stretched unidirection..... | 18 |
| 3.14 กราฟระหว่างปริมาณการดูดน้ำและปริมาณเส้นไหมของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจาก เส้นไหมแบบสั้นที่เรียงตัวไม่เป็นระเบียบ | 19 |
| 3.15 SEM micrographs ของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมแบบสั้นที่ไม่ผ่านการปรับ สภาพด้วย 3-อมีโน โพรพิล ไตรเอทอกซีไซเลน ปริมาณเส้นไหมในอัตราส่วน 1, 2, 4, และ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากขั้นตอนที่ผ่านการทดสอบความทนต่อการตกกระแทก | 21 |

คำอธิบายสัญลักษณ์

| | |
|--------------------|---|
| 3hr-cleaned silk | เส้นไหมแบบต่อเนื้อที่ผ่านการทำความสะอาดด้วยเอทานอลเป็นเวลา 3 ชั่วโมง |
| 5hr-cleaned silk | เส้นไหมแบบต่อเนื้อที่ผ่านการทำความสะอาดด้วยเอทานอลเป็นเวลา 5 ชั่วโมง |
| APS | 3-อมีโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (3-aminopropyltriethoxysilane) |
| APS-treated silk | เส้นไหมเส้นที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วย 3-อมีโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน |
| EtAPS-treated silk | เส้นไหมแบบต่อเนื้อที่ผ่านการทำความสะอาดด้วยเอทานอลเป็นเวลา 3 ชั่วโมงและปรับสภาพพื้นผิวด้วย 3-อมีโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน |
| uncleaned silk | เส้นไหมเส้นที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารประสานไซเลน หรือ เส้นไหมแบบต่อเนื้อที่ไม่ผ่านการทำความสะอาดด้วยเอทานอล |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย และการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง

เส้นใยไหมเป็นผลิตภัณฑ์ธรรมชาติที่หาได้ง่ายภายในประเทศ ในประเทศไทยมีการนำเส้นใยไหมที่ได้จากตัวไหมมาทอเป็นผ้าไหม ผ้าไหมเป็นผ้าที่มีคุณภาพสูง ทั้งทางด้านความสวยงาม ความทนทาน และความสบายในการสวมใส่ เส้นใยไหมเป็นเส้นใยที่มีสมบัติทางกลที่ดี คือ มีค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) และความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) สูง และ เปอร์เซ็นต์ดึงขึ้นในจุดขาด 20 เปอร์เซ็นต์ (elongation at break) ซึ่งเส้นใยสังเคราะห์เช่น Kevlar 49 และ เส้นใยแก้ว ซึ่งเป็นวัสดุเสริมแรงที่ใช้กันแพร่หลาย แม้จะมีความทนทานต่อแรงดึงสูงกว่าเส้นใยไหมแต่สามารถยืดได้น้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ ก่อนขาดออกจากกัน¹

ดังนั้นเส้นใยไหมสามารถใช้เป็นเส้นใยเสริมแรงสำหรับวัสดุเสริมแรงได้ เนื่องจากมีความแข็งแรงทางกลสูง และในขณะที่เคียวกันจะช่วยเพิ่มความเหนียวให้กับวัสดุเชิงประกอบเนื่องจากความสามารถในการยืดก่อนจะขาดออกจากกัน จึงเหมาะสำหรับวัสดุเสริมแรงที่ต้องการความเหนียวเป็นพิเศษ

ข้อดีของการใช้เส้นใยไหมเป็นวัสดุเสริมแรงคือ

1. เพิ่มประโยชน์ใช้สอยของเส้นใยไหมซึ่งเป็นวัสดุภายในประเทศ
2. เป็นการพัฒนาวัสดุเชิงประกอบชนิดใหม่ที่มีความเหนียวเป็นพิเศษ
3. เพิ่มความสามารถในการย่อยสลายของวัสดุเชิงประกอบเนื่องจากเส้นใยไหมเป็นวัสดุธรรมชาติ สามารถย่อยสลายได้ตามกระบวนการชีวภาพ
4. เส้นใยไหมไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิต เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยสังเคราะห์อื่น ๆ เช่นเส้นใยแก้ว
5. เป็นการลดการใช้พลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตเส้นใยสังเคราะห์ และ ลดของเสียจากกระบวนการผลิตเส้นใยสังเคราะห์

วัสดุเชิงประกอบที่ใช้แพร่หลายในงานทางด้านวัสดุวิศวกรรมคือ วัสดุเชิงประกอบอีพอกซี คุณสมบัติของอีพอกซีเรซินที่ผ่านกระบวนการทำให้แข็งตัวแล้วคือ แข็งและเปราะ (hard and brittle) การใช้เส้นใยไหมเป็นวัสดุเสริมแรงสำหรับวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจะช่วยปรับปรุงความเหนียวให้กับวัสดุชนิดนี้ งานวิจัยที่เกี่ยวกับการใช้เส้นใยไหมเป็นวัสดุเสริมแรงกำจัดเฉพาะวัสดุเชิงประกอบยาง (elastomer composites)²⁻⁵ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้เส้นใยไหมในวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีมีอยู่น้อย จึงควรมีการศึกษาการใช้เส้นใยไหมเป็นวัสดุเสริมแรงสำหรับวัสดุเชิงประกอบอี

พอกซี (epoxy composites) ซึ่งจะนำไปสู่การได้วัสดุเชิงประกอบอีพอกซีชนิดใหม่ที่ใช้เส้นใยไหมเป็นวัสดุเสริมแรงที่มีสามารถใช้เป็นวัสดุวิศวกรรมในงานที่ต้องการความเหนียวเป็นพิเศษ

จากการศึกษาความแข็งแรงทางกลของเส้นใยไหมของญี่ปุ่น (Diazo, J106, J115) จีน (C108, C145) และอินเดีย (Hosa mysore, kalimpong A, NB18, NB7, Nistari) พบว่าเส้นใยไหมมีความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ระหว่าง 65-171 MPa และ ความสามารถในการยืดออกก่อนขาด 20-40 เปอร์เซ็นต์⁶ และ Bascom ได้รายงานความแข็งแรงทางกลของเส้นใยไหมจากตัวไหมชนิด *Bombyx. Mori* คือ *Bombyx. Mori* มีความทนทานต่อแรงดึงสูงถึง 0.6 GPa, ความสามารถในการยืดออกก่อนขาด 20 เปอร์เซ็นต์¹ และมอดูลัสแรงดึง 5 GPa⁷ ซึ่งเป็นความแข็งแรงที่เหมาะสมในการใช้งานทางด้านวัสดุวิศวกรรม โดยมีสมบัติเด่นคือจะให้ความเหนียวที่ดีกว่าการใช้เส้นใยสังเคราะห์อื่น เช่น Kevlar 49 และ เส้นใยแก้ว

การศึกษาโครงสร้างของเส้นใยไหมประเภทต่าง ๆ ได้มีการวิจัยอย่างกว้างขวาง⁷⁻¹⁷ พบว่าโครงสร้างพื้นฐานของเส้นใยไหมซึ่งเป็นเส้นใยโปรตีนประกอบด้วยส่วนที่เป็น structural protein และส่วนที่ทำหน้าที่เชื่อมโยงเส้นใยเข้าด้วยกัน กรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบของเส้นใยไหมได้แก่ ไกลซีน (glycine) อลานีน (alanine) และเซอรีน (serine) เป็นต้น ส่วนฐานวิทย์ของเส้นใยไหมประกอบด้วยส่วนที่เป็นระเบียบหรือผลึก (crystalline) และส่วนที่ไม่เป็นระเบียบ (amorphous) ซึ่งมีอิทธิพลต่อความแข็งแรงทางกลของเส้นใยไหม โดยที่โครงสร้างส่วนที่เป็นระเบียบจะมีผลต่อความแข็งแรง (stiffness) และ โครงสร้างส่วนที่ไม่เป็นระเบียบมีผลต่อความสามารถในการยืดออกก่อนขาด¹⁸

โครงสร้างของเส้นใยไหมมีหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl groups) และหมู่เอไมด์เป็นองค์ประกอบ หมู่ไฮดรอกซิลและหมู่เอไมด์จะมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มความแข็งแรงในการยึดติดที่ผิวสัมผัสระหว่างเส้นใยไหมกับอีพอกซีเรซินผ่านทางพันธะไฮโดรเจน ซึ่งความแข็งแรงในการยึดติดที่ผิวสัมผัสจะส่งผลต่อการปรับปรุงสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบ Viney และคณะ¹⁹ ได้ศึกษาความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างผิวหน้าของเส้นใยไหมจากตัวไหมชนิด *Bombyx Mori* และอีพอกซีเรซิน โดยวิธี microbond test และพบว่ามีความแข็งแรงเท่ากับ 15 MPa ซึ่งการยึดติดที่ดีจะช่วยปรับปรุงกลไกการถ่ายเทความเค้น (stress transfer) ระหว่างอีพอกซีและเส้นใยซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเพิ่มความเหนียวของวัสดุเชิงประกอบ

ไวนิลมอนอเมอร์ เช่น เมทาคริลลาไมด์ (methacrylamide) เมทิลเมทาคริเลต (methyl methacrylate) และ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (2-hydroxyethyl methacrylate) ใช้สำหรับปรับปรุงสมบัติเส้นใยไหม เพื่อเพิ่มความสะดวกในกระบวนการทอ เช่น ลดกระแสไฟฟ้าสถิตย์ของเส้นใยไหม หรือเพิ่มความสบายในการสวมใส่ หรือลดการเสื่อมสภาพของเส้นใยไหม ซึ่ง Ishicawa และคณะ²⁰ ประสบความสำเร็จในการกราฟ (grafting) ไวนิลมอนอเมอร์ ชนิด ไวนิล ไตรเมทอกซีไซเลน (ใช้เป็นสารประสานในอุตสาหกรรมวัสดุเชิงประกอบ²¹) บนโครงสร้างของเส้นใยไหมชนิด *Bombyx*

mori ดังนั้นการปรับปรุงผิวหน้าของเส้นใยไหมที่ใช้งานในด้านวัสดุวิศวกรรมสามารถใช้สารประกอบไซเลนได้เช่นเดียวกัน สารประกอบไซเลนนี้จะต้องมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดพันธะเคมีกับพลาสติกได้ เช่นหมู่เอมีน ($-NH_2$) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับวงแหวนอีพอกไซด์ของอีพอกซีเรซินเกิดเป็นพันธะเคมีในลักษณะเดียวกับสารเร่งการแข็งตัวของอีพอกซีเรซินทำปฏิกิริยากับอีพอกซีเรซิน ซึ่งพันธะเคมีที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเส้นใยไหมและอีพอกซีเรซินมีความแข็งแรงมากกว่าพันธะไฮโดรเจน เป็นการเพิ่มเสถียรภาพสูงสุดให้กับโครงสร้างเคมี ณ ผิวสัมผัส (interfacial structure) ซึ่งมีผลต่อการปรับปรุงสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซี

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- ศึกษาความแข็งแรงทางกลและปริมาณความชื้นของเส้นใยไหมจากตัวไหม
- ศึกษาอิทธิพลของปริมาณเส้นใยไหมต่อสมบัติทางกล และการดูดน้ำของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเรซินที่ใช้เส้นใยไหมเป็นวัสดุเสริมแรง
- ศึกษาอิทธิพลของสารประสานชนิด 3-อมีโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (3-aminopropyltriethoxysilane) ต่อความสามารถในการยึดติดของพื้นผิวเส้นใยไหมกับอีพอกซีเรซิน และต่อการดูดน้ำของวัสดุเชิงประกอบ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- ต้องการเปรียบเทียบความแข็งแรงทางกลและความเหนียวระหว่างวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่ใช้เส้นใยจากตัวไหมกับอีพอกซีเรซิน
- ต้องการหาปริมาณเส้นใยไหมที่ทำให้ความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเพิ่มขึ้นสูงสุด
- ต้องการทราบประสิทธิภาพของ 3-อมีโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน ในการปรับปรุงความสามารถในการยึดติดระหว่างพื้นผิวของเส้นใยไหมกับอีพอกซีเรซิน
- ต้องการทราบความสามารถในการดูดน้ำของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่ใช้เส้นใยไหมเป็นวัสดุเสริมแรงเมื่อเปรียบเทียบกับอีพอกซีเรซิน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การวิจัยนี้จะเป็นพื้นฐานต่อไปสำหรับการเตรียมวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีซึ่งใช้เส้นใยไหมเป็นวัสดุเสริมแรง เป็นการพัฒนาทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุของประเทศอย่างต่อเนื่อง และเป็นพัฒนานักวิจัยรุ่นใหม่ให้สามารถเริ่มการวิจัยและพัฒนาได้ และดำเนินการวิจัยต่อไปได้อย่างต่อเนื่องในระยะยาว

บทที่ 2

วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลองได้แก่ เส้นไหมพันธุ์นวน้อย (*Bombix mori*) ได้รับการสนับสนุนจากกลุ่มแม่บ้านทอผ้าบ้านส้มป่อย อ. รวยไสล จ. ศรีสะเกษ อีพอกซีเรซิน (EPOTEC YD127, Thai Organic Chemicals Co., Ltd.) ตัวเร่งแข็ง เททราเอทิลีนเททราอามีน (tetraethylenetetramine, Vista (Thailand) Co., Ltd.) สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมเส้นใยได้แก่ 3-อามิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (3-aminopropyltriethoxysilane: A1100, Sigma-Aldrich Pte., Ltd.) เอทานอล (commercial grade, Italmar (Thailand) Co., Ltd.) และ กรดอะซิติก (analytical grade, Sigma-Aldrich Pte., Ltd.)

2.2 การเตรียมเส้นไหม

2.2.1 การเตรียมเส้นไหมแบบสั้น (Short Silk)

ตัดเส้นไหมให้ได้ขนาดประมาณ 1 เซนติเมตร นำเส้นไหมที่เตรียมได้ไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง

2.2.2 การเตรียมเส้นไหมแบบต่อเนื่อง (Continuous Silk)

ตัดเส้นไหมให้ได้ขนาดเท่ากับความยาวของแม่พิมพ์ขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ คือประมาณ 20 เซนติเมตร นำเส้นไหมที่เตรียมได้ไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง

2.2.3 การปรับสภาพพื้นผิวเส้นไหมด้วยสารประสานไซเลน

เตรียมสารละลาย 3-อามิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (3-aminopropyltriethoxysilane, APS) ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ปรับค่า pH ของ สารละลายไซเลนให้เป็น 3.5 โดยใช้ สารละลายกรดอะซิติกเจือจาง

สำหรับการปรับสภาพพื้นผิวเส้นไหมแบบสั้นมีขั้นตอน คือ นำเส้นไหมที่ผ่านการอบไล่ความชื้นแล้วมาใส่ในสารละลายไซเลนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยปริมาณเส้นไหม 1 กรัม ต่อ สารละลายไซเลน 10 มิลลิลิตร หลังจากนั้นนำเส้นไหมออกมาล้างด้วยน้ำกลั่น 2-3 ครั้ง แล้วนำเส้นไหมไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง

สำหรับการปรับสภาพเส้นไหมแบบต่อเนื่องมีขั้นตอน คือ ทำความสะอาดเส้นไหมด้วยเอทานอลที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 และ 5 ชั่วโมง โดยปริมาณเส้นไหม 1 กรัม ต่อเอทานอล 50 มิลลิลิตร หลังจากนั้นนำเส้นไหมไปอบในเตอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารประสานไซเลนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยปริมาณเส้นไหม 1 กรัม ต่อสารละลายไซเลน 50 มิลลิลิตร หลังจากนั้นนำเส้นไหมออกมาล้างด้วยน้ำกลั่น 2-3 ครั้ง แล้วนำเส้นไหมไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

2.3 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหม

2.3.1 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมแบบเส้นที่เรียงตัวไม่เป็นระเบียบ

ในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมแบบเส้น ใช้วิธีลามิเนตด้วยมือ (hand lay-up lamination) โดยเส้นไหมเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ (random orientation) เส้นไหมที่ใช้ คือ เส้นไหมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารประสานไซเลน (uncleaned silk) ใช้เส้นไหมในอัตราส่วน 1, 2, 4, 6, และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ เส้นไหมที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วย 3-อมีโนโพรพิลไดรเอทอกซีไซเลน (APS-treated silk) โดยใช้เส้นไหมในอัตราส่วน 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

2.3.2 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมแบบต่อเนื่องที่เรียงตัวเป็นระเบียบ

ในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมแบบต่อเนื่องใช้วิธีลามิเนตด้วยมือ โดยให้เส้นไหมเรียงตัวแบบ unidirection, bidirection $[0^{\circ}/90^{\circ}]$ และ well-stretched unidirection ใช้ปริมาณเส้นไหม 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

สำหรับวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่เส้นไหมเรียงตัวแบบ unidirection และ $[0^{\circ}/90^{\circ}]$ เส้นไหมที่ใช้ คือ เส้นไหมที่ไม่ผ่านการทำความสะอาดด้วยเอทานอล (uncleaned silk)

สำหรับวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่เส้นไหมจัดเรียงแบบ well-stretched unidirection เส้นไหมที่ใช้ คือ เส้นไหมที่ไม่ผ่านการทำความสะอาดด้วยเอทานอล (uncleaned silk) และ เส้นไหมที่ผ่านการทำความสะอาดด้วยเอทานอลเป็นเวลา 3 ชั่วโมง (3hr-cleaned silk) และเส้นไหมที่ผ่านการทำความสะอาดด้วยเอทานอลเป็นเวลา 3 ชั่วโมงและปรับสภาพพื้นผิวด้วย 3-อมีโนโพรพิลไดรเอทอกซีไซเลน (EtAPS-treated silk)

2.3.3 การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมด้วยวิธีลามิเนตด้วยมือ

นำเส้นไหมในปริมาณที่กำหนดจัดเรียงในแม่พิมพ์ เทส่วนผสมระหว่างอีพอกซีกับเททาเอทิลีนเททราเมิน (อัตราส่วน 184.5: 25.4) ในแม่พิมพ์ที่ทำการเรียงเส้นไหมไว้เรียบร้อยแล้ว ปิดด้านบนแม่พิมพ์ด้วยแผ่นใส และหล่อเย็นทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และขึ้นงานออกจากแม่พิมพ์แล้วนำไปอบบ่ม (post cure) ที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

2.4 การทดสอบสมบัติของเส้นไหมและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหม

2.4.1 การวัดขนาดของเส้นไหม

วัดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของเส้นไหมด้วยกล้อง Optical Microscope ยี่ห้อ Nikon (รุ่น Eclipse E600 Pol) ที่กำลังขยายเลนส์ตา 10x และเลนส์วัตถุ 20x

2.4.2 การทดสอบความทนต่อแรงดึง (Tensile Test) ของเส้นไหม

ทดสอบด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ของบริษัท Instron (รุ่น Instron5569) load cell 5 kN, gauge length 5 เซนติเมตร และ อัตราเร็วในการดึง 0.5 มิลลิเมตรต่อนาที

2.4.3 การทดสอบสมบัติทางความร้อนและการตรวจสอบปริมาณความชื้นของเส้นไหม

ทดสอบด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analyzer ของบริษัท TA Instruments (รุ่น SDT2960) โดยให้ความร้อนแก่ตัวอย่างในอัตราเร็วคงที่ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง 800 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน

2.4.4 การทดสอบความทนต่อแรงดัด (Flexural Test) ของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซี

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D790-97 ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ของบริษัท Instron (รุ่น Instron5565) ขนาดชิ้นงาน (กxยxn) ที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 1.5x15.0x0.8 ตารางเซนติเมตร อัตราเร็วในการกด 3.41 มิลลิเมตรต่อนาที และระยะระหว่างแท่งค้ำยัน (support span) 128 มิลลิเมตร

2.4.5 การทดสอบความทนต่อแรงกระแทก (Impact Test) ของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซี

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D5941 ด้วยเครื่อง Basic Pendulum Impact Tester (BPI) ของบริษัท Atlas Polymer Evaluation Products (รุ่น BP-2011) ขนาดชิ้นงาน (กxยxn) ที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 1.25x6.5x0.8 ตารางเซนติเมตร โดยไม่บากชิ้นทดสอบ

2.4.6 การทดสอบการดูดน้ำของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซี

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D570 ขนาดชิ้นงาน (กxยxn) ที่ใช้ในการทดสอบ 25.4x76.2x0.8 ตารางเซนติเมตร ระยะเวลาในการทดสอบ 24 ชั่วโมง

2.4.7 การตรวจสอบความสามารถในการยึดติดระหว่างพื้นผิวของเส้นไหมและอีพอกซีเรซิน

ตรวจสอบผิวหน้าแตกหักของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความทนต่อแรงกระแทก ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope ยี่ห้อ Jeol (รุ่น JSM 6400) ที่ 8 keV ใช้กำลังขยาย 200x โดยศึกษาบริเวณรอยหัก

บทที่ 3

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1 สมบัติทางกายภาพของเส้นไหม

3.1.1 ขนาดของเส้นไหม

เส้นไหมมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 0.17-0.32 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 0.26 ± 0.03 มิลลิเมตร เมื่อตัดให้มีความยาวประมาณ 1 เซนติเมตร จะได้เส้นไหมแบบสั้นที่มีค่า aspect ratio ที่ 39.83 ± 6.62 ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ขนาดของเส้นไหมแบบสั้นและแบบต่อเนื่อง

| ขนาดเส้นไหม | ต่ำสุด-สูงสุด | ค่าเฉลี่ย |
|-------------------------------|---------------|------------------|
| <u>เส้นไหมแบบสั้น</u> | | |
| เส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร) | 0.17-0.32 | 0.26 ± 0.03 |
| ความยาวเฉลี่ย (เซนติเมตร) | 0.70-1.10 | 1.00 ± 0.06 |
| aspect ratio | 22.58-64.71 | 39.83 ± 6.62 |
| <u>เส้นไหมแบบต่อเนื่อง</u> | | |
| เส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร) | 0.17-0.32 | 0.26 ± 0.03 |

3.1.2 ความทนต่อแรงดึงของเส้นไหม

เส้นไหมที่ไม่ผ่านการทำความสะอาด (uncleaned silk) มีค่ามอดุลัสของยังก์ (Young's modulus) ประมาณ 8 GPa ความทนต่อแรงดึง (tensile strength) 308 MPa และยืดออกได้ 12 เปอร์เซ็นต์ก่อนขาด (elongation at break) การทำความสะอาดเส้นไหมด้วยเอทานอล 3 และ 5 ชั่วโมง มีผลทำให้ค่ามอดุลัสของยังก์เพิ่มเป็น 11 และ 9 GPa ตามลำดับ และความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเป็น 436 และ 366 ตามลำดับ สำหรับการยืดออกก่อนขาด มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยคือ 14 และ 13 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ การทำความสะอาดเส้นไหมด้วยเอทานอลช่วยปรับปรุงความแข็งแรงทางกลของเส้นไหม อาจเป็นผลเนื่องมาจากการที่ binding materials เช่น แวกซ์ (wax) และสารน้ำหนักโมเลกุลต่ำอื่น ๆ ถูกกำจัดออก ส่งผลให้การส่งผ่านแรงระหว่างไมโครไฟบริลส์ (microfibrils) ทำได้ดีขึ้น ซึ่งการทำความสะอาดด้วยเอทานอลเป็นเวลา 3 ชั่วโมงส่งผลต่อการปรับปรุงความแข็งแรงทางกลของเส้นไหมได้ดีกว่าการทำความสะอาดด้วยเอทานอลเป็นเวลา 5 ชั่วโมง

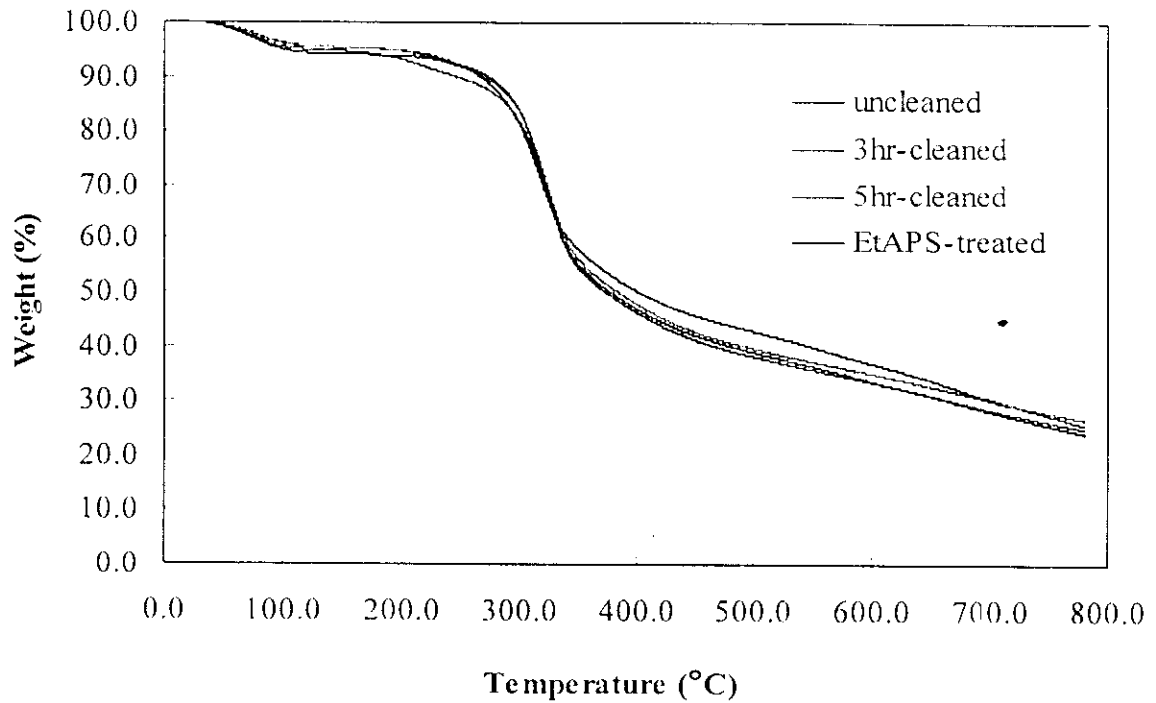
สำหรับการทำความสะอาดเส้นไหมด้วยเอทานอลเป็นเวลา 3 ชั่วโมงแล้วปรับสภาพที่ผิวด้วย 3-อมิโนโพรพิลไดรเอทอกซีไซเลน ทำให้ค่ามอดุลัสของยังก์ ความทนต่อแรงดึง การยืดออกก่อนขาด เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับเส้นไหมที่ไม่ผ่านการทำความสะอาด ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าความทนต่อแรงดึงของเส้นไหม

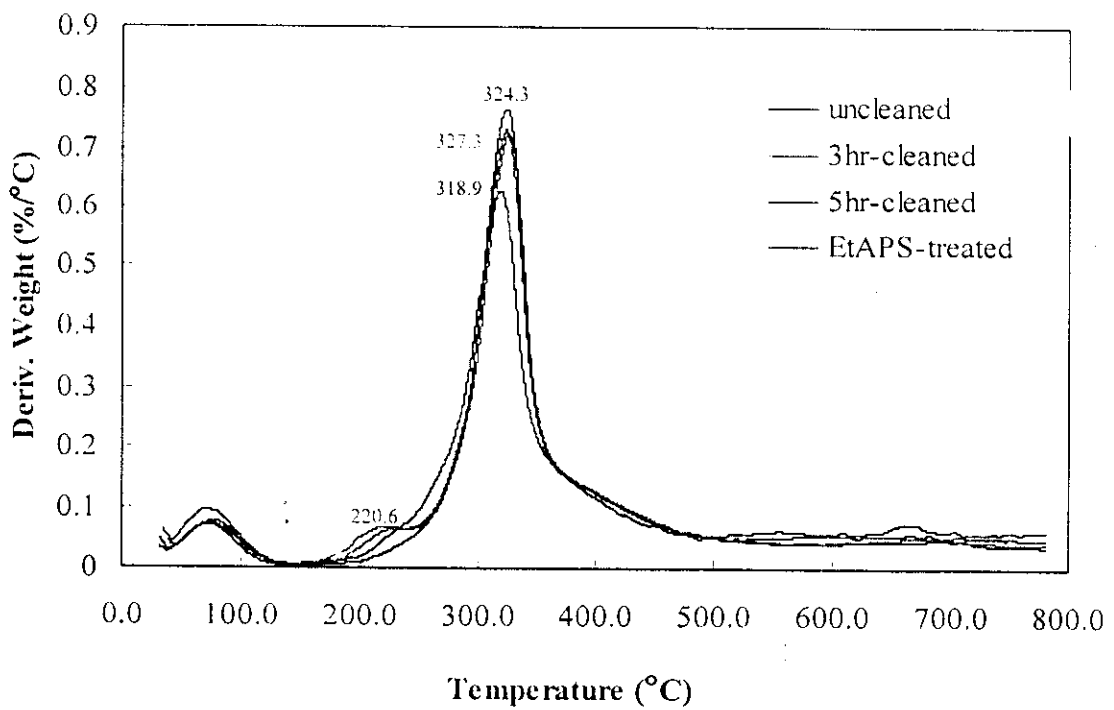
| Types of Silk | Tensile strength (MPa) | | Young's modulus (GPa) | | Elongation at break (%) | |
|---------------|---------------------------|-------------|--------------------------|------------|----------------------------|----------|
| | range | mean | range | mean | range | mean |
| uncleaned | 245.0 – 411.0 | 308.4±50.9 | 5.13-12.84 | 7.74±2.52 | 8.8 - 14.4 | 11.6±2.0 |
| 3hr-cleaned | 245.0 – 623.0 | 436.4±112.4 | 5.58 -25.59 | 11.07±5.53 | 10.2 - 20.6 | 14.5±3.2 |
| 5hr-cleaned | 243.0 – 611.0 | 365.7±101.0 | 2.59-15.83 | 8.51±3.92 | 10.5 -15.5 | 13.1±1.6 |
| EtAPS-treated | 180.0 - 396.0 | 299.9±61.4 | 5.44-9.82 | 7.52±1.60 | 7.6 - 13.3 | 10.6±2.0 |

3.1.3 สมบัติทางความร้อนและปริมาณความชื้นของเส้นไหม

จากกราฟ TGA และ DTGA ของเส้นไหมทั้ง 4 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 1 (a) และ 1 (b) ตามลำดับ แสดงอุณหภูมิเสื่อมสลายที่ 1 ประมาณ 50-120 องศาเซลเซียส เนื่องจากการระเหยออกของความชื้นในเส้นไหม โดยเส้นไหมมีปริมาณความชื้นประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิการเสื่อมสลายที่ 2 ในช่วง 180-220 องศาเซลเซียสเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของเส้นไหม²³ โดยที่เส้นไหมที่ผ่านการทำความสะอาดด้วยเอทานอล 3 และ 5 ชั่วโมง แสดงพีคที่ 225 องศาเซลเซียส แต่ DTGA ในช่วงนี้ของเส้นไหมที่ไม่ผ่านการทำความสะอาดด้วยเอทานอลจะเป็นเพียงเนินของพีค (shoulder peak) เท่านั้น สำหรับเส้นไหมที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วย 3-อมิโนโพรพิลไดรเอทอกซีไซเลน ไม่แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงในช่วงดังกล่าว การเสื่อมสลายในช่วงที่ 3 คือ 250-400 องศาเซลเซียส เป็นผลจากการสลายตัวของเส้นไหมเนื่องจากความร้อน²⁴ การทำความสะอาดเส้นไหมด้วยเอทานอล และการปรับสภาพพื้นผิวเส้นไหมด้วย 3-อมิโนโพรพิลไดรเอทอกซีไซเลน อุณหภูมิการสลายตัวมี DTGA พีคที่ 327 และ 324 องศาเซลเซียส แต่เส้นไหมที่ไม่ผ่านการทำความสะอาดด้วยเอทานอล ตำแหน่งพีคอยู่ที่ 319 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามเส้นไหมทั้งสามชนิดมีอุณหภูมิเริ่มต้นของการเสื่อมสลายในช่วงที่ 3 ที่ใกล้เคียงกัน



(a)



(b)

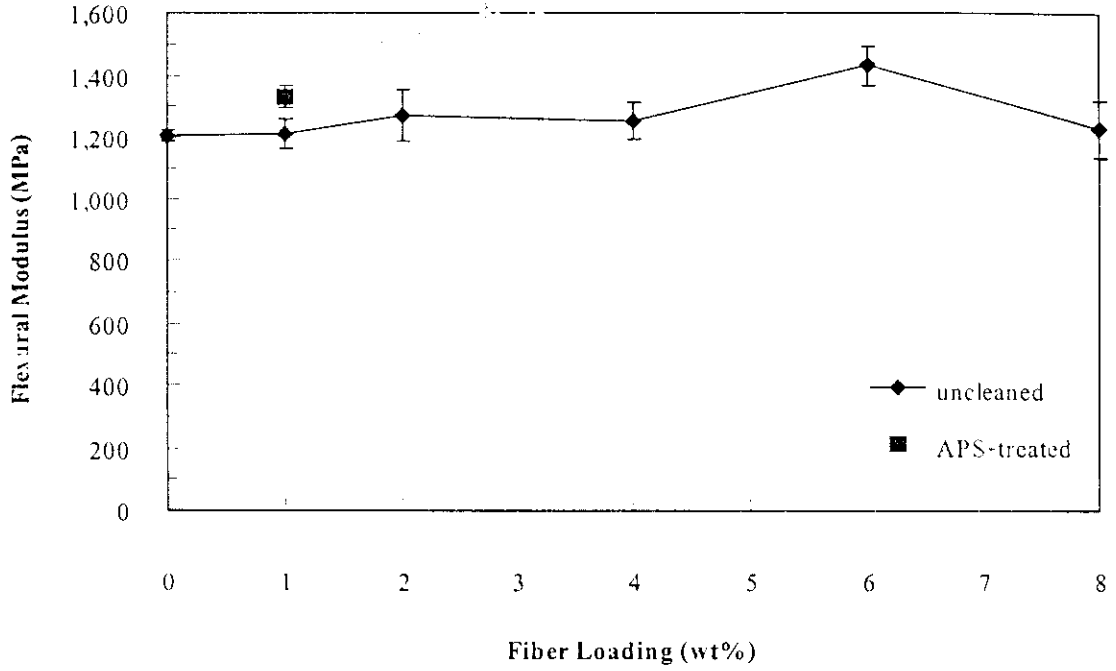
รูปที่ 3.1 กราฟ TGA (a) และ DTGA (b) ของเส้นไหมที่ไม่ผ่านการทำความสะอาดด้วยเอทานอล (uncleaned silk) เส้นไหมที่ผ่านการทำความสะอาดด้วยเอทานอล 3 และ 5 ชั่วโมง (3hr- and 5hr-cleaned silk) และเส้นไหมที่ผ่านการทำความสะอาดด้วยเอทานอล 3 ชั่วโมงและปรับสภาพพื้นผิวด้วย 3-อมีโนโพรพิลไดรเอทอกซีไซเลน (EtAPS-treated silk)

3.2 สมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหม

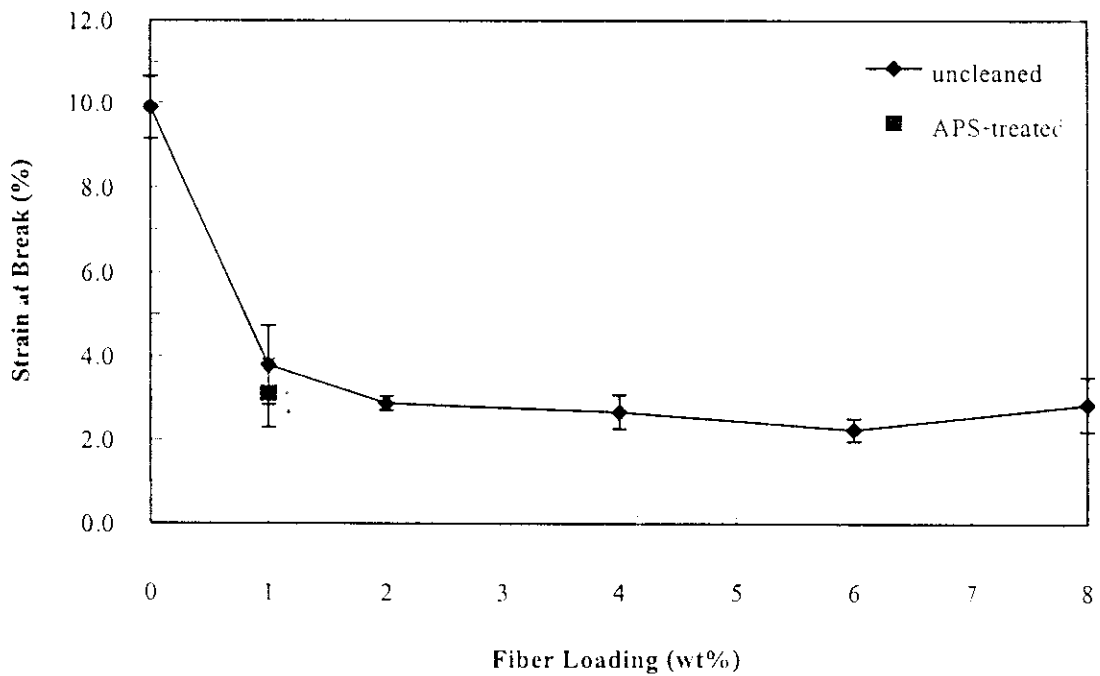
3.2.1 ผลของปริมาณเส้นไหมแบบสั้นที่เรียงตัวไม่เป็นระเบียบต่อสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซี

จากรูปที่ 3.2-3.5 เมื่อปริมาณเส้นไหมแบบสั้นเพิ่มขึ้นเป็น 1-4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก flexural modulus เพิ่มขึ้นเล็กน้อย และ strain at break ลดลงจาก 10 เปอร์เซ็นต์เป็น 3.7 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับอีพอกซีเรซิน และ flexural modulus เพิ่มขึ้นสูงสุดเมื่อปริมาณเส้นไหมเป็น 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และลดลงเมื่อปริมาณเส้นไหมเพิ่มเป็น 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งลดลงใกล้เคียงกับกรณีที่มีปริมาณเส้นไหมเป็น 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ strain at break เพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับเมื่อปริมาณเส้นไหมเป็น 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เช่นเดียวกัน ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากการที่เส้นไหมอยู่ใกล้กันมากเกินไป (fiber-fiber interaction) ในทางตรงกันข้ามเมื่อผสมเส้นไหมในอีพอกซีเชิงประกอบ flexural strength และ impact strength มีค่าลดลงเนื่องมาจากฟองอากาศเกิดขึ้นในขั้นตอนขึ้นรูปตัวอย่างและเส้นใยพันกันทำให้เรซินไม่สามารถเข้าเติมเต็มช่องว่างระหว่างเส้นใย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบการดูดน้ำของวัสดุเชิงประกอบในหัวข้อที่ 3.3 ฟองอากาศขนาดเล็กนี้เป็นจุดรวมของความเค้น (stress concentration area) เป็นผลทำให้วัสดุเชิงประกอบแตกหักง่ายขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับอีพอกซีเรซิน และปริมาณเส้นไหมที่เพิ่มขึ้นค่าของ flexural strength และ impact strength มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

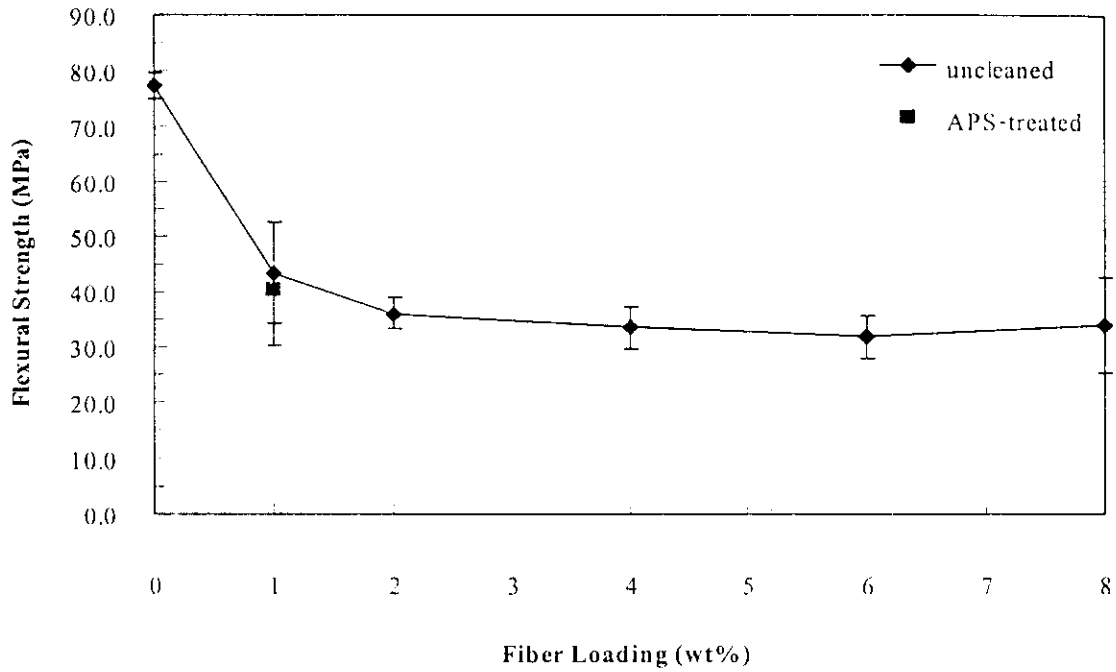
สำหรับวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่ใช้เส้นไหมที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วย 3-อามิโนโพรพิล ไตรเอทอกซีไซเลน (APS-treated silk) ในปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะทำให้ flexural modulus เพิ่มขึ้นน้อยมาก ในขณะที่ค่า strain at break ลดลงเล็กน้อย แต่จะทำให้ flexural strength ลดลง และ impact strength ลดลงน้อยมาก ทั้งนี้แสดงว่าการใช้ 3-อามิโนโพรพิล ไตรเอทอกซีไซเลน เป็นสารประสาน (coupling agent) ยังไม่สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีให้ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ



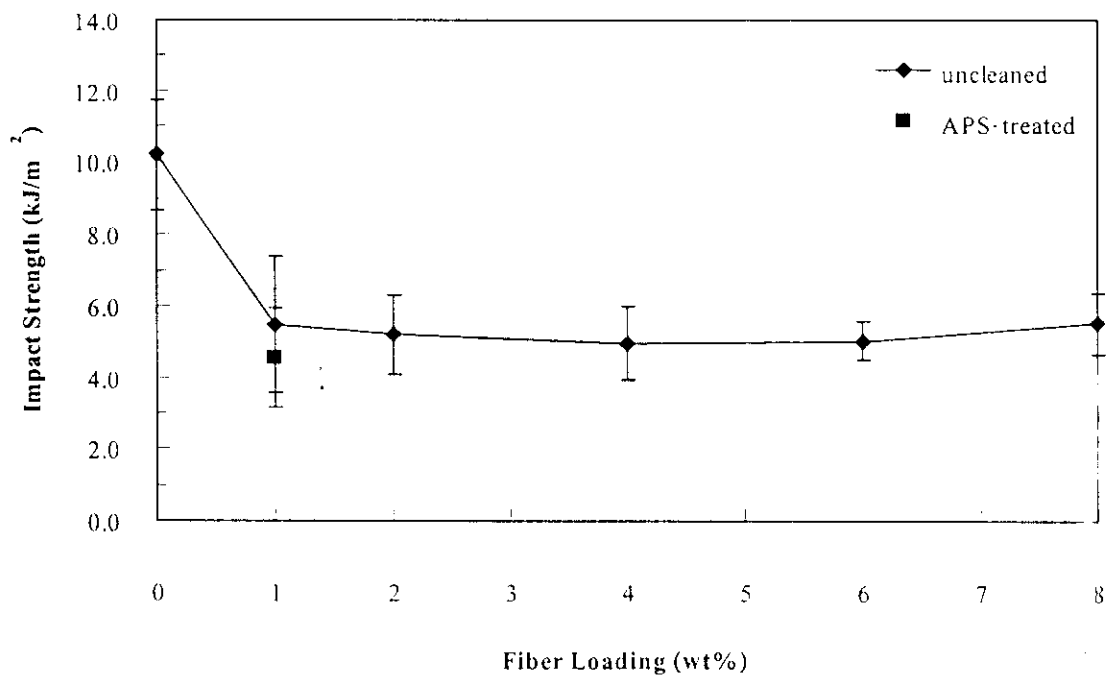
รูปที่ 3.2 กราฟระหว่าง flexural modulus และ ปริมาณเส้นไหมของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมแบบสั้นที่เรียงตัวไม่เป็นระเบียบ



รูปที่ 3.3 กราฟระหว่าง strain at break และ ปริมาณเส้นไหมของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมแบบสั้นที่เรียงตัวไม่เป็นระเบียบ



รูปที่ 3.4 กราฟระหว่าง flexural strength และ ปริมาณเส้นไหมของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมแบบสั้นที่เรียงตัวไม่เป็นระเบียบ

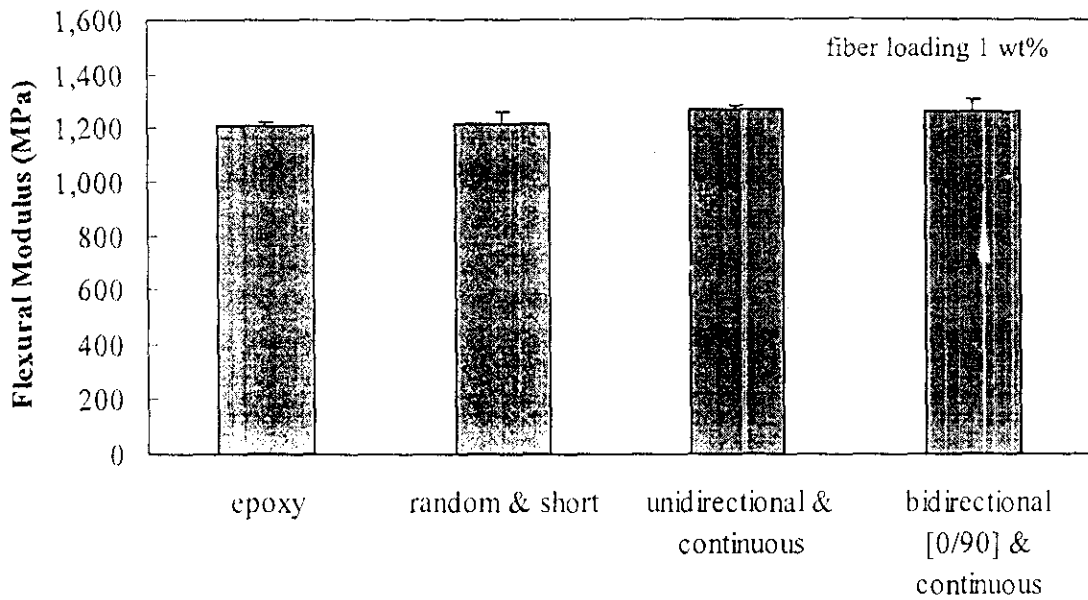


รูปที่ 3.5 กราฟระหว่าง impact strength และ ปริมาณเส้นไหมของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมแบบสั้นที่เรียงตัวไม่เป็นระเบียบ

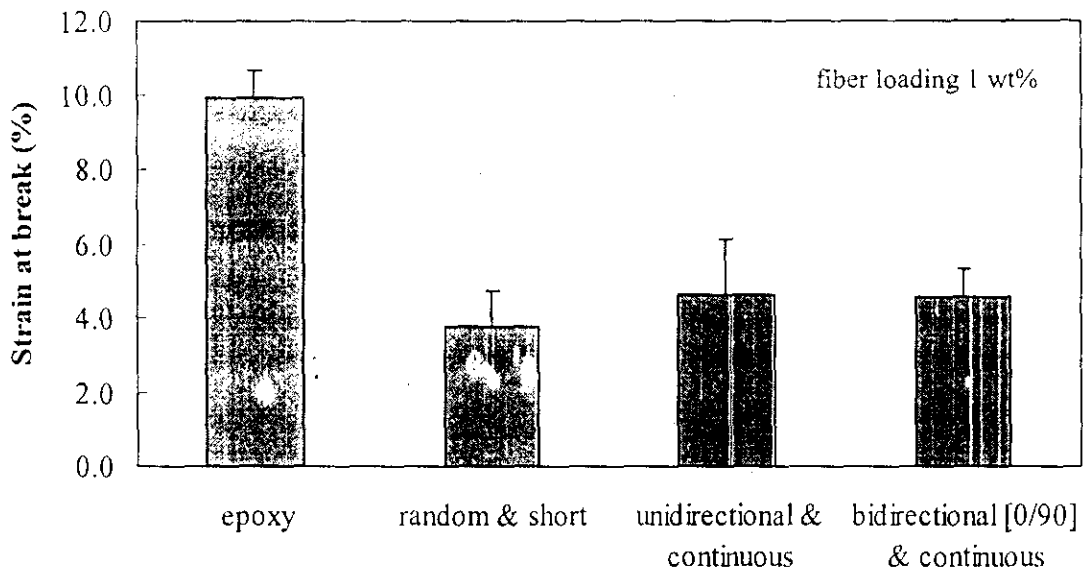
3.2.2 ผลของความยาวและการเรียงตัวของเส้นไหมต่อสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหม

ความยาวและทิศทางการจัดเรียงของเส้นไหมมีผลต่อสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหม ดังแสดงในรูปที่ 3.6-3.9 คือ การใช้เส้นไหมแบบสั้นและแบบต่อเนื่อง 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไม่มีผลต่อการเพิ่ม flexural modulus อย่างมีนัยสำคัญแต่มีผลให้ strain at break ลดลงประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ มีผลให้ flexural strength และ impact strength ลดลง การใช้เส้นไหมแบบต่อเนื่องทำให้วัสดุเชิงประกอบอีพอกซีมีค่า strain at break เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เส้นไหมแบบสั้นที่เรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ (random direction) และวัสดุเชิงประกอบที่ใช้เส้นไหมแบบต่อเนื่องเรียงตัวในทิศทางเดียว (unidirection) และเรียงตัวในสองทิศทาง (bidirection [0/90]) มีค่า strain at break ไม่แตกต่างกันซึ่งสอดคล้องกับค่า flexural modulus ที่ไม่แตกต่างกันของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้เส้นไหมแบบต่อเนื่องแต่เรียงตัวในทิศทางเดียวและในสองทิศทาง อย่างไรก็ตามเส้นไหมที่เรียงแบบทิศทางเดียวและแบบสองทิศทาง จะทำให้วัสดุเชิงประกอบอีพอกซีมี flexural strength เพิ่มขึ้นจาก 42 MPa เป็น 51 MPa เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เส้นไหมแบบสั้นและเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ สำหรับ impact strength มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เส้นไหมแบบต่อเนื่องเรียงตัวในทิศทางเดียวจาก 6 kJ/m² เป็น 8 kJ/m² และเมื่อใช้เส้นไหมแบบต่อเนื่องเรียงตัวในสองทิศทาง impact strength ลดลงเป็น 4 kJ/m² เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เส้นไหมแบบสั้นเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ

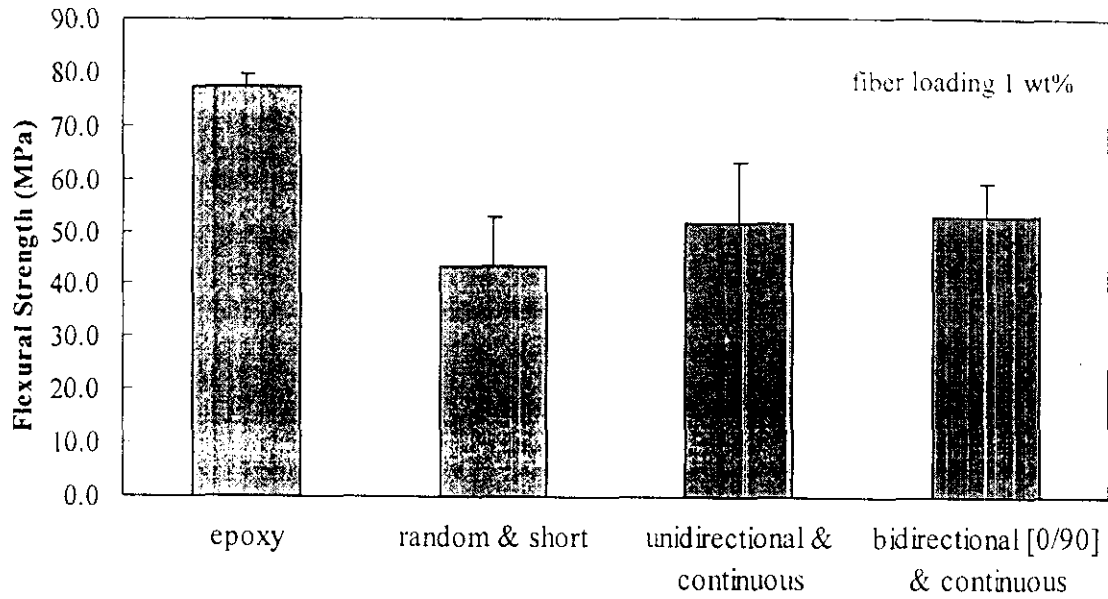
การใช้เส้นไหมแบบต่อเนื่องที่ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีควรมีสมบัติเชิงกลที่สูงกว่าการใช้เส้นไหมสั้นแบบไม่เป็นระเบียบ แต่ไม่เป็นไปตามที่คาดเนื่องจากผลของฟองอากาศและรอยตำหนิ (defects)



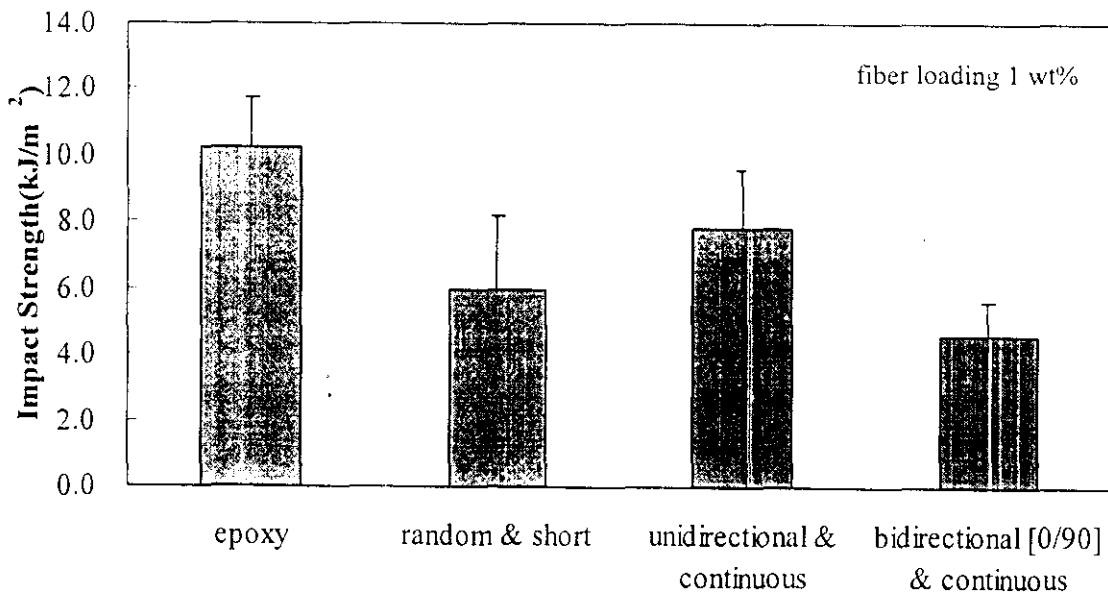
รูปที่ 3.6 กราฟระหว่าง flexural modulus และ ชนิดวัสดุ: อีพอกซีเรซิน วัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมแบบสั้น และวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมแบบต่อเนื่องที่มีการจัดเรียงในทิศทางเดียว (unidirection) และ ในสองทิศทาง (bidirection [0/90])



รูปที่ 3.7 กราฟระหว่าง strain at break และ ชนิดวัสดุ: อีพอกซีเรซิน วัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมแบบสั้น และวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมแบบต่อเนื่องที่มีการจัดเรียงในทิศทางเดียว (unidirection) และ ในสองทิศทาง (bidirection [0/90])



รูปที่ 3.8 กราฟระหว่าง flexural strength และ ชนิดวัสดุ: อีพอกซีเรซิน วัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมแบบสั้น และวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมแบบต่อเนื่องที่มีการจัดเรียงในทิศทางเดียว (unidirection) และ ในสองทิศทาง (bidirection [0/90])



รูปที่ 3.9 กราฟระหว่าง impact strength และ ชนิดวัสดุ: อีพอกซีเรซิน วัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมแบบสั้น และวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมแบบต่อเนื่องที่มีการจัดเรียงในทิศทางเดียว (unidirection) และ ใน สองทิศทาง (bidirection [0/90])

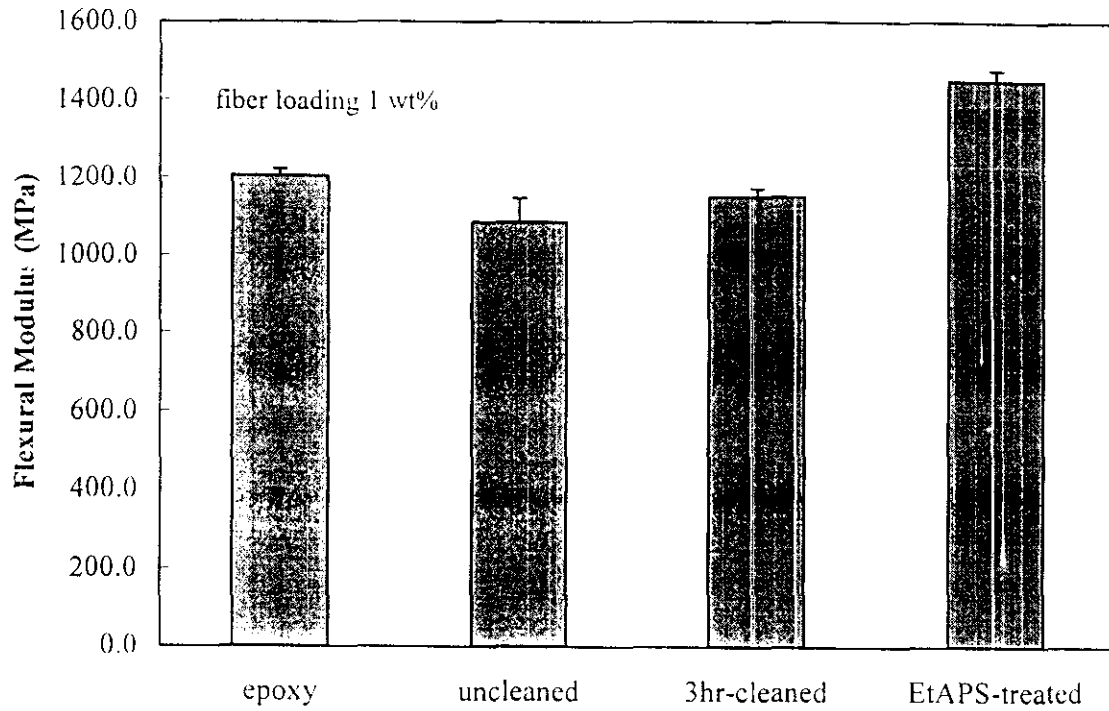
3.2.3 ผลของการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นไหมแบบต่อเนื่องเรียงตัวแบบ Well-Stretched

Unidirection ต่อสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซี

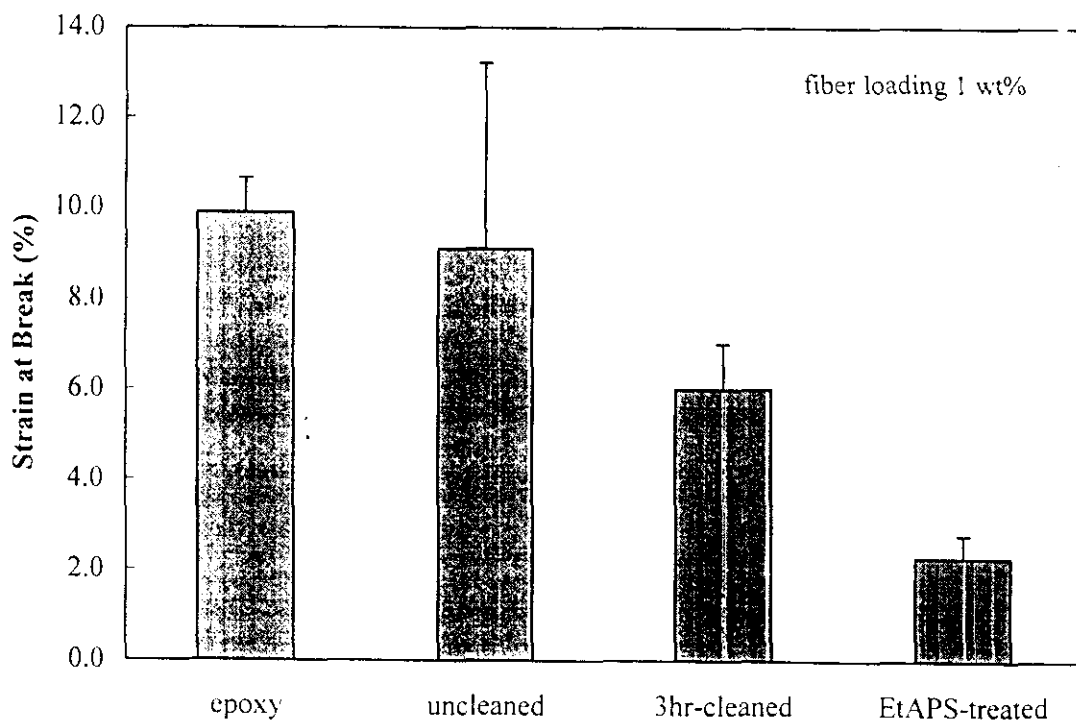
จากกราฟรูปที่ 3.10 และ 3.11 เมื่อทำความสะอาดพื้นผิวเส้นไหมแบบต่อเนื่องด้วยเอทานอลเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ค่า flexural modulus เพิ่มขึ้นน้อยมาก และเมื่อทำความสะอาดพื้นผิวเส้นไหมแบบต่อเนื่องด้วยเอทานอลเป็นเวลา 3 ชั่วโมงและต่อด้วยการปรับสภาพพื้นผิวด้วย 3-อมีโนโพรพิลไตรเอทอกรีไซเลนค่า flexural modulus เพิ่มขึ้นจาก 1200 MPa เป็น 1410 MPa ซึ่งมากกว่า flexural modulus ของอีพอกซีเรซินเล็กน้อย และ strain at break ของวัสดุเชิงประกอบลดลงเป็น 6 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทำความสะอาดพื้นผิวเส้นไหมแบบต่อเนื่องด้วยเอทานอลเป็นเวลา 3 ชั่วโมง และลดลงเป็น 2 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทำความสะอาดเส้นไหมด้วยเอทานอล 3 ชั่วโมงและต่อด้วยการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารประสานไซเลน จะมีค่าสูงกว่าเส้นไหมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว

สำหรับ flexural strength มีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อทำความสะอาดพื้นผิวเส้นไหมด้วยเอทานอลเป็นเวลา 3 ชั่วโมง และลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อทำความสะอาดพื้นผิวเส้นไหมด้วยเอทานอลเป็นเวลา 3 ชั่วโมงและต่อด้วยการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารประสานไซเลน ดังแสดงในรูปที่ 3.12

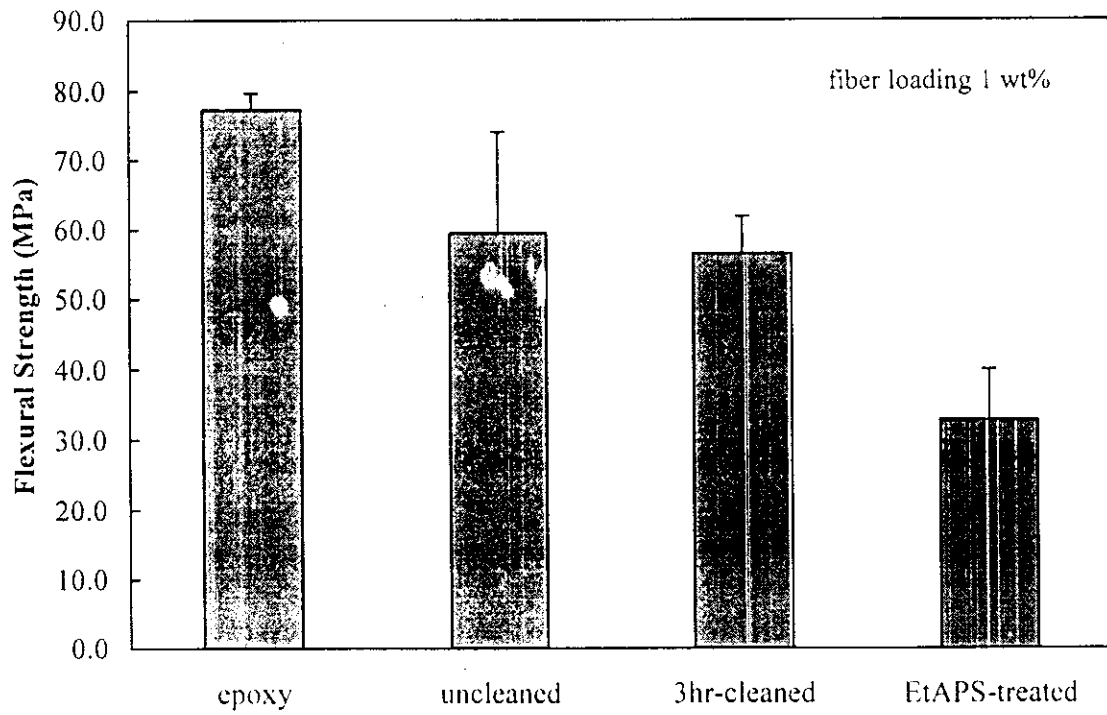
สำหรับวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีการใช้เส้นไหมแบบต่อเนื่องที่เรียงตัวแบบ well-stretched unidirection มีผลให้ impact strength เพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นจาก 10 kJ/m^2 (อีพอกซีเรซิน) เป็น 12 kJ/m^2 ทั้งในกรณีที่ใช้เส้นไหมที่ไม่ผ่านการทำความสะอาด (uncleaned silk) และเส้นไหมที่ทำความสะอาดด้วยเอทานอลเป็นเวลา 3 ชั่วโมง (3hr-cleaned silk) และ impact strength น้อยกว่า 12 kJ/m^2 เล็กน้อย เมื่อใช้เส้นไหมที่ทำความสะอาดพื้นผิวด้วยเอทานอล 3 ชั่วโมงและต่อด้วยการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารประสานไซเลน ดังแสดงในรูปที่ 3.13



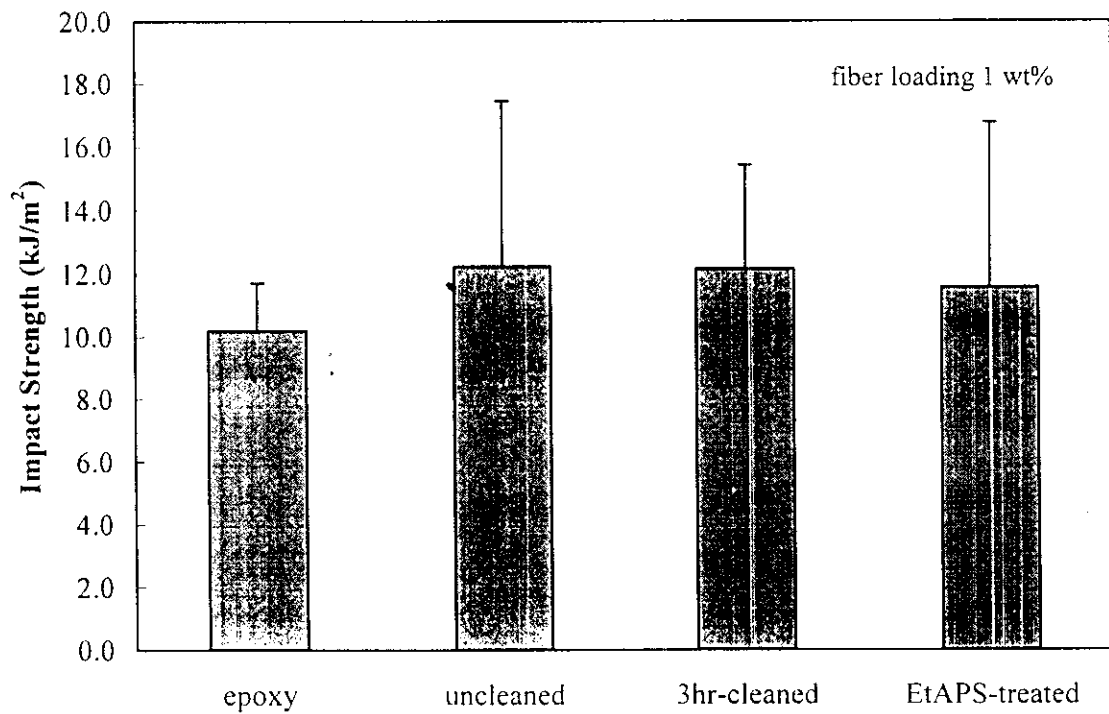
รูปที่ 3.10 กราฟระหว่าง flexural modulus และชนิดของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมแบบต่อเนื่องที่มีการจัดเรียงแบบ well-stretched unidirection



รูปที่ 3.11 กราฟระหว่าง strain at break และชนิดของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมแบบต่อเนื่องที่มีการจัดเรียงแบบ well-stretched unidirection



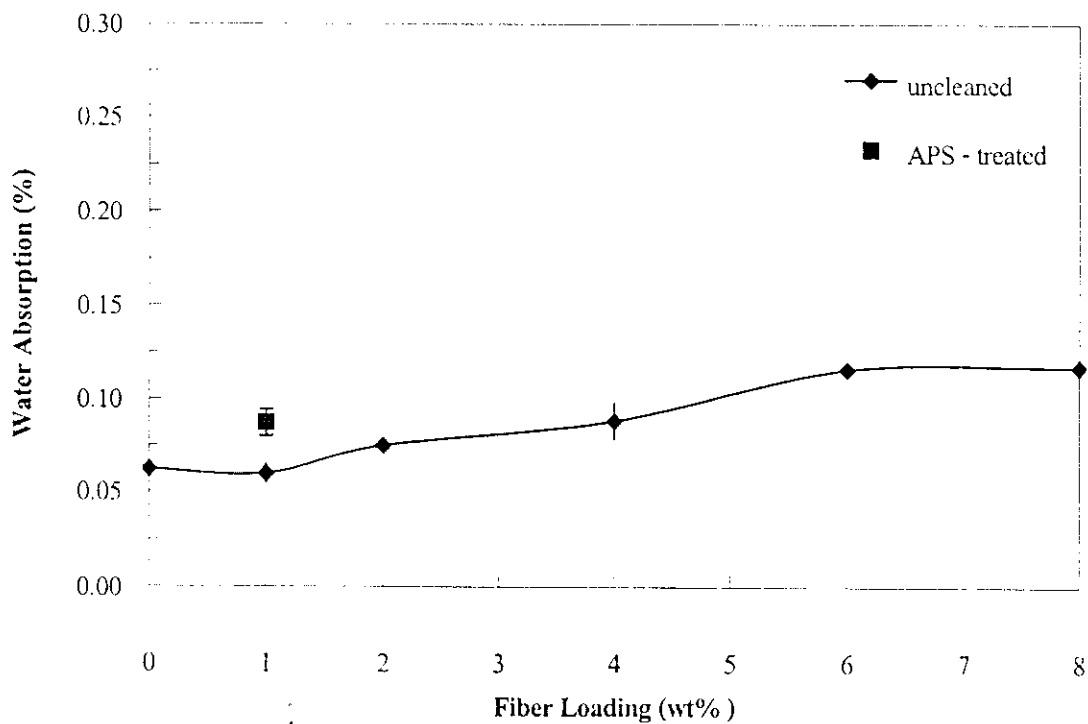
รูปที่ 3.12 กราฟระหว่าง flexural strength และชนิดของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมแบบต่อเนื่องที่มีการจัดเรียงแบบ well-stretched unidirection



รูปที่ 3.13 กราฟระหว่าง impact strength และชนิดของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมแบบต่อเนื่องที่มีการจัดเรียงแบบ well-stretched unidirection

3.3 ปริมาณการดูดความน้ำของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมแบบสั้นที่เรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ

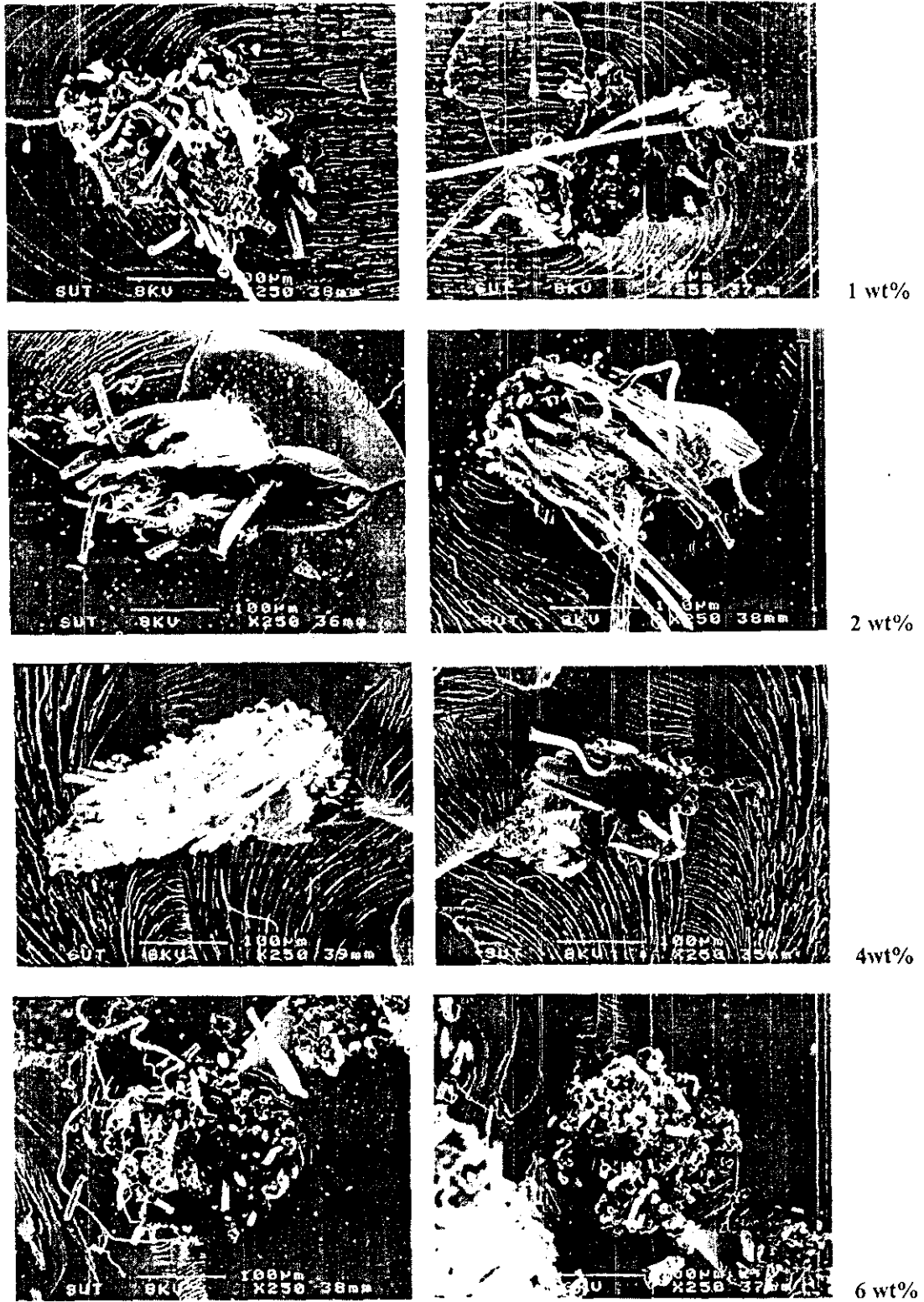
จากกราฟที่ 3.14 จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณเส้นไหมแบบสั้นเพิ่มขึ้นวัสดุเชิงประกอบมีแนวโน้มดูดน้ำได้มากขึ้นและคงที่เมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มจาก 6 เป็น 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นไหมจำนวนของด้านปลายเส้นไหมเพิ่มขึ้น ด้านปลายทั้งสองของเส้นไหมแต่ละเส้นในเนื้อเมทริกซ์เป็นส่วนที่มีช่องว่าง (voids) เกิดขึ้น เมื่อเส้นไหมมากขึ้นปริมาณของช่องว่างดังกล่าวเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันทำให้วัสดุเชิงประกอบดูดน้ำได้มากขึ้น และการที่ปริมาณการดูดน้ำเริ่มคงที่ที่ปริมาณเส้นไหม 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นผลเนื่องมาจากการที่เส้นไหมอยู่ใกล้กันมาก (fiber-fiber interaction)



รูปที่ 3.14 กราฟระหว่างปริมาณการดูดน้ำและปริมาณเส้นไหมของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมแบบสั้นที่เรียงตัวไม่เป็นระเบียบ

3.4 การยึดติดระหว่างพื้นผิวของเส้นไหมและอีพอกซีเรซิน

จาก SEM micrographs ของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมแบบเส้นที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วย 3-อมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน ดังแสดงในรูปที่ 3.15 แสดงให้เห็นได้ว่าอีพอกซีเรซินยึดติดกับเส้นไหมได้ไม่ดีนัก ที่ผิวสัมผัสระหว่างอีพอกซีและเส้นไหมมีลักษณะเป็นช่องว่างขนาดเล็กกระจายโดยรอบ และสำหรับกรณีที่ใช้เส้นไหมในปริมาณ 1 และ 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะมีรูเกิดขึ้นอย่างชัดเจนที่ผิวหน้าแตกหัก (fracture surface) จากการที่เส้นไหมถูกดึงออกจากเนื้อของเมทริกซ์ของชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบความทนต่อแรงกระแทก (impact test)



รูปที่ 3.15 SEM micrographs ของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหมแบบสั้นที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วย 3-อมีโนโพรพิลไดรเอทอกซีไซเลน ปริมาณเส้นไหมในอัตราส่วน 1, 2, 4, และ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากชั้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบความทนต่อแรงกระแทก

บทที่ 4

บทสรุป

4.1 สรุปผลการวิจัย

การใช้เส้นไหมแบบสั้นที่เรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ (random orientation) ไม่มีผลต่อการปรับปรุง flexural modulus อย่างมีนัยสำคัญ แต่มีผลให้ strain at break ลดลงมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับอีพอกซีเรซิน สำหรับ flexural strength และ impact strength เมื่อปริมาณเส้นไหมเพิ่มขึ้นความแข็งแรงทางกลทั้งสองแบบนี้ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ คือ flexural strength ลดลงมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ และ impact strength ลดลงประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ การปรับสภาพพื้นผิวด้วย 3-อมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (APS-treated silk) จะทำให้ flexural modulus, strain at break, flexural strength, และ impact strength เปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ

การใช้เส้นไหมแบบต่อเนื่องและเรียงตัวเป็นระเบียบทำให้วัสดุเชิงประกอบอีพอกซีมีค่า strain at break, flexural strength และ impact strength (เฉพาะเส้นไหมที่เรียงตัวในทิศทางเดียว) เพิ่มขึ้นแต่ไม่ทำให้ flexural modulus เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เส้นไหมแบบสั้นและเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ วัสดุเชิงประกอบที่ใช้เส้นไหมแบบต่อเนื่องเรียงตัวในทิศทางเดียว (unidirection) และเรียงตัวในสองทิศทาง (bidirection [0/90]) มีค่า strain at break ไม่แตกต่างกันซึ่งสอดคล้องกับค่า flexural modulus ที่ไม่แตกต่างกัน สำหรับ impact strength มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เส้นไหมแบบต่อเนื่องเรียงตัวในทิศทางเดียว แต่เมื่อใช้เส้นไหมแบบต่อเนื่องเรียงตัวในสองทิศทาง impact strength กลับลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เส้นไหมแบบสั้นเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ

การทำความสะอาดพื้นผิวเส้นไหมแบบต่อเนื่องที่เรียงตัวแบบ well-stretched unidirection ด้วยเอทานอลเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ค่า flexural modulus เพิ่มขึ้นน้อยมาก และเมื่อทำความสะอาดพื้นผิวเส้นไหมแบบต่อเนื่องด้วยเอทานอลเป็นเวลา 3 ชั่วโมงและต่อด้วยการปรับสภาพพื้นผิวด้วย 3-อมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลนค่า flexural modulus เพิ่มขึ้นจาก 1200 MPa เป็น 1410 MPa ซึ่งมากกว่า flexural modulus ของอีพอกซีเรซินเล็กน้อย และ strain at break ของวัสดุเชิงประกอบลดลง เมื่อทำความสะอาดพื้นผิวเส้นไหมแบบต่อเนื่องด้วยเอทานอลเป็นเวลา 3 ชั่วโมง และเมื่อทำความสะอาดเส้นไหมด้วยเอทานอล 3 ชั่วโมงและต่อด้วยการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารประสานไซเลน สำหรับ flexural strength มีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อทำความสะอาดพื้นผิวเส้นไหมด้วยเอทานอลเป็นเวลา 3 ชั่วโมง และลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อทำความสะอาดพื้นผิวเส้นไหมด้วยเอทานอลเป็นเวลา 3 ชั่วโมงและต่อด้วยการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารประสานไซเลน สำหรับ impact strength มีค่าเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นทั้งในกรณีที่ใช้เส้นไหมที่ไม่ผ่านการทำความสะอาด (uncleaned

silk) เส้นไหมที่ทำความสะอาดด้วยเอทานอลเป็นเวลา 3 ชั่วโมง (3hr-cleaned silk) และ เส้นไหมที่ทำความสะอาดพื้นผิวด้วยเอทานอล 3 ชั่วโมงและต่อด้วยการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารประสานใยเลน

การใช้เส้นไหมแบบสั้นเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบทำให้วัสดุเชิงประกอบอีพอกซีดูดน้ำได้มากขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น การปรับสภาพพื้นผิวเส้นไหมด้วย 3-อามิโนโพรพิลไดเอทอกซีไซเลนช่วยลดปริมาณการดูดน้ำของวัสดุเชิงประกอบได้เล็กน้อย

4.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการวิจัยขั้นต่อไป

ในการวิจัยนี้ซึ่งศึกษาผลของการใช้เส้นไหมเป็นวัสดุเสริมแรงสำหรับอีพอกซีเรซิน โดยมุ่งหมายเพื่อปรับปรุงความทนต่อแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากเส้นไหม ซึ่งจากผลการทดลองในบทที่ 3 แสดงให้เห็นว่าการใช้เส้นไหมแบบต่อเนื่องที่จัดเรียงแบบ well-stretched unidirection ในปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะทำให้วัสดุเชิงประกอบอีพอกซีมีความทนต่อแรงกระแทกได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามความแข็งแรงเชิงกลด้านอื่น ได้แก่ ความทนต่อแรงดัดยังคงต่ำกว่าของอีพอกซีเรซิน ดังนั้นแนวทางในการวิจัยขั้นต่อไปคือ การใช้เส้นไหมแบบต่อเนื่องในปริมาณที่มากกว่า 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ การปรับปรุงเทคนิคการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีด้วยวิธีลามิเนตด้วยมือและใช้สารช่วยลดฟอง (defoaming agent) เพื่อลดฟองอากาศในเนื้อวัสดุ

บรรณานุกรม

1. W. Bascom. (1988). *Other Continuous Fibers. in Composites. Engineered Materials Handbook: I.* Material Park. ASM International.
2. D. K. Setua and G. N. Mathur. (2001). *J. Appl. Polym. Sci.*, **79**: 646-651.
3. M. Tsukada, T. Yamamoto, N. Nakabayashi. et al. (1991). *J. Appl. Polym. Sci.*, **43**: 2115-2121
4. D. K. Setua. (1985). *Abstr. Pap. Am. Chem. S.*, **189**:56-PMSE.
5. D. K. Setua and S. K. De. (1984). *J. Mater. Sci.*, **19**: 983-999.
6. V. Annadurai, G. Subramanyam, R. Gopalkrishne Urs, and R. Somashekar. (2001). *J. Appl. Polym. Sci.*, **79**: 1979-1985.
7. Y. Shen, M. A. Johnson, and D. C. Martin. (1998). *Macromolecules*, **31**: 8857-8864.
8. S. Putthanarat, N. Stribeck, S. A. Fossey, R. K. Eby, and W. W. Adams. (2000). *Polymer*, **41**: 7735-7747.
9. C.-Z. Zhou, F. Confalonieri, M. Jacquet, R. Perasso, Z.-G. Li, and J. Janin. (2001). *Proteins: Structure. Function. and Genetics*, **44**: 119-122.
10. K.-H. Ghrs, K. Weisshart, and F. Grosse (2000). *Rev. Molecular Biotechnology*, **74**: 121-134.
11. T. Asakura, T. Ito, M. Okudaira, and T. Kameda. (1999). *Macromolecules*, **32**: 4940-4946.
12. Y. kawahara and M. shioya. (1999). *J. Appl. Polym. Sci.*, **73**: 363-367.
13. L. D. Miller, S. Putthanarat, R. K. Eby, and W. W. Adams. (1999). *Int. J. Biol. Macromol.*, **24**: 159-165.
14. Y. Takahashi, M. Gehoh, and K. Yuzuriha. (1999). *Int. J. Biol. Macromol.*, **24**: 127-138.
15. P. Monti, G. Freddi, A. Bertoluzza, and M. Tsukada. (1998). *J. Raman Spectrosc.*, **29**: 297-304.
16. M. Dumura, M. Minami, T. Asakura, and T. A. Cross. (1998). *J. Am. Chem. S.*, **120**: 1300-1308.
17. M. Dumura, Y. Yamazaki, T. Asakura, and K. Ogawa. (1998) *J. Am. Chem. S.*, **441**: 155-163.
18. J. Perez-Rigueiro, C. Viney, J. Llorca, and M. Elices. (1998). *J. Appl. Polym. Sci.*, **70**: 2439-2447.
19. J. P. Craven, R. Cripps, and C. Viney. (2000). *Compos. A*, **31**: 653-660.
20. M. Tsukada, T. Arai, S. Winkler, G. Freddi, and H. Ishikawa. (2001). *J. Appl. Polym. Sci.*, **79**: 1764-1770.

21. E. P. Plueddumann. (1991). *Silane Coupling Agent: 2nd Ed.*. Plenum Press. New York.
22. H. Zhang, J. Magoshi, M. Becker, J.Y. Chen, R. Matsunaga (2002). *J. Appl. Polym. Sci.* **86**: 1817-1820.
23. S.M. Lee, D. Cho, W.H. Park, S.G. Lee, S.O. Han, and L. T. Drzal. (2005). *Comp. Sci. Tech.* **65**: 647-657.

ประวัติผู้วิจัย

1. ชื่อ(ภาษาไทย): นาง วิมลลักษณ์ สุตะพันธ์
(ภาษาอังกฤษ): Mrs Wimonlak Sutapun

2. ตำแหน่ง: ผู้ช่วยศาสตราจารย์

3. ประวัติการศึกษา

Ph.D. (Macromolecular Science and Engineering) Case Western Reserve University,
Cleveland, Ohio, USA 2000

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2535

วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมี) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2532

4. ประสบการณ์งานวิจัย

4.1 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว

- โครงการการผลิตผลิตภัณฑ์จากพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างหญ้าแฝกกับพอลิโพรพิลีน (Manufacture of Product from Polymer Composite between Vetiver Grass and Polypropylene) แหล่งทุนสนับสนุน: มทส (สถานภาพ :ผู้ร่วมวิจัย)
- การพัฒนาวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิตเชิงพาณิชย์โดยใช้เส้นใยธรรมชาติในประเทศไทย (Development of Commercialized Polymer Composites Using Natural Fiber in Thailand) แหล่งทุนสนับสนุน: Mtec (สถานภาพ :หัวหน้าโครงการย่อย)

4.2 งานวิจัยที่กำลังทำ

- ชุดโครงการการผลิตพอลิเมอร์คอมโพสิตจากเส้นใยป่านสรนาราชณ์ แหล่งทุนสนับสนุน: มทส (สถานภาพ :ผู้ร่วมวิจัย)
- โครงการการศึกษาการใช้หญ้าแฝกเป็นสารตัวเติมในพอลิโพรพิลีนระยะที่ 2: การปรับปรุงความทนทานต่อแรงกระแทกเพื่อใช้เป็นชิ้นส่วนยานยนต์ แหล่งทุนสนับสนุน: มทส (สถานภาพ :ผู้ร่วมวิจัย)
- ผลของขนาดไฮดรอกซีอะปาไทต์และผลของการใช้สารประสานต่อสมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต แหล่งทุนสนับสนุน: มทส (สถานภาพ :ผู้ร่วมวิจัย)
- การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตจากเปลือกไข่ไก่ แหล่งทุนสนับสนุน: มทส (สถานภาพ : หัวหน้าโครงการ)

5. ผลงานทางวิชาการ

1. Y. Ruksakulpiwat, N. Suppakarn, W. Sutapun, W. Thomthong. *Vetiver - Polypropylene Composites: Physical and Mechanical Properties*. **Composites Part A**. ARTICLE IN PRESS. available online at doi:10.1016/j.compositesa.2006.02.006.
2. N. Suppakarn, S. Sanmaung, Y. Ruksakulpiwat, W. Sutapun, C. Lorprayoon, and S. Ekgasit. "Mechanical Properties of Natural Hydroxyapatite/PP Composites" **Annual Technical Conference 2006**. The Society of Plastics Engineers. Charlotte. North Carolina USA. p. 325. 2006.
3. Y. Ruksakulpiwat, U. Somnuk, J. Kluengsamrong, P. Phinyocheep, N. Suppakarn, and W. Sutapun. *Shear-Induced Crystallization of Natural Fiber-Polypropylene Composites*. **Annual Technical Conference 2006**. The Society of Plastics Engineers. Charlotte. North Carolina USA. p. 1225. 2006.
4. K. Jarukumjorn, Y. Ruksakulpiwat, W. Sutapun, and J. Kluengsamrong. *Compatibilization of Natural Fibers/PP Composites*. **Annual Technical Conference 2006**. The Society of Plastics Engineers. Charlotte. North Carolina USA. p. 330. 2006.
5. U. Somnuk, N. Suppakarn, W. Sutapun, and Y. Ruksakulpiwat. *Injection Molding of Vetiver Grass-Polypropylene Composites: Effect of Particle Sizes on Rheological, Thermal, and Mechanical Properties*. **The 28th Australasian Polymer Symposium (APS2006)**. Rotorua. New Zealand. p. 8. 2006.
6. Y. Ruksakulpiwat, U. Somnuk, P. Phinyocheep, N. Suppakarn, and W. Sutapun. *Effect of Particle Sizes of Vetiver Grass on Shear-Induced Crystallization of Injection Molded Vetiver Grass-Polypropylene Composites*. **The 28th Australasian Polymer Symposium (APS2006)**. Rotorua. New Zealand. p. 9. 2006.
7. N. Suppakarn, S. Sanmaung, Y. Ruksakulpiwat, W. Sutapun, C. Lorprayoon, and S. Ekgasit. *Effect of Water Absorption and Silane coupling agent on Tensile Properties of Hydroxyapatite/PP Composites*. **The 28th Australasian Polymer Symposium (APS2006)**. Rotorua. New Zealand. p. 27. 2006.
8. W. Sutapun, Y. Ruksakulpiwat, K. Jarukumjorn, N. Suppakarn, P. Chumsamrong, and J. Kluengsamrong. *Studies of Thermal Properties and Surface Characteristics of Pretreated and Silane-Treated Rosell Fibers*. **The 31st Congress on Science and Technology of Thailand**. Nakhon Ratchasima. Thailand. p. 241. 2005

9. Ruksakulpiwat, J. Kluengsamrong, U. Somnuk, W. Sutapun, and N. Suppakarn. *Comparison of Rheology Properties and Mechanical Properties of Polypropylene Composites from Various Types of Natural Fibers. The 31st Congress on Science and Technology of Thailand.* Nakhon Ratchasima, Thailand. p. 221. 2005.
10. U. Somnuk, W. Sutapun, N. Suppakarn, P. Phiryocheep, and Y. Ruksakulpiwat. *Effect of Processing Conditions on Shear-induced Crystallization of Vetiver Grass-Polypropylene /Composites. The 31st Congress on Science and Technology of Thailand.* Nakhon Ratchasima, Thailand. p. 221. 2005.
11. K. Jarukunjorn, W. Sutapun, Y. Ruksakulpiwat, and J. Kluengsamrong. *Short Rossells Fiber/Polypropylene Composites: Effect of Compatibilizer on Mechanical and Rheological Properties, and Heat Distortion Temperature. The 31st Congress on Science and Technology of Thailand.* Nakhon Ratchasima, Thailand. p. 227. 2005.
12. Y. Ruksakulpiwat, J. Kluengsamrong, W. Sutapun, and N. Suppakarn. *Injection Molding of Rossells-Polypropylene Composites: Effect of Processing Parameters on Mechanical Properties. The 31st Congress on Science and Technology of Thailand.* Nakhon Ratchasima, Thailand. p. 227. 2005.
13. P. Chumsamrong, W. Sutapun, Suriya Kiaw-on, and W. Tonukoon. *Influence of Alkali-Treated Rossells Fibers on The Tensile Properties of Unsaturated Polyester. The 31st Congress on Science and Technology of Thailand.* Nakhon Ratchasima, Thailand. p. 234. 2005.
14. N. Suppakarn, W. Sutapun, Suriya Kiaw-on, and W. Tonukoon. *Effect of Fiber Content and Fiber Treatment on Mechanical Properties of Rossells Fiber-Epoxy Composite. The 31st Congress on Science and Technology of Thailand.* Nakhon Ratchasima, Thailand. p. 237. 2005.
15. N. Suppakarn, J. Rittita, Y. Ruksakulpiwat, W. Sutapun, and C. Lorprayoon. *Effect of Filler Particle size on Mechanical Properties of Cattle Bone Based Hydroxyapatite-Polypropylene Composite. The 31st Congress on Science and Technology of Thailand.* Nakhon Ratchasima, Thailand. p. 242. 2005.

16. Y. Ruksakulpiwat, W. Thomthong, A. Thitichaisri, W. Sutapun, and N. Suppakarn. *Natural Rubber: an Impact Modifier for Vetiver Grass-Polypropylene Composites*. **The 31st Congress on Science and Technology of Thailand**. Nakhon Ratchasima. Thailand. p. 243. 2005.
17. ขุพาทกร รักษกุลพิวัฒน์, กษมา จารุกัจจร, จันทิมา ดีประเสริฐกุล, นิธินาถ ศุภกาญจน์, ปรางณี ชุมสำโรง, วิมลลักษณ์ สุตะพันธ์. "เส้นใยธรรมชาติ...ทางเลือกใหม่สำหรับพอลิเมอร์เชิงประกอบ". *วิศวกรรมสาร*. 57. 44. 2547.
18. W. Sutapun, Y. Ruksakulpiwat, K. Jarukumjorn, N. Supakarn, P. Chumsamrong, and J. Kluengsamrong. "Studies of Thermal Properties and Surface Characteristics of Pretreated Jute Fibers by Boiling and Soxhlet Extraction". **The 30th Congress on Science and Technology of Thailand**. Bangkok. Thailand. p. 175. 2004
19. Y. Ruksakulpiwat, N. Suppakarn, W. Sutapun, and W. Thomthong. "The Study of Using Vetiver Grass as a Filler in Polypropylene Composites". **Annual Technical Conference 2004**. The Society of Plastics Engineers. ***city. state USA. p. ***. 2004.
20. W. Thuamthong, Y. Ruksakulpiwat, N. Suppakarn, and W. Sutapun. "Effect of Vetiver Contents and Vetiver Lengths on Mechanical and Morphological Properties of Vetiver-Polypropylene Composites". **The Third Thailand Materials Science and Technology Conference**. Bangkok. Thailand. p. 167. 2004.
21. U. Somnuk, Y. Ruksakulpiwat, N. Suppakarn, and W. Sutapun. "Characterization of Chemical Treated Vetiver Grass". **The Third Thailand Materials Science and Technology Conference**. Bangkok. Thailand. p. 420. 2004.
22. W. Thuamthong, Y. Ruksakulpiwat, W. Sutapun, and N. Suppakarn. "Thermal, Rheological, Mechanical, and Morphological Properties of Vetiver-Polypropylene Composites" **The 8th Pacific Polymer Conference (PPC8)**. Bangkok. Thailand. p. 118. 2003
23. W. Noobut and J. L. Koenig. *Interfacial Behavior of Epoxy/E-glass Fiber Composites under Wet-Dry Cycles by FTIR Microspectroscopy*. **Polymer Composite**. 20. 38. 1999.

6. รางวัล

Certificates of Excellence for the King of Thailand Vetiver Awards. The Chaipattana Foundation / An investigation of using vetiver grass in polypropylene composites

7. หน่วยงานที่อยู่ติดต่อได้พร้อมโทรศัพท์และโทรสาร

สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถ. มหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง นครราชสีมา 30000

โทรศัพท์ (044) 224435 โทรสาร (044) 224431

E-mail: wimonlak@sut.ac.th