

บทที่ 3

การศึกษาสมบัติของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยฝ้ายไหม

3.1 ขอบเขตการวิจัย

- เตรียมวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยฝ้ายไหม โดยใช้ฝ้ายไหมสองชนิด คือฝ้ายไหมที่ไม่ผ่านการดัดแปรและที่ผ่านการดัดแปรด้วยสารคู่ควาไซเลน
- ทดสอบสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และสัญญาณวิทยา ของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยฝ้ายไหม

3.2 การทดลอง

3.2.1 วัตถุดิบและสารเคมี

- ฝ้ายไหม (silk fabric) ทอหลายหนึ่ง (plain weaving silk) สายพันธันางน้อย ขนาด 30 x 30 ตารางเซนติเมตร จากกลุ่มแม่บ้านทอผ้าสัมปออย อ. ราชสีเสล จ. ศรีสะเกษ
- อีพอกซีเรซิน (EPOTEC YD127) จากบริษัท Thai Organics Chemical Co., Ltd.
- เททราเอทิลีนเททราไมน์ (tetraethylenetetramine, TETA) จากบริษัท Vista Co., Ltd.
- สารลดฟองอากาศ (defoamer BYK A560) จากบริษัท Coloshal International Co., Ltd.

3.2.2 การเตรียมอีพอกซีวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยฝ้ายไหม

ในการเตรียมอีพอกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยฝ้ายไหม อีพอกซีเรซินและตัวเร่งแข็งเททราเอทิลีนเททราไมน์ถูกผสมในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 100:13.2 เพื่อเตรียมอีพอกซีเมทริกซ์ โดยก่อนการผสมหยดสารลดฟองอากาศ 0.0015 ลูกบาศก์เซนติเมตร ลงในอีพอกซีเรซิน จากนั้นคนและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อลดปริมาณฟองอากาศในอีพอกซีเรซิน แล้วจึงนำไปผสมกับเททราเอทิลีนเททราไมน์

การขึ้นรูปอีพอกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีใช้วิธีการลามิเนตด้วยมือ (hand lay-up lamination) สำหรับการเสริมแรงวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีใช้ฝ้ายไหม 2 ชนิด คือ ฝ้ายไหมที่ยังไม่ผ่านการดัดแปร (untreated-silk fabric, UT-SF) และ ฝ้ายไหมที่ผ่านการดัดแปรด้วย 3-อิมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (silane treated-silk fabric, ST-SF) และใช้สัดส่วนมวล (weight fraction) ของฝ้ายไหมเป็น 0.18, 0.30 และ 0.35 เทียบกับปริมาณอีพอกซีเมทริกซ์

อีพอกซีที่ไม่ได้เสริมแรงด้วยฝ้ายไหมและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยฝ้ายไหมจะถูกปล่อยให้แข็งตัวในแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงแกะออกจากแม่พิมพ์แล้วนำไปอบบ่ม (post cured) ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นอีพอกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยฝ้ายไหมจะถูกตัดให้ได้ขนาดของชิ้นทดสอบสำหรับทดสอบสมบัติด้านต่าง ๆ ในขั้นตอนต่อไป

3.2.3 การทดสอบสมบัติอีพอกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหม

3.2.3.1 การทดสอบความทนต่อแรงดึง (Tensile Test)

ทดสอบด้วยเครื่อง universal testing machine (Instron 5569) Load cell เท่ากับ 50 กิโลนิวตัน โดยใช้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D5083 ภายใต้งauge length 50 เซนติเมตร และอัตราเร็วในการดึง 5 มิลลิเมตรต่อนาที

3.2.3.2 การทดสอบความทนต่อแรงดัด (Flexural Test)

ทดสอบด้วยเครื่อง universal testing machine (Instron 5569) Load cell เท่ากับ 50 กิโลนิวตัน โดยใช้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D790 ภายใต้อัตราเร็วในการกด 2.65 มิลลิเมตรต่อนาที และระยะระหว่างแท่นค้ำยัน (support span) 96 มิลลิเมตร

3.2.3.3 การทดสอบความทนต่อแรงตกกระแทก (Impact Test)

ทดสอบด้วยเครื่อง pendulum impact tester (Atlas BPI BP-2011) โดยใช้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D256 วางชิ้นทดสอบในแนวตั้ง และไม่บากชิ้นทดสอบ

3.2.3.4 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

ทดสอบสมบัติทางความร้อนโดยการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน ด้วยเครื่อง thermogravimetric analyzer (TA Instruments, SDT 2960) โดยให้ความร้อนแก่ตัวอย่างด้วยอัตราเร็วคงที่ 20 องศาต่อนาที ภายใต้อากาศก๊าซไนโตรเจน ตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง 800 องศาเซลเซียส

ทดสอบสมบัติทางความร้อนโดยวิเคราะห์พลังงานภายใต้ความร้อน ด้วยเครื่อง differential scanning calorimeter (Perkin Elmer, DSC7) โดยให้ความร้อนแก่ตัวอย่างด้วยอัตราเร็วคงที่ 20 องศาต่อนาที ภายใต้อากาศก๊าซไนโตรเจนตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง 250 องศาเซลเซียส

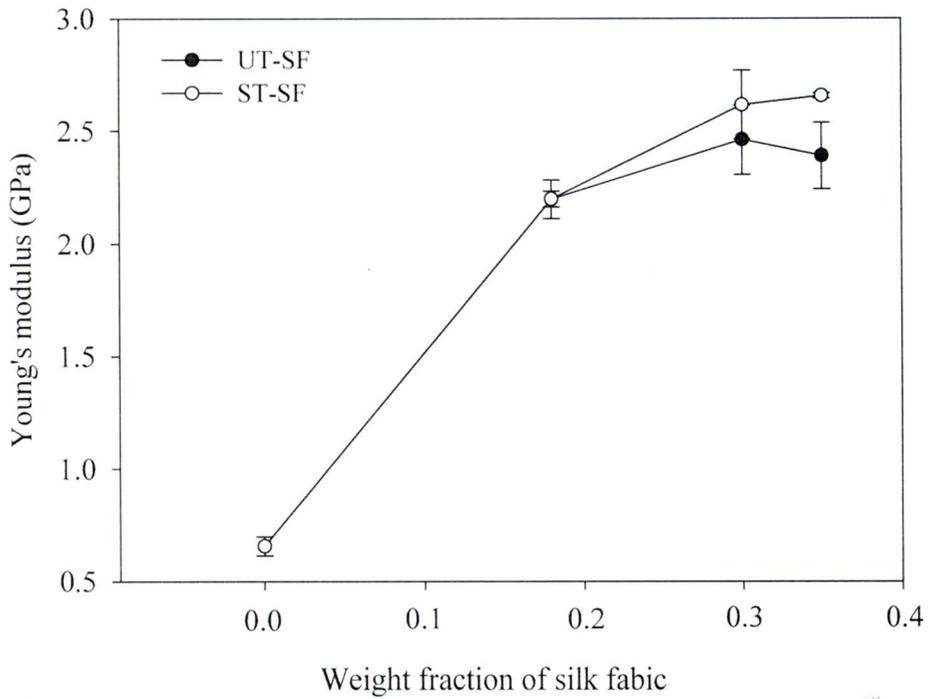
3.2.3.5 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา

ทดสอบด้วยเครื่อง scanning electron microscope (Jeol, JSM 6400) ที่ 10 kV โดยศึกษาพื้นผิวที่แตกหักของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่ผ่านการทดสอบความทนต่อแรงดัด ชิ้นทดสอบถูกเคลือบด้วยทองเพื่อหลีกเลี่ยงการ charge ของอิเล็กตรอน และเพิ่ม contrast

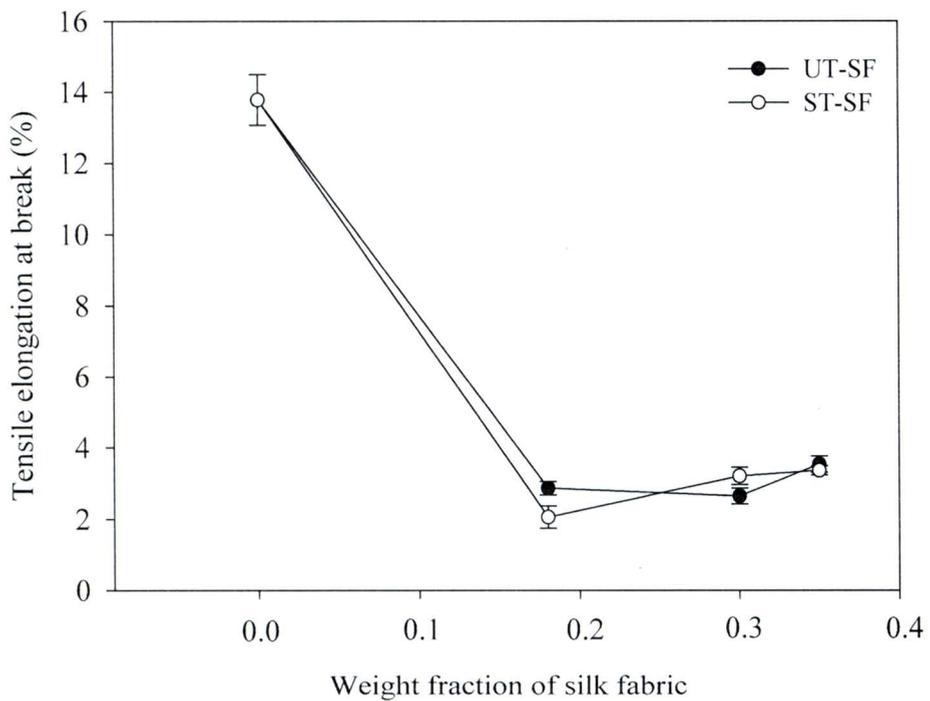
3.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

3.3.1 สมบัติทางกลของอีพอกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไหม

จากรูปที่ 3.1 วัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมทั้งแบบ UT-SF และ ST-SF มีค่ามอดูลัสของยังก์ (Young's modulus) เพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนโดยมวลของเส้นใยไหมเพิ่มขึ้น และ วัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ ST-SF มีค่ามอดูลัสของยังก์มากกว่าวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ UT-SF เล็กน้อย การยืดออกได้ก่อนขาด (elongation at break) ของอีพอกซีมีค่าสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมทั้งแบบ UT-SF และ ST-SF โดยวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไหมทั้งแบบ UT-SF และ ST-SF มีค่าการยืดออกก่อนขาดไม่แตกต่างกันมีนัยสำคัญเมื่อสัดส่วนโดยมวลของเส้นใยไหมมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.2

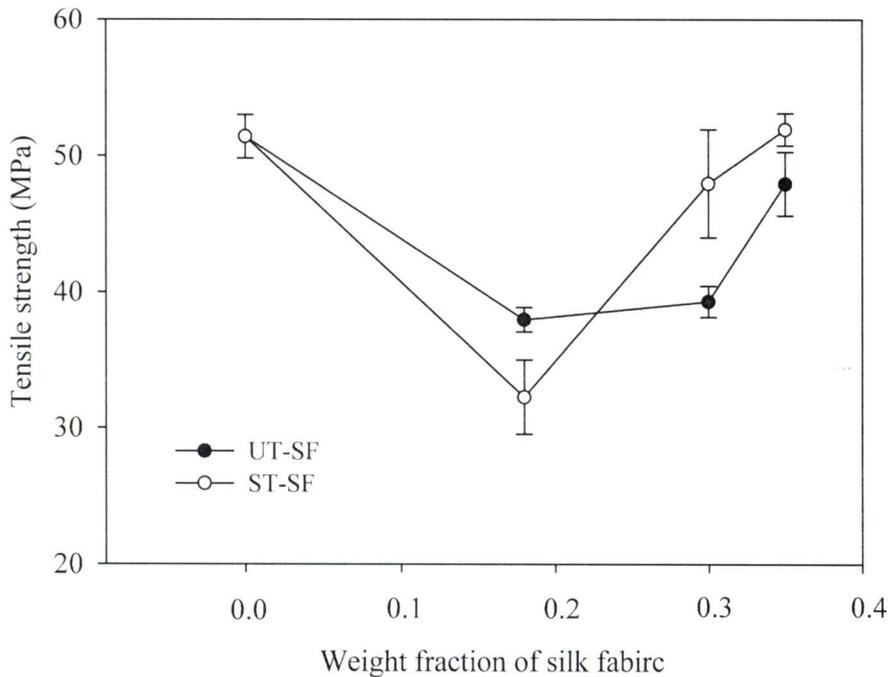


รูปที่ 3.1 กราฟระหว่างค่ามอดูลัสของยังก์ (Young's modulus) และสัดส่วนโดยมวลของฝืนผ้าไหมของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยฝืนผ้าไหมแบบ UT-SF และ แบบ ST-SF



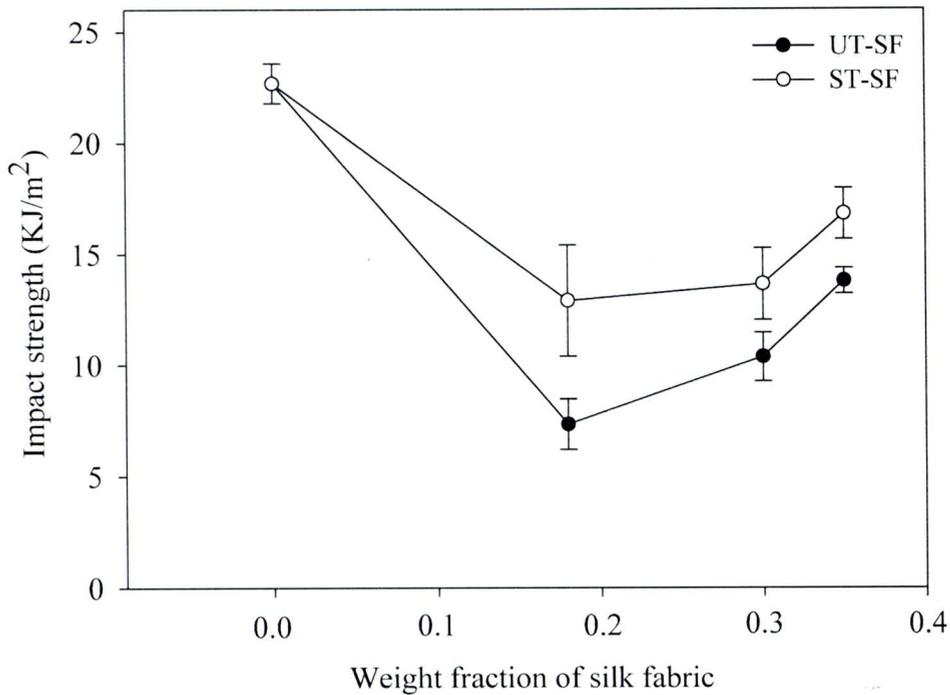
รูปที่ 3.2 กราฟระหว่างค่าการยืดออกก่อนขาด (elongation at break) และสัดส่วนโดยมวลของฝืนผ้าไหมของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยฝืนผ้าไหมแบบ UT-SF และ แบบ ST-SF

จากรูปที่ 3.3 ความทนต่อแรงดึง (tensile strength) ของอีพอกซีมีค่าสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมทั้งแบบ UT-SF และ ST-SF โดยวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไหมทั้งแบบ UT-SF และ ST-SF มีค่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนโดยมวลของเส้นใยไหมเพิ่มขึ้น และที่สัดส่วนของเส้นใยไหมเท่ากับ 0.35 ความทนต่อแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีมีค่าใกล้เคียงกับความทนต่อแรงดึงของอีพอกซี นอกจากนี้วัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ ST-SF มีค่าความทนต่อแรงดึงมากกว่าวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ UT-SF เล็กน้อยเมื่อสัดส่วนโดยมวลของเส้นใยไหมเท่ากับหรือมากกว่า 0.3



รูปที่ 3.3 กราฟระหว่างความทนต่อแรงดึง (tensile strength) และสัดส่วนโดยมวลของเส้นใยไหมของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ UT-SF และ แบบ ST-SF

ค่าความทนต่อแรงกระแทก (impact strength) ของอีพอกซีมีค่าสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมทั้งแบบ UT-SF และ ST-SF ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.4 อย่างไรก็ตามเมื่อสัดส่วนโดยมวลของเส้นใยไหมของ UT-SF และ ST-SF เพิ่มขึ้นจาก 0.18 เป็น 0.35 ส่งผลให้ค่าความทนต่อแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไหม UT-SF และ ST-SF เพิ่มขึ้นเป็น 14 kJ/m^2 และ 17 kJ/m^2 ตามลำดับ นอกจากนี้ค่าความทนต่อแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ ST-SF มีค่ามากกว่าวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ UT-SF ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยไหมด้วยสารเคลือบไซเลนส่งผลให้ interfacial void ที่บริเวณพื้นผิวระหว่างเส้นใยไหมและอีพอกซีลดลง และเมื่อปริมาณของเส้นใยเพิ่มขึ้นระยะห่างกันระหว่างชั้นน้อยลง ชั้นใยไหมสามารถดูดซับพลังงานที่ทำให้เกิดก่อนการแตกหักได้ และเป็นชั้นที่หยุดการโตของรอยแตก (crack propagation) ในอีพอกซีเมทริกซ์ ส่งผลต่อค่าความทนต่อแรงกระแทกที่มากขึ้นอันเนื่องมาจากปริมาณเส้นใยไหมที่เพิ่มขึ้น ด้วยเหตุผลเดียวกันนี้ที่ความทนต่อแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมสูงขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยไหมเพิ่มขึ้น

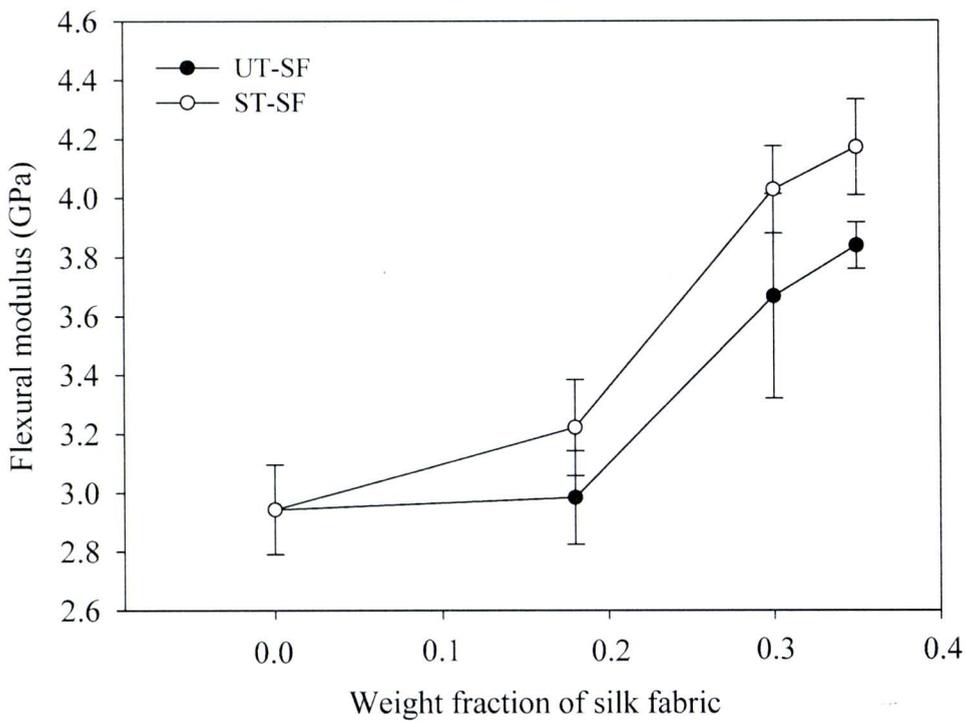


รูปที่ 3.4 กราฟระหว่างความทนต่อแรงกระแทก (impact strength) และสัดส่วนโดยมวลของฝืนผ้าไหม ของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยฝืนผ้าไหมแบบ UT-SF และ แบบ ST-SF

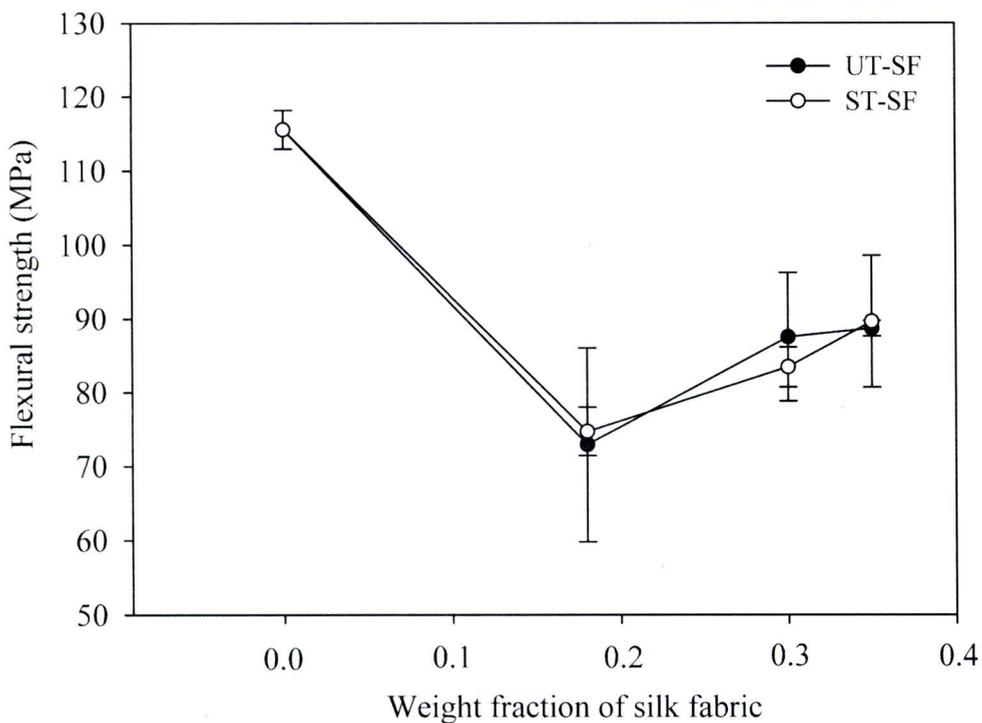
จากรูปที่ 3.5 ค่ามอดุลัสแรงดัด (flexural modulus) ของอีพอกซีมีค่าต่ำกว่าวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยฝืนผ้าไหมทั้งแบบ UT-SF และ ST-SF โดยวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยฝืนผ้าไหมแบบ ST-SF มีค่ามอดุลัสแรงดัดสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยฝืนผ้าไหมแบบ UT-SF และมอดุลัสแรงดัดของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนโดยมวลของฝืนผ้าไหมที่เพิ่มขึ้น

วัสดุอีพอกซีเชิงประกอบเสริมแรงด้วยฝืนผ้าไหมทั้งแบบ UT-SF และ ST-SF มีค่าความทนต่อแรงดัด (flexural strength) น้อยกว่าอีพอกซี อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มสัดส่วนโดยมวลของฝืนผ้าไหมวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีมีความทนต่อแรงดัดเพิ่มขึ้น และ วัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยฝืนผ้าไหมแบบ ST-SF มีค่าความทนต่อแรงดัดไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจากวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยฝืนผ้าไหมแบบ UT-SF ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.6

สมบัติความทนต่อแรงดึง ความทนต่อแรงดัด และ ความทนต่อแรงกระแทก ของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยฝืนผ้าไหมแบบ UT-SF และ ST-SF สรุปดังในตารางที่ 3.1

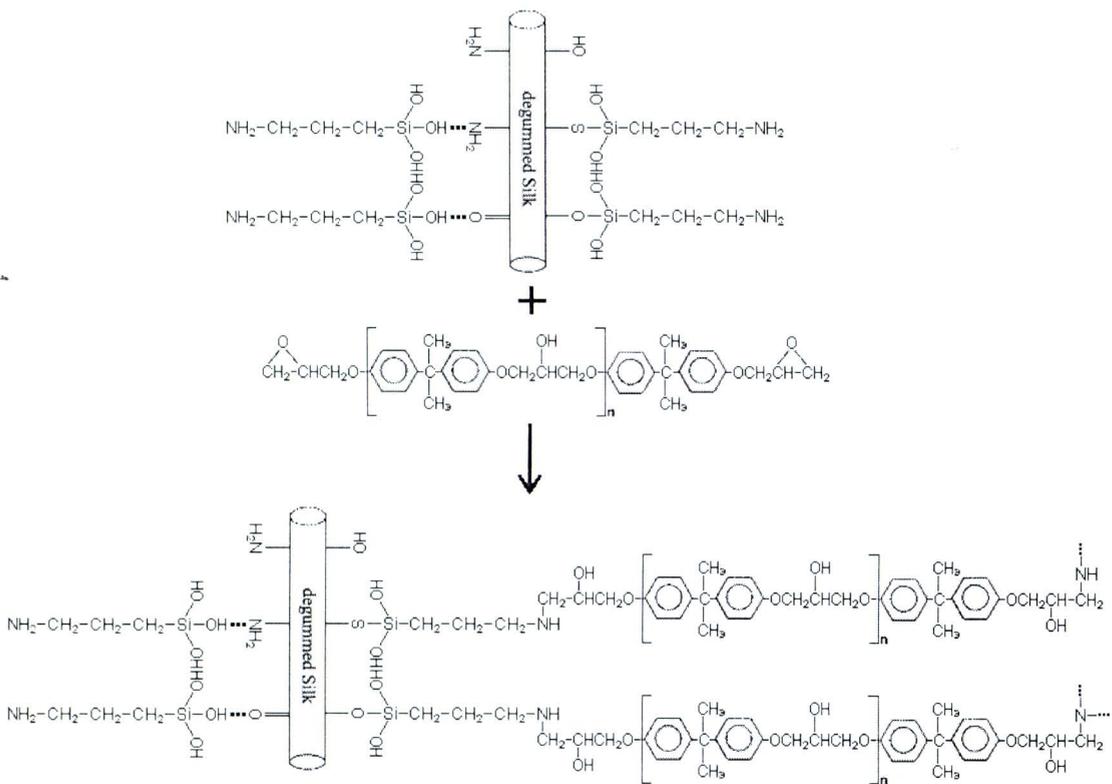


รูปที่ 3.5 กราฟระหว่างมอดูลัสแรงดัด (flexural modulus) และสัดส่วนโดยมวลของฝืนผ้าไหม ของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยฝืนผ้าไหมแบบ UT-SF และ แบบ ST-SF



รูปที่ 3.6 กราฟระหว่างความทนต่อแรงดัด (flexural strength) และสัดส่วนโดยมวลของฝืนผ้าไหม ของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยฝืนผ้าไหมแบบ UT-SF และ แบบ ST-SF

การปรับปรุงพื้นผิวไหมด้วยสารประสานซิลเลน APTES ส่งผลต่อการปรับปรุงสมบัติความทนแรงดึง และความทนต่อการกระแทกของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซี แสดงให้เห็นว่าสารประสานซิลเลนทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมทางเคมี (chemical bridge) ระหว่างอีพอกซีเมทริกซ์และพื้นผิวเส้นไหมดังแสดงในแผนภาพที่ 3.1 พื้นผิวเส้นไหมมีหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl groups) [1] และ หมู่ $-SH$ เป็นองค์ประกอบจากหน่วยซ้ำของ ซีรีน (serine) และ ซิสเตอีน (cysteine) และส่วนที่เป็นกรดอะมิโน (amino acid) ที่ประกอบ คาร์บอนิล (carbonyl group) และเอมีน (amine group) [2] กรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบของเส้นไหม คือ ไกลซีน (glycine) อลานีน (alanine) ซีรีน ซิสเตอีน และ ลิวซีน (leucine) [3] หมู่ซิลานอล (silanol group) ของสารประสานซิลเลนสามารถควบแน่นกับ หมู่ไฮดรอกซิล และ $-SH$ หรือ สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bonding) กับ คาร์บอนิล (carbonyl group) และเอไมด์ นอกจากนี้สารประสานซิลเลนนี้ที่ปลายอีกด้านหนึ่งของโมเลกุล เป็น หมู่เอมีน ($-NH_2$) ที่สามารถเกิดพันธะเคมีกับอีพอกซีได้ คือ สามารถทำปฏิกิริยาเปิดวงแหวนอีพอกไซด์ของอีพอกซีเรซินเกิดเป็นพันธะเคมีในลักษณะเดียวกับสารเร่งการแข็งตัวของอีพอกซีเรซิน



แผนภาพที่ 3.1 ปฏิกิริยาระหว่างวงแหวนอีพอกไซด์ของอีพอกซีเรซินกับหมู่เอมีนของสารประสาน APTES

ตารางที่ 3.1 สมบัติความทนต่อแรงดึง ความทนต่อแรงตัด และ ความทนต่อแรงกระแทก ของอีพอกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ UT-SF และ แบบ ST-SF

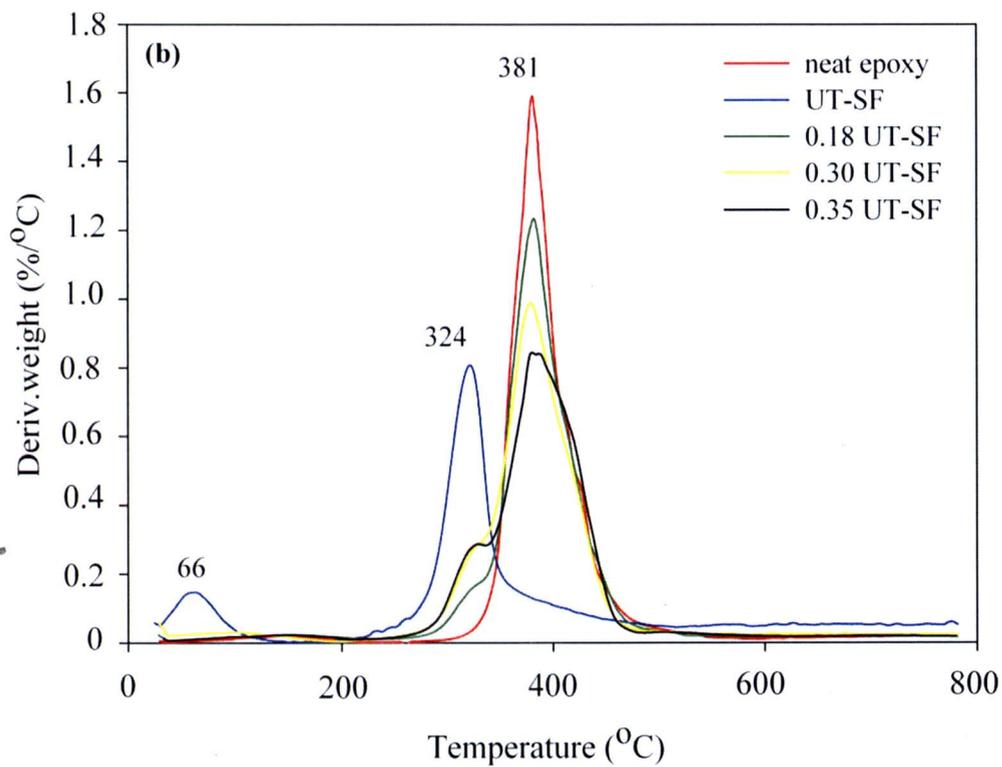
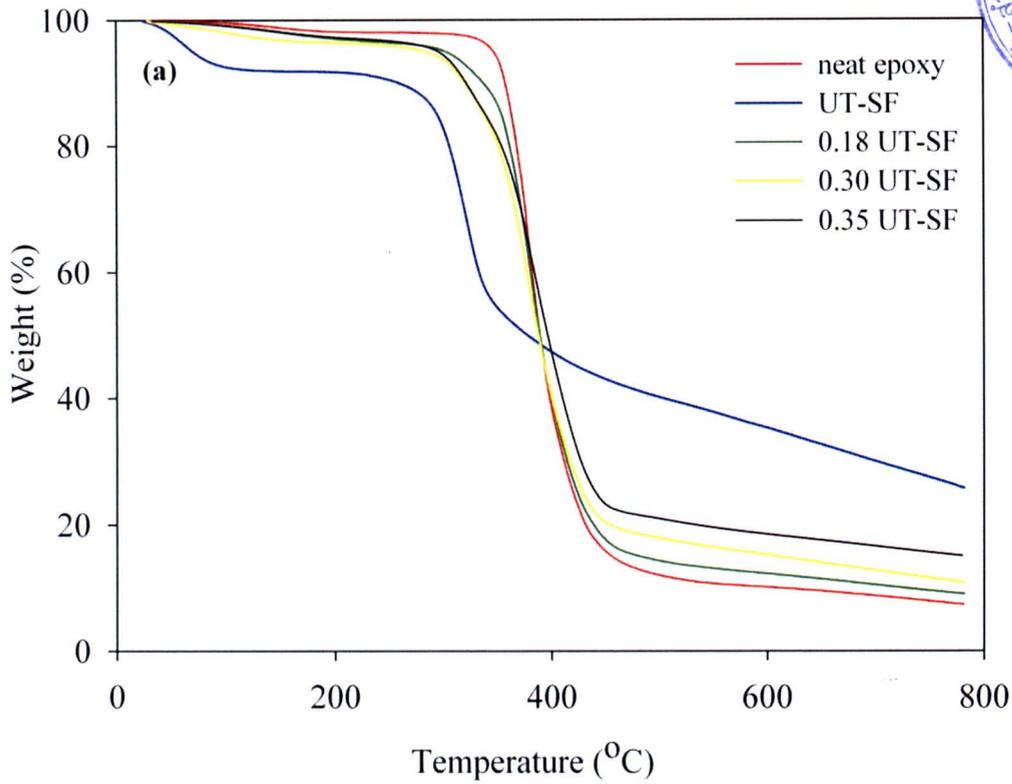
weight fraction of silk fabric	Young's modulus (GPa)		Tensile strength (MPa)		Impact strength (kJ/m ²)		Flexural modulus (GPa)		Flexural strength (MPa)	
	UT-SF	ST-SF	UT-SF	ST-SF	UT-SF	ST-SF	UT-SF	ST-SF	UT-SF	ST-SF
0.00	0.66±0.04	0.66±0.04	51.41±1.59	51.41±1.59	22.67±0.90	22.67±0.90	2.94±0.15	2.94±0.15	115.53±2.64	115.53±2.64
0.18	2.20±0.08	2.20±0.03	37.96±0.90	32.26±2.74	7.33±1.13	12.90±2.50	2.98±0.15	3.22±0.16	72.9±13.11	74.70±3.31
0.30	2.46±0.15	2.62±0.15	39.29±1.14	47.96±3.96	10.36±1.10	13.65±1.62	3.67±0.34	4.03±0.14	87.51±8.70	83.43±2.71
0.35	2.39±0.15	2.66±0.01	47.94±2.34	51.94±1.17	13.79±0.58	16.81±1.14	3.84±0.07	4.17±0.16	88.68±1.04	89.61±8.94

3.3.2 สมบัติทางความร้อนของอีพอกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยผิผ้าไหม

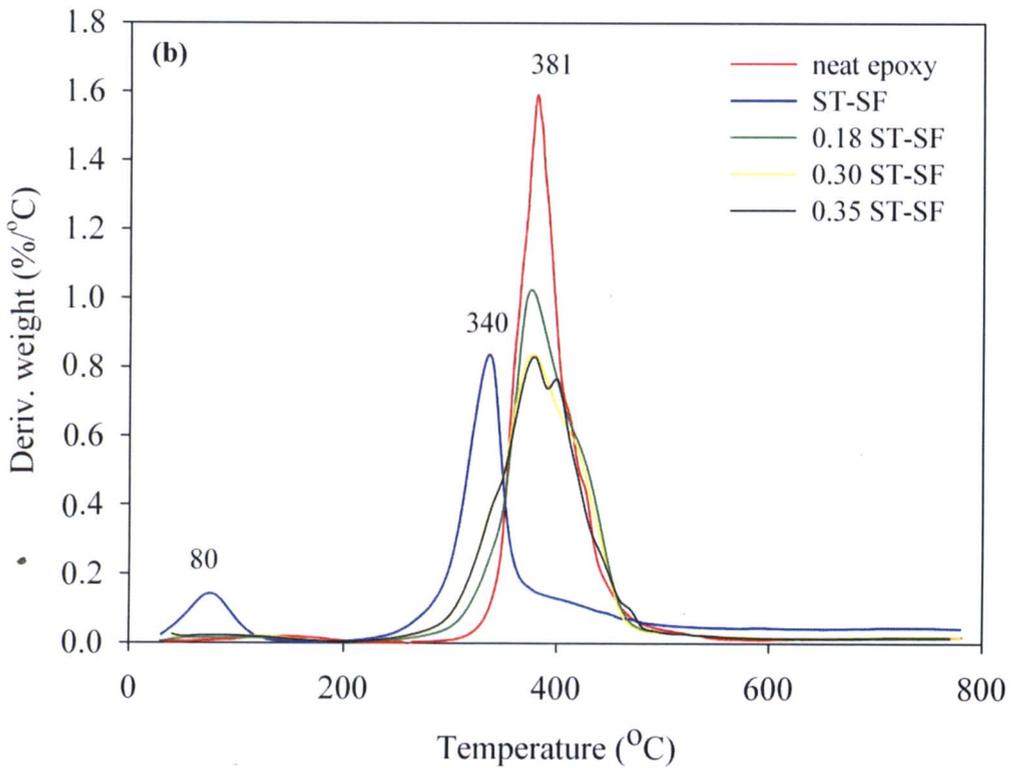
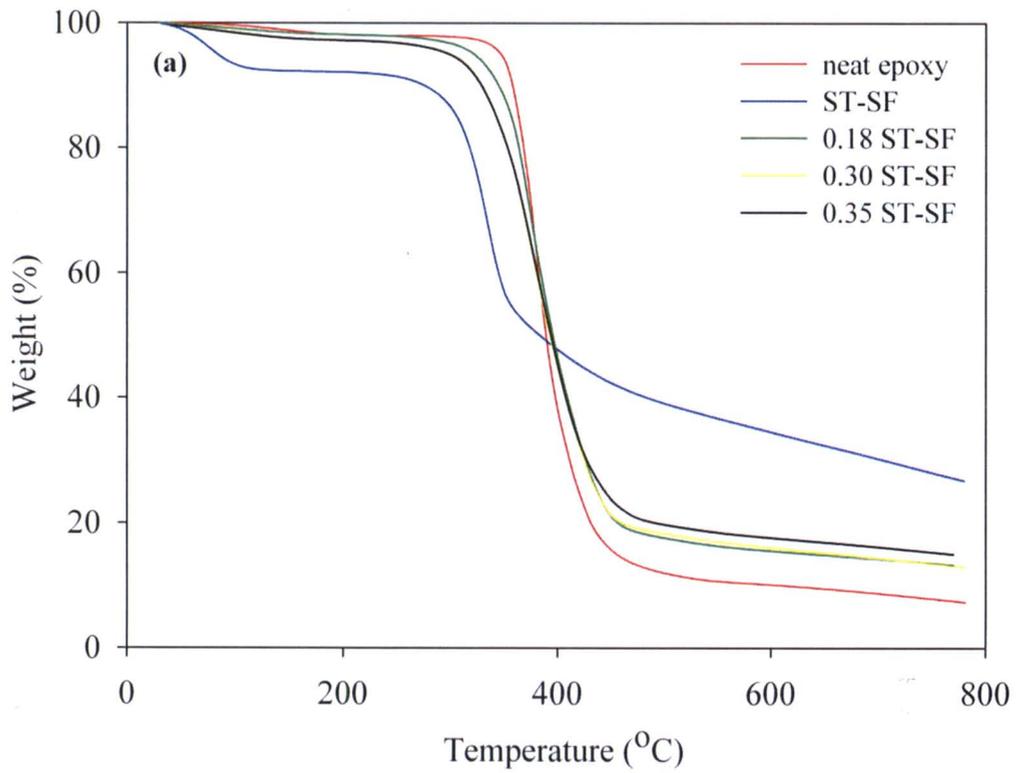
กราฟ TGA และ DTGA จากการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน ของผิผ้าไหมแบบ UT-SF, อีพอกซี และวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยผิผ้าไหมแบบ UT-SF แสดงในรูปที่ 3.7 จากกราฟ TGA และ DTGA ของผิผ้าไหมแบบ UT-SF แสดงให้เห็นว่ามีการเกิดทรานซิชันเนื่องจากความร้อน (thermal transition) 2 ช่วง ระหว่างอุณหภูมิ 30-800 องศาเซลเซียส อุณหภูมิทรานซิชันที่ 1 (the first transition temperature) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส เนื่องจากการระเหยออกของความชื้นที่อยู่ในผิผ้าไหม อุณหภูมิทรานซิชันที่ 2 (the second transition temperature) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 324 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเสื่อมสลายของผิผ้าไหมแบบ UT-SF [4] และจากกราฟ TGA และ DTGA ของอีพอกซีแสดงให้เห็นอุณหภูมิการเสื่อมสลายของอีพอกซีที่ 381 องศาเซลเซียส สำหรับกราฟ TGA และ DTGA ของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยผิผ้าไหมแบบ UT-SF แสดงการเกิดทรานซิชันเนื่องจากความร้อน (thermal transition) 3 ช่วง อุณหภูมิทรานซิชันที่ 1 เกิดจากการระเหยออกของความชื้นของวัสดุเชิงประกอบที่อุณหภูมิระหว่าง 60-210 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิทรานซิชันที่ 2 เกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 220-340 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเสื่อมสลายไปของผิผ้าไหม UT-SF อย่างไรก็ตามที่สัดส่วนโดยมวลของผิผ้า UT-SF ที่ 0.30 และ 0.35 การเสื่อมสลายในช่วงนี้จะสังเกตเห็นเป็นเพียงไหล่พิค (shoulder peak) ของเส้นกราฟ DTGA เท่านั้นสำหรับสัดส่วนโดยมวลของผิผ้า UT-SF ที่ 0.18 ทรานซิชันนี้ยากที่จะสังเกตเห็นเนื่องจากพิคส่วนนี้รวมเข้ากับพิคของการเสื่อมสลายของอีพอกซี การเสื่อมสลายของอีพอกซีเกิดขึ้นที่อุณหภูมิทรานซิชันที่ 3 (the third transition temperature) ในช่วง 350-450 องศาเซลเซียส โดยตำแหน่งของพิคปรากฏที่ 381 องศาเซลเซียส

กราฟ TGA และ DTGA ของ ผิผ้าไหมแบบ ST-SF, อีพอกซี และวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยผิผ้าไหมแบบ ST-SF แสดงในรูปที่ 3.8 กราฟ TGA และ DTGA ของผิผ้าไหมแบบ ST-SF แสดงให้เห็นว่ามีแสดงให้เห็นว่ามีการเกิดทรานซิชันเนื่องจากความร้อน (thermal transition) 2 ช่วง อุณหภูมิทรานซิชันที่ 1 เกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส เนื่องจากการระเหยออกของความชื้นที่อยู่ในผิผ้าไหม อุณหภูมิทรานซิชันที่ 2 เกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 340 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเสื่อมสลายของผิผ้าไหมแบบ ST-SF กราฟ TGA และ DTGA ของอีพอกซีแสดงให้เห็นอุณหภูมิทรานซิชันที่อุณหภูมิ 381 องศาเซลเซียส [5] เนื่องมาจากการเสื่อมสลายของอีพอกซีนั่นเอง สำหรับกราฟ TGA และ DTGA ของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยผิผ้าไหมแบบ ST-SF แสดงอุณหภูมิทรานซิชันที่ 1 จากการระเหยออกของความชื้นของวัสดุเชิงประกอบที่อุณหภูมิระหว่าง 70-190 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิทรานซิชันที่ 2 ในช่วง 220-350 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเสื่อมสลายของผิผ้าไหม ST-SF สำหรับอุณหภูมิทรานซิชันที่ 3 อยู่ที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 350-450 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเสื่อมสลายของอีพอกซีเมทริกซ์ของวัสดุเชิงประกอบตำแหน่งของพิคโดยประมาณอยู่ที่ 381 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 3.7 และ 3.8 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิทรานซิชันที่ 2 ของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยผิผ้าไหมแบบ ST-SF สูงกว่าของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยผิผ้าไหมแบบ UT-SF แต่อุณหภูมิทรานซิชันที่ 3 ซึ่งเป็นการเสื่อมสลายของอีพอกซีเมทริกซ์ของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยผิผ้าไหมต่างชนิดไม่ได้แตกต่างกัน การดัดแปรผิผ้าไหมด้วยสารคู่ควบ APTES ทำให้อุณหภูมิการเสื่อมสลายเนื่องจากความร้อนของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีสูงขึ้น



รูปที่ 3.7 กราฟ TGA (a) และ DTGA (b) ของผืนผ้าไหมแบบ UT-SF, อีพอกซี และวัสดุเชิงประกอบ อีพอกซีเสริมแรงด้วยผืนผ้าไหมแบบ UT-SF



รูปที่ 3.8 กราฟ TGA (a) และ DTGA (b) ของ UT-SF, อีพอกซี และวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ UT-SF

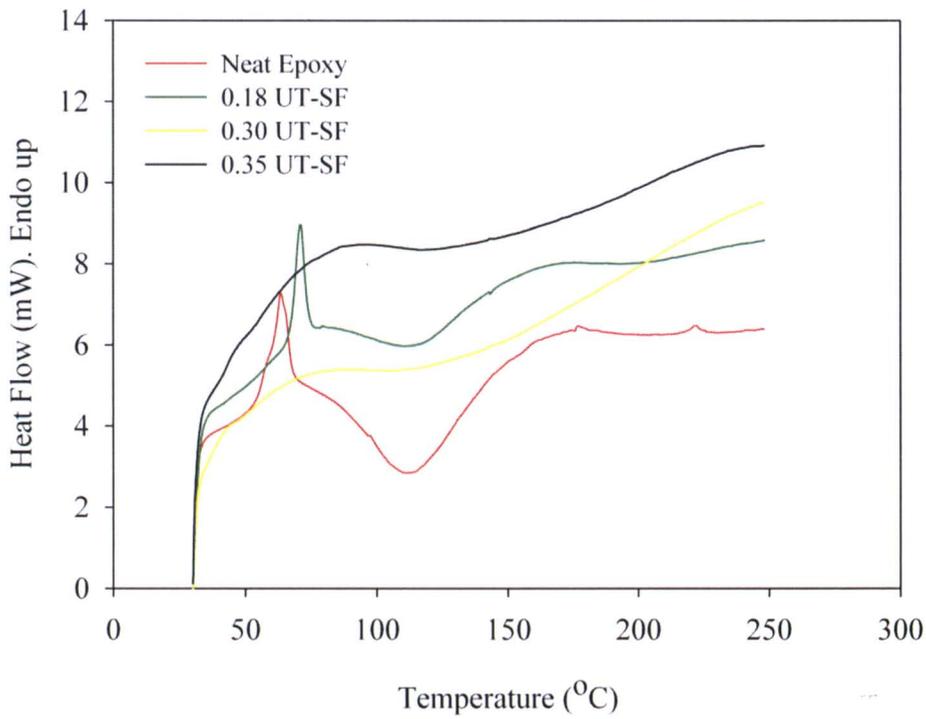
กราฟ DSC thermogram จากการวิเคราะห์พลังงานภายใต้ความร้อนของอีพอกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ UT-SF ก่อนและหลังการอบบ่ม (post cured) แสดงในรูปที่ 3.9 และ 3.10 ตามลำดับ และ กราฟ DSC thermogram ของ อีพอกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ ST-SF ก่อนและหลังการอบบ่มแสดง แสดงในรูปที่ 3.11 และ 3.12 ตามลำดับ อุณหภูมิการเกิดโครงสร้างร่างแห (curing temperature, T_{cure}) ก่อนการอบบ่มและอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะแก้ว (glass transition temperature, T_g) หลังการอบบ่มของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซี แสดงในตารางที่ 3.2

สำหรับอุณหภูมิการเกิดโครงสร้างร่างแห (T_{cure}) ของอีพอกซีต่ำกว่าวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ UT-SF และ ST-SF และ T_{cure} ของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ UT-SF และ ST-SF มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนโดยมวลของเส้นใยไหมมีเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อปริมาณเส้นใยไหมเพิ่มขึ้นอีพอกซีเรซินและสารทำให้เกิดโครงสร้างร่างแห (curing agent) ถูกจำกัดอยู่ระหว่างชั้นของเส้นใยไหม และบางส่วนอาจถูกดูดซับด้วยเส้นใยไหมจึงทำให้อุณหภูมิการเกิดโครงสร้างร่างแหสูงขึ้น สำหรับวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ UT-SF มีค่า T_{cure} สูงกว่าวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ ST-SF เพียงเล็กน้อย

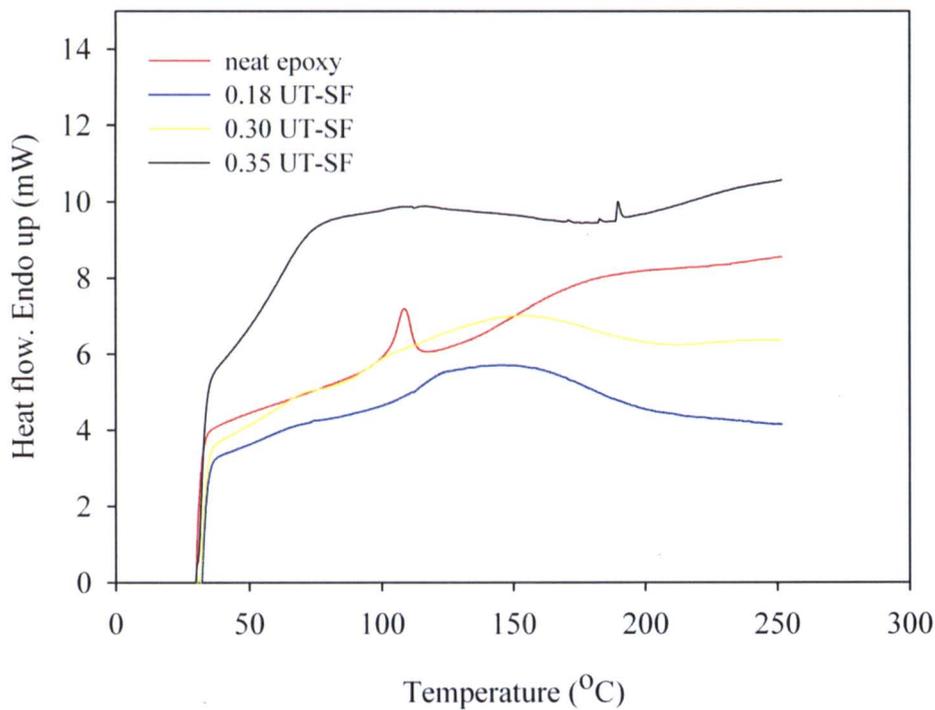
จากตารางที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะแก้ว (T_g) หลังอบบ่มของอีพอกซีสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ UT-SF และ แบบ ST-SF โดยที่ค่า T_g ของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหม ลดลงเมื่อสัดส่วนโดยมวลของเส้นใยไหมเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม T_g ของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ UT-SF และวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ ST-SF ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 3.2 อุณหภูมิการเกิดโครงสร้างร่างแห (T_{cure}) และ อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะแก้ว (T_g) ของ อีพอกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ UT-SF และ แบบ ST-SF

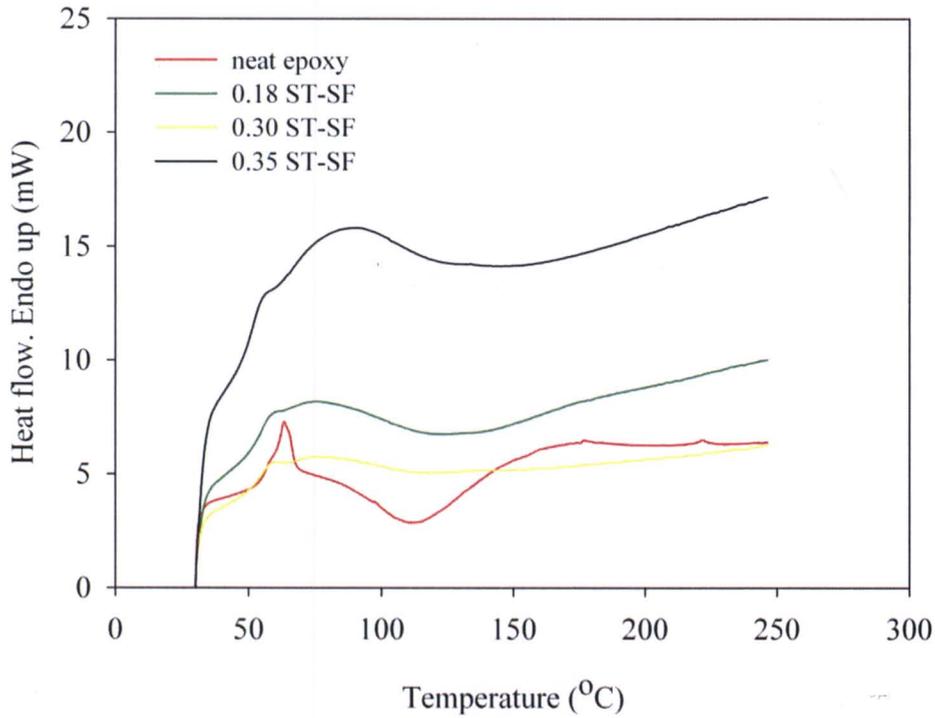
สัดส่วนน้ำหนัก เส้นใยไหม	อุณหภูมิการเกิดโครงสร้างร่างแห (°C)		อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะแก้ว (°C)	
	UT-SF/Epoxy	ST-SF/Epoxy	UT-SF/Epoxy	ST-SF/Epoxy
0.00	105.4	105.4	113.7	113.7
0.18	116.7	114.8	113.5	107.0
0.30	138.0	115.5	101.8	101.2
0.35	154.0	147.6	101.3	98.1



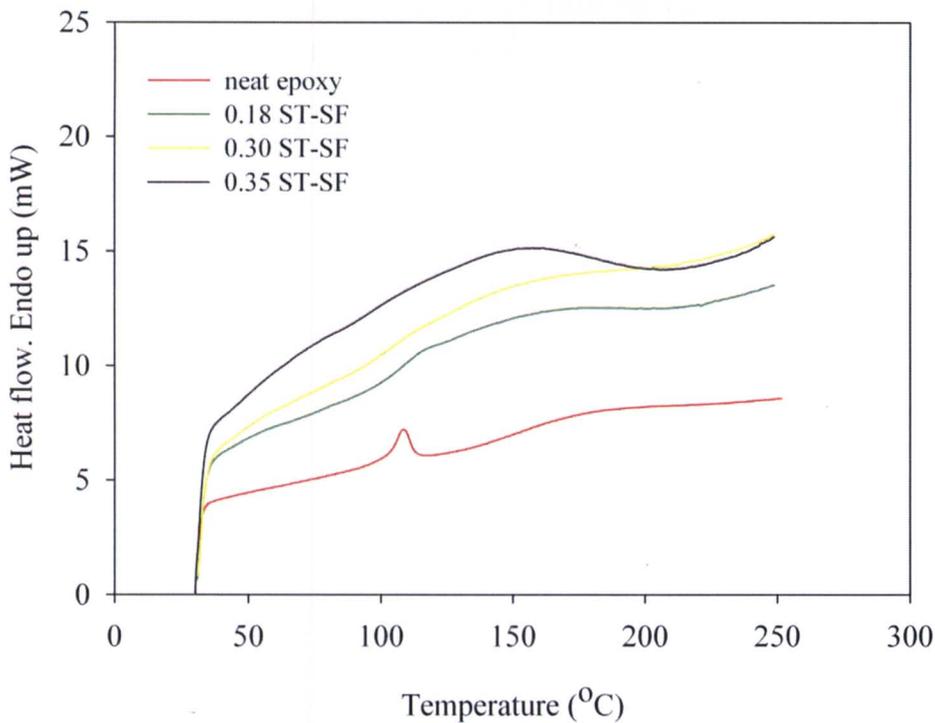
รูปที่ 3.9 กราฟ DSC thermogram ของ อีพอกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ UT-SF ก่อนการอบบ่ม



รูปที่ 3.10 กราฟ DSC thermogram ของ อีพอกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ UT-SF ที่ผ่านการอบบ่ม



รูปที่ 3.11 กราฟ DSC ของ อีพอกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยฟีนผ้าไหมแบบ ST-SF ก่อนการอบบ่ม



รูปที่ 3.12 กราฟ DSC ของ อีพอกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยฟีนผ้าไหมแบบ ST-SF ที่ผ่านการอบบ่ม

3.3.3 สัณฐานวิทยาของอีพอกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหม

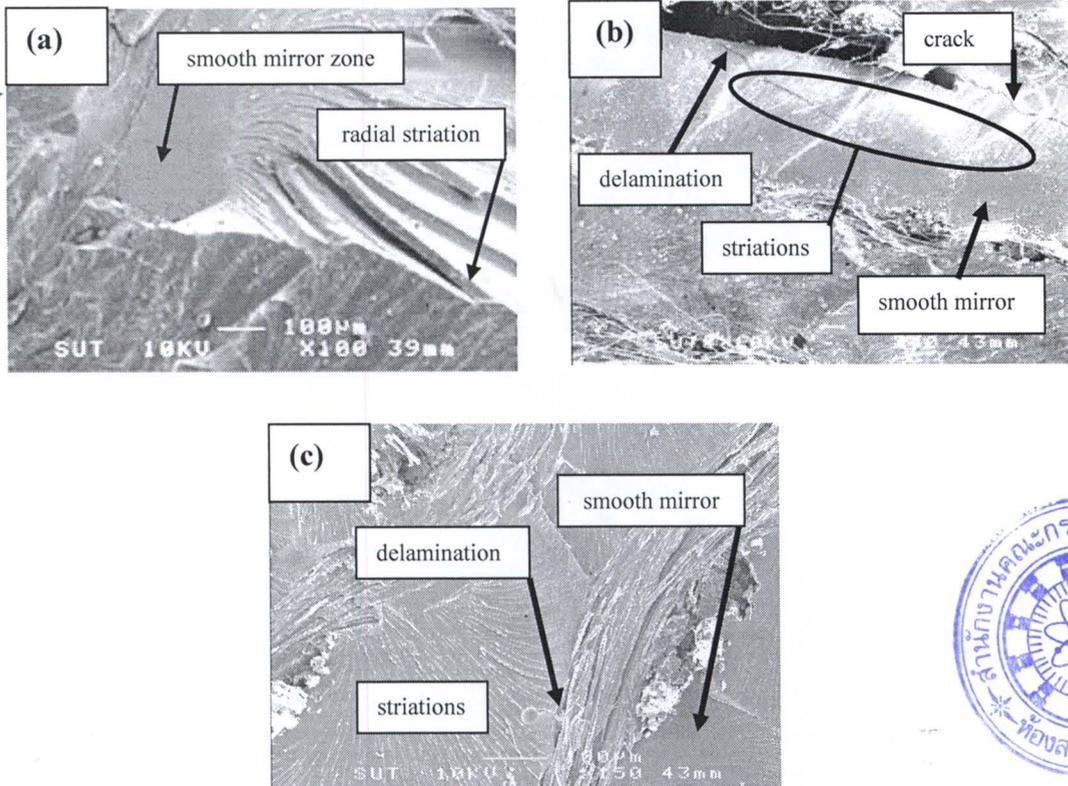
3.3.3.1 พื้นผิวแตกหัก (Fracture Surface)

SEM micrograph ของพื้นผิวแตกหักของชั้นทดสอบความทนต่อแรงดัดของอีพอกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ UT-SF แสดงในรูปที่ 3.13 พื้นผิวแตกหักของอีพอกซีแสดงลักษณะจำเพาะของการแตกหักแบบเปราะ (brittle fracture) ซึ่งแสดงให้เห็นโซนกระจก (mirror zone) และส่วนที่ใกล้กับโซนกระจกจะมีส่วนของการเกิดเป็นริ้วในแนวรัศมี (radial striation) [6, 7] ดังแสดงในรูปที่ 3.13 (a)

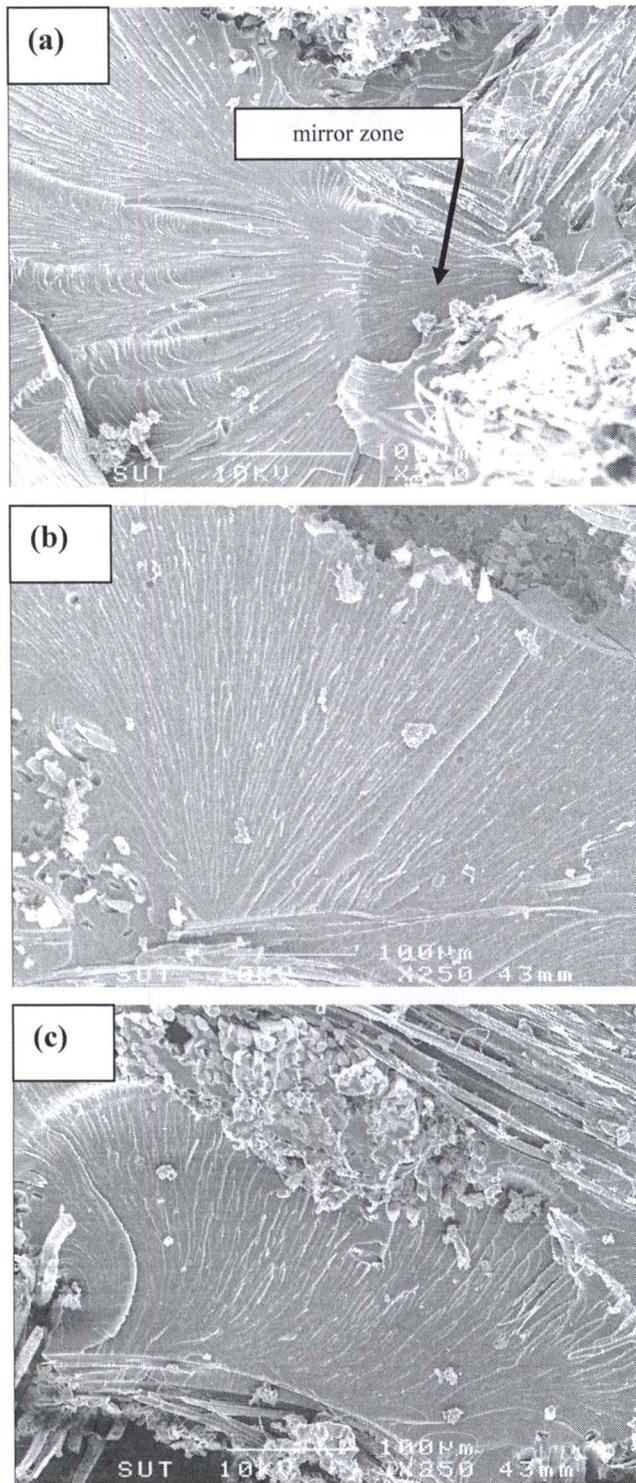
สำหรับวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ UT-SF ที่สัดส่วนเส้นใยไหม 0.15 นั้น จะสังเกตเห็นส่วนของโซนกระจกและส่วนของการเกิดเป็นริ้วในแนวรัศมี (radial striation) จากขอบเส้นใยไหมชั้นหนึ่งไปยังชั้นถัดไป และมี delamination เกิดขึ้น และสามารถสังเกตเห็นการแผ่ขยายของรอยแตก (crack propagation) ตามแนวของเส้นใยไหม ดังแสดงในรูปที่ 3.13 (b) อย่างไรก็ตามที่สัดส่วนของ UT-SF 0.15 นี้วัสดุเชิงประกอบแสดงพฤติกรรมการแตกหักแบบเปราะ

ในวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ UT-SF ที่สัดส่วนเส้นใยไหม 0.30 ลักษณะการแตกหักที่มีส่วนของการเกิดเป็นริ้วในแนวรัศมี (radial striation) ที่แผ่ขยายจากเส้นใยไหมชั้นหนึ่งไปยังอีกชั้นถัดไป เกิดขึ้นเช่นเดียวกัน มีการเกิด delamination เล็กน้อย อีกทั้งยังไม่สังเกตเห็นรอยแตก (crack) เกิดขึ้นที่ส่วนของอีพอกซีเมทริกซ์ ดังแสดงให้เห็นอยู่ในรูป 3.13 (c) อย่างไรก็ตาม อย่างไรก็ตามที่สัดส่วนของ UT-SF 0.30 นี้วัสดุเชิงประกอบยังมีพฤติกรรมการแตกหักแบบเปราะ

จาก SEM micrograph ในรูปที่ 3.14 ของพื้นผิวแตกหักของชั้นทดสอบความทนต่อแรงดัดของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ ST-SF แสดงให้เห็นพื้นผิวแตกหักที่เกิดเป็นริ้วในแนวรัศมี (radial striation) จากชั้นเส้นใยไหมหนึ่งไปยังเส้นใยไหมอีกชั้นหนึ่งเช่นเดียวกับที่สังเกตในวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ UT-SF ทั้งนี้ภาพยังแสดงส่วนของโซนกระจก ซึ่งขนาดโซนกระจกลดลงเมื่อสัดส่วนโดยมวลของ ST-SF เพิ่มขึ้น



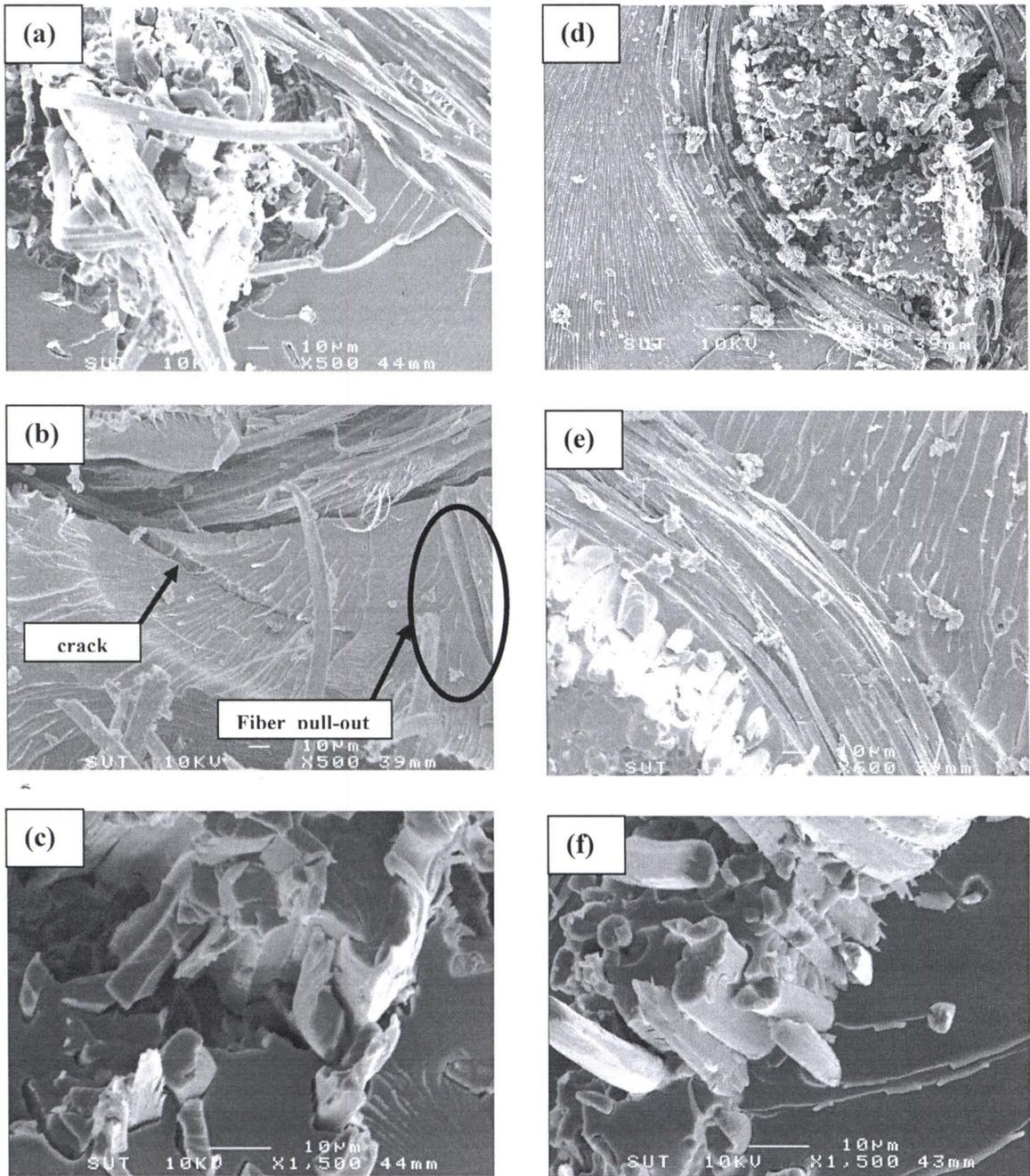
รูปที่ 3.13 SEM micrographs ของอีพอกซี (a) และวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ UT-SF ที่สัดส่วนโดยน้ำหนัก UT-SF 0.18 (b) และ 0.30 (c) จากชั้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบความทนต่อแรงดัด



รูปที่ 3.14 SEM micrographs ของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ ST-SF ที่ สกัดส่วนโดยน้ำหนักร ST-SF 0.18 (a), 0.30 (b) และ ST-SF 0.35 (c)

3.3.3.2 การยึดติดระหว่างพื้นผิวของผิวน้ำใหม่และอีพอกซีเมทริกซ์

จาก SEM micrograph แสดงในรูปที่ 3.15 ของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยผิวน้ำใหม่แบบ UT-SF และ ผิวน้ำใหม่แบบ ST-SF แสดงให้เห็นว่าการยึดติดระหว่างอีพอกซีและพื้นผิวผิวน้ำใหม่แบบ UT-SF ของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีไม่ดีนัก มีช่องว่างกระจายอยู่โดยพื้นผิวสัมผัสระหว่างอีพอกซีเมทริกซ์และผิวน้ำใหม่ และบางส่วนยังมีลักษณะของการเกิด delamination และรอยแตกของอีพอกซีเมทริกซ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.15 (a,b,c) สำหรับวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากผิวน้ำใหม่แบบ ST-SF ช่องว่างระหว่างพื้นผิวสัมผัสของอีพอกซีเมทริกซ์และผิวน้ำใหม่ลดน้อยลง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.15 (d,e,f) ส่งผลต่อการปรับปรุงความทนต่อแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยผิวน้ำใหม่แบบ ST-SF



รูปที่ 3.15 SEM micrographs ของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหม UT-SF ที่สัดส่วนโดยน้ำหนัก 0.18 (a, b, c) และ วัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหม ST-SF ที่สัดส่วนโดยน้ำหนัก 0.18 (d,e,f)

3.4 สรุปผลการศึกษา

1. การเสริมแรงอีพอกซีเรซินด้วยฟีนีลอะไมน์ทำให้มอดูลัสของยังก์และมอดูลัสแรงดัดของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเพิ่มขึ้นตามปริมาณของฟีนีลอะไมน์
2. การเสริมแรงอีพอกซีเรซินด้วยฟีนีลอะไมน์ทำให้ความทนต่อแรงดึง ความทนต่อแรงดัด และความทนต่อแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีน้อยกว่าของอีพอกซี อย่างไรก็ตาม ความทนต่อแรงดึง ความทนต่อแรงดัด และความทนต่อแรงกระแทก จะเพิ่มตามปริมาณฟีนีลอะไมน์ที่เพิ่มขึ้น
3. อุณหภูมิการเสื่อมสลายเนื่องจากความร้อนของอีพอกซีเมทริกซ์ไม่ขึ้นกับปริมาณฟีนีลอะไมน์แต่ วัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยฟีนีลอะไมน์จะเริ่มเสื่อมสลายที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่า อุณหภูมิการเสื่อมสลายของอีพอกซี (neat epoxy)
4. อุณหภูมิการเกิดโครงสร้างร่างแหของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเพิ่มขึ้นแต่อุณหภูมิการเกิดทรานซิชันแก้วหลังอบบ่มลดลงเมื่อปริมาณฟีนีลอะไมน์เพิ่มขึ้น
5. การดัดแปรฟีนีลอะไมน์ด้วยสารคู่ควบ APTES มีผลต่อการปรับปรุงความทนต่อแรงดึง และความทนต่อแรงกระแทกเล็กน้อย
6. การดัดแปรฟีนีลอะไมน์ด้วยสารคู่ควบ APTES มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเริ่มต้นของการเสื่อมสลายด้วยความร้อนของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีอย่างมีนัยสำคัญ
7. การดัดแปรฟีนีลอะไมน์ด้วยสารคู่ควบ APTES มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิการเกิดโครงสร้างร่างแห