

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและสมบัติการยึดติดสีของเส้นใยไหมลอกกาวพันธุ์บอมบิกซ์โมริ ด้วยวิธีการต่อกิ่งกับไวนิลมอนอเมอร์ ซึ่งไวนิลมอนอเมอร์ที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (2-Hydroxyethyl methacrylate, HEMA) และไวนิลไตร-2-เมทอกซีเอทอกซีไซเลน (Vinyltris-(2-methoxyethoxy) silane, A-172) เพื่อศึกษาเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของพอลิเมอร์บนเส้นใยที่เหมาะสม โดยได้เปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ของเส้นใยทั้งก่อนและหลังลอกกาวกับก่อนและหลังการต่อกิ่ง ซึ่งสมบัติต่างๆ ที่ได้ทำการศึกษาแบ่งออกเป็นการศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางเคมีและทางกายภาพ การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันพื้นฐานวิทยา และสมบัติทางความร้อน นอกจากนี้ได้ศึกษาในส่วนของการยึดสีและความคงทนของสีโดยใช้สีย้อมที่ได้จากธรรมชาติ 2 ชนิด คือ ขมิ้น และ ครั่ง ซึ่งการย้อมสีได้ศึกษาความสามารถในการยึดติดสีและความเข้มของสี ส่วนความคงทนของสีได้ศึกษาความคงทนของสีต่อแสง เหงื่อ และการซักฟอก

4.1 การลอกกาวและการต่อกิ่ง

เส้นใยไหมดิบที่ได้จากรังไหมมีความแข็งแรงกระด้างจึงให้สัมผัสที่ไม่ดี ไม่เหนียวนุ่มนวลเนื่องจากยังคงมีกาวไหมและสิ่งเจือปนอื่นๆ เคลือบอยู่ ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยเพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้ในกระบวนการสิ่งทอ ซึ่งกระบวนการแรกที่มีความจำเป็นในการปรับปรุงเส้นใยไหมเพื่อให้เส้นใยไหมอยู่ในลักษณะที่เหมาะสมก่อนการนำไปใช้งานและเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการตกแต่งสำเร็จ คือ การลอกกาว เพื่อกำจัดกาวไหมและสิ่งเจือปนอื่นๆ ออกจากเส้นใยโดยวิธีการใช้สารเคมี และจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [28] พบว่าเส้นใยไหมที่ทำการลอกกาวกับสารละลายผสมระหว่างโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไบคาร์บอเนตที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 30 นาที ให้เส้นใยไหมที่มีสมบัติโดยรวมดีที่สุด คือ เส้นใยที่ได้มีความมันเงา มีความนุ่มสูง และเปอร์เซ็นต์ของการลอกกาวที่ได้จากวิธีนี้อยู่ในช่วง 22-25 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้สภาวะนี้ในการลอกกาวไหมทดลองงานวิจัย

ถึงแม้ว่าเส้นใยไหมที่ผ่านการลอกกาวแล้วจะมีลักษณะภายนอกที่ดีขึ้น คือ มีความมันเงา นุ่มนวล แต่สมบัติของเส้นใยที่ได้มีค่าลดลง เช่น ไหมเมื่อได้รับแสงแดดและความร้อนสูงเป็นเวลานานจะทำให้ความแข็งแรงของเส้นใยลดลงและเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเนื่องจากการสลายตัวของโครงสร้างโปรตีนในเส้นใย ทำให้สมบัติเชิงกลลดลง [28] นอกจากนี้เส้นใยไหมยังมีข้อด้อยอื่นๆ อีก ได้แก่ การคืนตัวจากแรงอัดต่ำเมื่อเปียกทำให้ยับง่ายเมื่อผ่านการซัก ซึ่งดูแลรักษายากและ

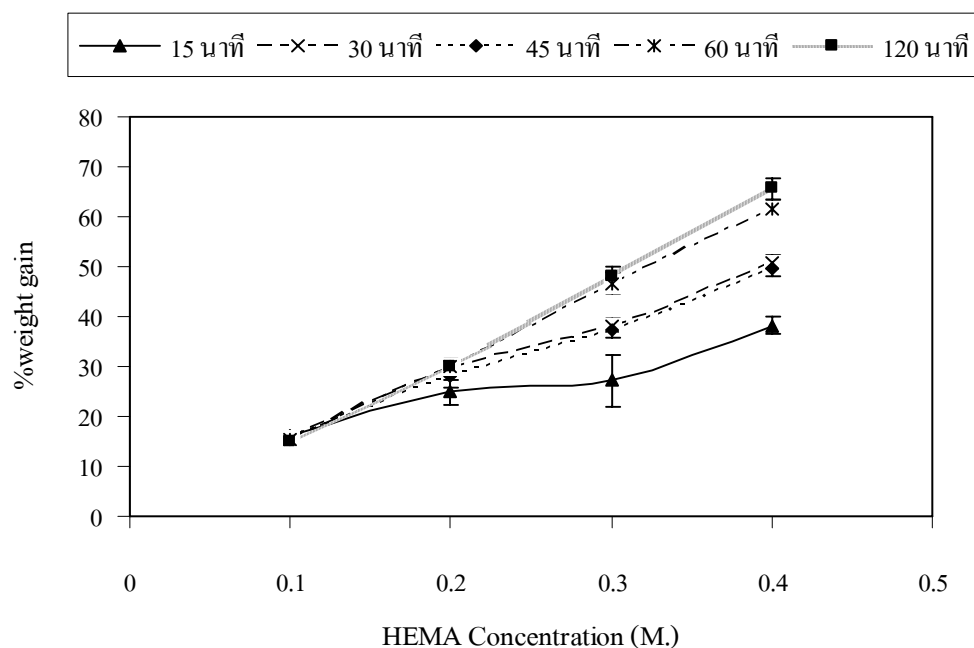
สร้างความรำคาญให้แก่ผู้สวมใส่ ดังนั้นจึงมีงานวิจัยต่างๆ เกิดขึ้นมากมาย เพื่อพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพของไหม ซึ่งวิธีที่นิยมและมีการนำมาใช้อย่างแพร่หลาย คือ การปรับปรุงทางเคมีโดยวิธีการต่อกิ่งเส้นใยไหมด้วยไวนิลมอนอเมอร์ ซึ่งเป็นการเพิ่มน้ำหนักของเส้นใยแทนที่กาวไหมที่หายไปจากการลอกกาว เส้นใยที่ได้จะมีสมบัติแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของมอนอเมอร์ ตัวเริ่มต้น สภาพะที่ใส่ และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการต่อกิ่ง น้ำหนักของเส้นใยที่เพิ่มขึ้นนี้จะทำให้เส้นใยไหมมีมูลค่าเพิ่มขึ้นและเหมาะกับการนำไปใช้งาน

4.2 อิทธิพลของความเข้มข้นและเวลาที่มีผลต่อกระบวนการต่อกิ่งเส้นใยไหมด้วยไวนิลมอนอเมอร์

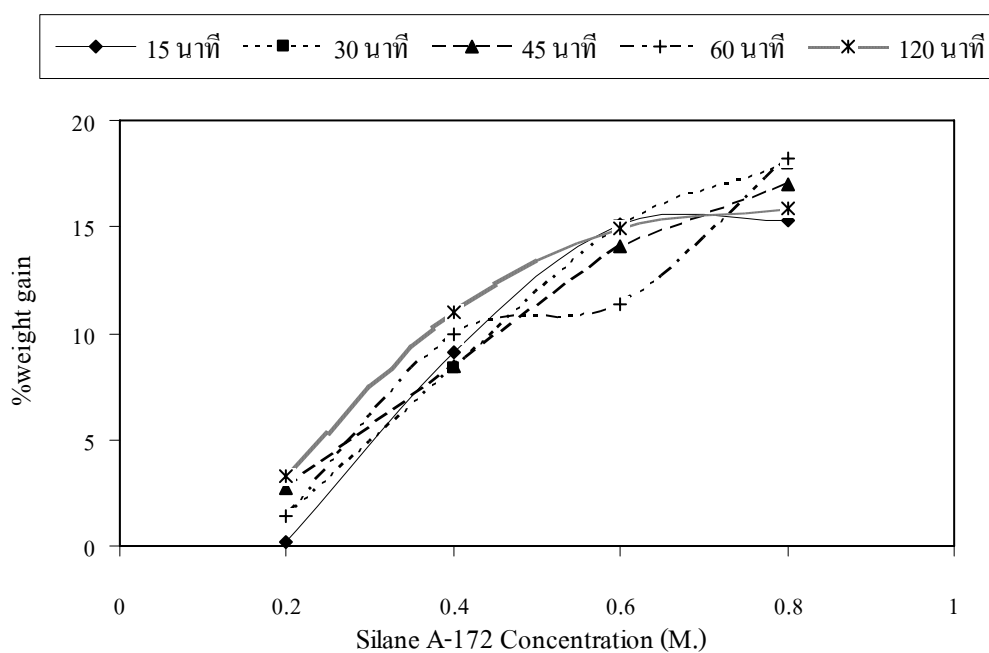
งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของความเข้มข้นและเวลาที่มีผลต่อการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยไหมโดยวิธีการต่อกิ่งด้วยไวนิลมอนอเมอร์ที่มีสมบัติต่างกัน 2 ชนิด คือ HEMA ที่ความเข้มข้น 0.1, 0.2, 0.3 และ 0.4 M. และ Silane A-172 ที่ความเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 M. ที่เวลา 15 30 45 60 และ 120 นาที โดยใช้อัตราส่วนระหว่างวัสดุต่อของเหลวเป็น 1:20 และได้พิจารณาถึงความสามารถในการต่อกิ่งของเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วยไวนิลมอนอเมอร์

4.2.1 ความสามารถในการต่อกิ่ง

ความสามารถในการต่อกิ่งของเส้นใยไหมสามารถพิจารณาได้จากเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการต่อกิ่ง (% weight gain) และจากการศึกษาการปรับปรุงสมบัติเส้นใยไหมโดยวิธีการต่อกิ่งด้วยไวนิลมอนอเมอร์ที่มีสมบัติต่างกัน 2 ชนิด คือ HEMA และ Silane A-172 ที่ความเข้มข้นและเวลาต่างๆ พบว่าเส้นใยไหมมีความสามารถในการต่อกิ่งและลักษณะแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 กับตารางที่ 4.1 และ 4.2



รูปที่ 4.1 เปอร์เซนต์น้ำหนักของเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการต่อกิ่งด้วย HEMA ที่ความเข้มข้น 0.1, 0.2, 0.3 และ 0.4 M. ที่เวลา 15 30 45 60 และ 120 นาที



รูปที่ 4.2 เปอร์เซนต์น้ำหนักของเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการต่อกิ่งด้วย Silane A-172 ที่ความเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 M. ที่เวลา 15 30 45 60 และ 120 นาที

ตารางที่ 4.1 ลักษณะภายนอกของเส้นใยไหมหลังการตอ่กึ่งด้วย HEMA ที่ความเข้มข้นและเวลาต่างๆ เทียบกับไหมลอกขาว

เวลา (นาทึ) ความ เข้มข้น (M)	ลักษณะของเส้นใย ที่ทำการตอ่กึ่งด้วยเวลาที่ต่างๆ กัน (นาทึ)				
	15	30	45	60	120
0.1	สีขาว, ม่นเงา น้อ่กกว่า, น้่ม ใกล้เคียงกับ ไหมลอกขาว	สีขาว, ม่นเงา น้อ่กกว่า, น้่มใกล้เคียง กับ15 นาทึ	สีขาว, ม่นเงา น้อ่กกว่า, น้่มใกล้เคียง กับ15 นาทึ	สีขาว, ม่นเงา น้อ่กกว่า, น้่มใกล้เคียง กับ15 นาทึ	สีขาว, ม่นเงา น้อ่กกว่า, น้่มใกล้เคียง กับ15 นาทึ
0.2	สีขาว ม่นเงา น้อ่กกว่า มีความน้่ม ลดลง	สีขาว ม่นเงา น้อ่กกว่า แฉ่งมากขึ้น	สีขาว ม่นเงา น้อ่กกว่า แฉ่งใกล้เคียง กับ 30 นาทึ	สีขาว ม่นเงา น้อ่กกว่า แฉ่งใกล้เคียง กับ 30 นาทึ	สีขาว ม่นเงา น้อ่กกว่า แฉ่งใกล้เคียง กับ 30 นาทึ
0.3	สีขาว ม่นเงา น้อ่กกว่า แฉ่งใกล้เคียง กับ0.2HEMA	สีขาว ม่นเงา น้อ่กลง แฉ่งมากขึ้น	สีขาว ม่นเงา น้อ่กลง แฉ่งมากขึ้น	สีขาว ม่นเงา น้อ่กลง แฉ่งมากขึ้น	สีขาว ม่นเงา น้อ่กลง แฉ่งมากขึ้น
0.4	สีขาว ม่นเงา น้อ่กลง แฉ่งมากขึ้น	สีขาว ม่นเงา น้อ่กลง แฉ่งกระด้าง	สีขาว ม่นเงา น้อ่กลง แฉ่งกระด้าง	สีขาว ม่นเงา น้อ่กลง แฉ่งกระด้าง มากขึ้น	สีขาว ม่นเงา น้อ่กลง แฉ่งกระด้าง มากขึ้น

ตารางที่ 4.2 ลักษณะภายนอกของเส้นใยไหมหลังการตอ่กึ่งด้วย Silane A-172 ที่ความเข้มข้นและเวลาต่างๆ เทียบกับไหมลอกกาว

เวลา (นาทึ) ความ เข้มข้น (M)	ลักษณะของเส้นใย ที่ทำการตอ่กึ่งด้วยเวลาที่ต่างๆ กัน (นาทึ)				
	15	30	45	60	120
0.2	สีขาว มั่นเงา น้อยกว่า นุ่ม ใกล้เคียงกับ ไหมลอกกาว	สีขาว มั่นเงา น้อยกว่า นุ่มใกล้เคียง กับ15 นาทึ	สีขาว มั่นเงา น้อยกว่า นุ่มใกล้เคียง กับ15 นาทึ	สีขาว มั่นเงา น้อยกว่า นุ่มใกล้เคียง กับ15 นาทึ	สีขาว มั่นเงา น้อยกว่า นุ่มใกล้เคียง กับ15 นาทึ
0.4	สีขาว มั่นเงา น้อยกว่า มีความนุ่ม	สีขาว มั่นเงา น้อยกว่า มีความนุ่ม	สีขาว มั่นเงา น้อยกว่า มีความนุ่ม	สีขาว มั่นเงา น้อยกว่า มีความนุ่ม	สีขาว มั่นเงา น้อยกว่า มีความนุ่ม
0.6	สีขาว มั่นเงา น้อยลง มีความนุ่ม พู ขึ้นเล็กน้อย	สีขาว มั่นเงา น้อยลง มีความนุ่ม พู ขึ้นเล็กน้อย	สีขาว มั่นเงา น้อยลง มีความนุ่ม พู ขึ้นเล็กน้อย	สีขาว มั่นเงา น้อยลง มีความนุ่ม พู ขึ้นเล็กน้อย	สีขาว มั่นเงา น้อยลง มีความนุ่ม พู ขึ้นเล็กน้อย
0.8	สีขาว มั่นเงา น้อยลง มีความนุ่ม พู ขึ้นเล็กน้อย	สีขาว มั่นเงา น้อยลง มีความนุ่ม พู ขึ้นเล็กน้อย	สีขาว มั่นเงา น้อยลง มีความนุ่ม พู ขึ้นเล็กน้อย	สีขาว มั่นเงา น้อยลง มีความนุ่ม พู ขึ้นเล็กน้อย	สีขาว มั่นเงา น้อยลง มีความนุ่ม พู ขึ้นเล็กน้อย

จากรูปที่ 4.1 พบว่าเมื่อความเข้มข้นที่ใช้ในกระบวนการตอ่กึ่งเส้นใยไหมของ HEMA เพิ่มขึ้น เปอร์เซนต์น้ำหนักของเส้นใยหลังการตอ่กึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ปัจจัยดังกล่าวคาดว่าอาจเกิดจากปริมาณของมอนอเมอร์ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กึ่งตรงตำแหน่งที่ว่องไวของโครงสร้างโปรตีนซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของเส้นใยไหมมีมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นที่ใช้ในการตอ่กึ่งเพิ่มขึ้น โดยกลไกในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กึ่งระหว่างมอนอเมอร์กับโปรตีนที่เป็นองค์ประกอบหลักในเส้นใยไหมได้แก่ ไกลซีน อะลานีน เซรีน และไทโรซีน ซึ่งมีสายโซ่ข้างเคียงเป็นหมู่ไฮดรอกซิล หมู่เอมีน และหมู่คาร์บอกซิล ซึ่งมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กึ่งและมีอยู่จำนวนมากในเส้นใยไหมประมาณ 83 % [6] นอกจากนี้ยังสามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กึ่งบนสายโซ่หลักของเส้นใยไหมตรงตำแหน่งที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา เช่น หมู่เอไมด์และหมู่คาร์บอนิล และเมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการตอ่กึ่งเส้นใยไหมด้วย HEMA พบว่าที่ความเข้มข้นสูงๆ เมื่อใช้เวลาในการตอ่กึ่งเพิ่มขึ้น มีเปอร์เซนต์

น้ำหนักของเส้นใยหลังการตอ่กึ่งเพิ่มขึ้น เนื่องจากมอนอเมอร์มีเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น แต่ที่ความเข้มข้นต่ำๆ เมื่อใช้เวลาในการตอ่กึ่งเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของเส้นใยหลังการตอ่กึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน

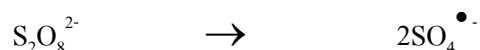
จากรูปที่ 4.2 พบว่าเมื่อ Silane A-172 มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของเส้นใยหลังการตอ่กึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงที่ความเข้มข้นค่าหนึ่ง คือ ที่ความเข้มข้น 0.6 และ 0.8 M. จะเห็นว่า แม้มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น แต่เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของเส้นใยหลังการตอ่กึ่งเริ่มที่จะคงที่หรือมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของเส้นใยหลังการตอ่กึ่งที่ใกล้เคียงกัน และเมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการตอ่กึ่งพบว่าเมื่อใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของเส้นใยหลังการตอ่กึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาไม่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการตอ่กึ่ง

เมื่อพิจารณาผลของชนิดมอนอเมอร์ที่ใช้ในการตอ่กึ่งที่แต่ละความเข้มข้น พบว่าเส้นใยใหม่ที่ตอ่กึ่งด้วย HEMA มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการตอ่กึ่งมากกว่าเส้นใยที่ตอ่กึ่งด้วย Silane A-172 อาจเนื่องมาจาก HEMA มีความสามารถในการละลายน้ำดีกว่า Silane A-172 เพราะโครงสร้างของ Silane A-172 มีหมู่แทนที่ที่มีขนาดใหญ่ เกะกะมาก ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้ยากจึงทำให้ Silane A-172 ละลายน้ำได้น้อยกว่า ดังนั้น HEMA จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กึ่งตรงตำแหน่งที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาที่อยู่บนโครงสร้างของโปรตีนซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของเส้นใยไหมได้มากกว่า Silane A-172 นอกจากนี้ HEMA ยังมีหมู่ข้างเคียงที่เป็นหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งเป็นหมู่ที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กึ่งกับโปรตีนที่เป็นองค์ประกอบหลักในเส้นใยไหมทำให้เกิดอันตรกิริยาที่แข็งแรงระหว่างสายโซ่ไฟโบรอินและมอนอเมอร์ทั้งภายในและระหว่างโมเลกุล

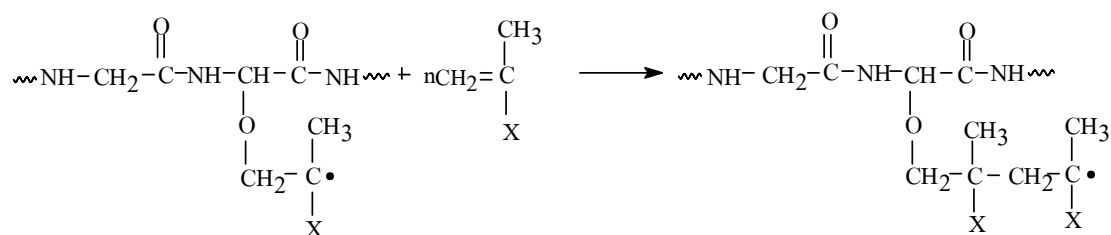
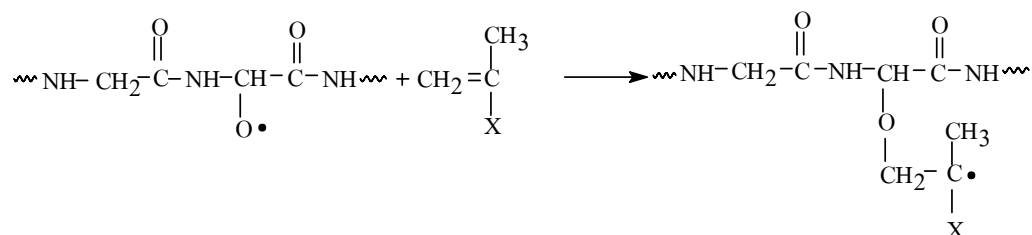
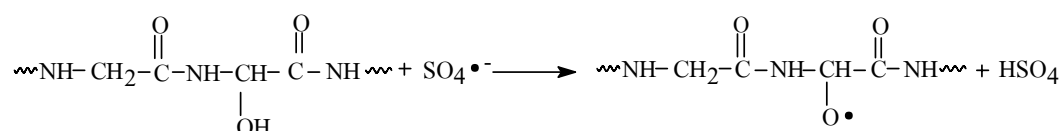
จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า เมื่อความเข้มข้นของมอนอเมอร์และเวลาที่ใช้ในการตอ่กึ่งเพิ่มขึ้นเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของเส้นใยหลังการตอ่กึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แสดงว่าเส้นใยมีความสามารถในการตอ่กึ่งเพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณของพอลิเมอร์ที่เกาะบนผิวของเส้นใยที่ตอ่กึ่งด้วย HEMA มีปริมาณที่มากเกินไป ส่งผลให้เส้นใยที่ได้มีลักษณะแข็งกระด้างไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานในด้านสิ่งทอถึงแม้จะมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นมากก็ตาม ส่วนเส้นใยที่ตอ่กึ่งด้วย Silane A-172 เส้นใยที่ได้มีลักษณะที่นุ่มขึ้น แต่ถ้ามีปริมาณของพอลิเมอร์ที่เกาะบนผิวของเส้นใยมากเกินไปทำให้เกิดเม็ดเล็กๆ เกาะบนผิวของเส้นใยซึ่งไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานเช่นกัน

ในการต่อกิ่งเส้นใยไหมด้วยไวตามินอนเมอร์นั้น เส้นใยไหมจะมีตำแหน่งที่ว่างไวในการเกิดปฏิกิริยา ได้แก่ หมู่ไฮดรอกซิล หมู่เอไมด์ และหมู่คาร์บอนิลที่อยู่บนโครงสร้างหรือหมู่ข้างเคียงของโปรตีน โดยกลไกการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งของ HEMA และ Silane A-172 กับโปรตีนที่เป็นองค์ประกอบหลักในเส้นใยไหม ซึ่งคาดว่าปฏิกิริยาที่อาจเกิดขึ้นมีลักษณะดังรูปที่ 4.3 [29] และ รูปที่ 4.4 [32] โดยตัวอย่างที่ยกมาเป็นการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งตรงตำแหน่งของหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นหมู่ข้างเคียง

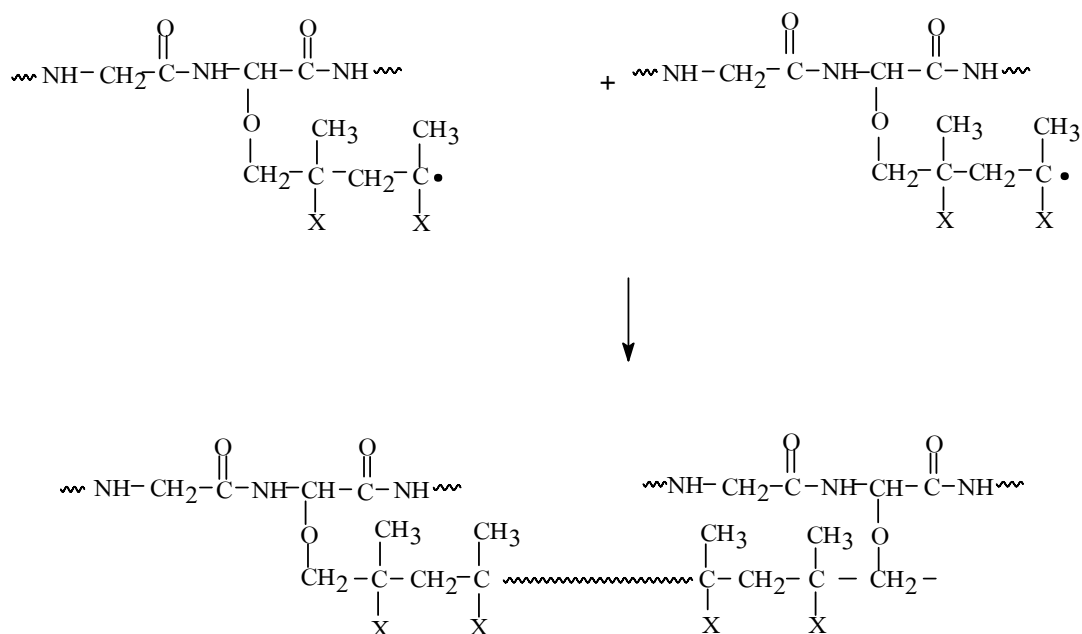
การริเริ่มปฏิกิริยา



เมื่อ $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ คือ ตัวเริ่มต้น และ $\text{SO}_4^{\bullet-}$ คือ อนุมูลอิสระ

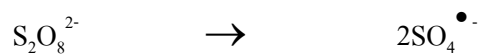


โดย $\text{X}=\text{COOCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ สำหรับ HEMA

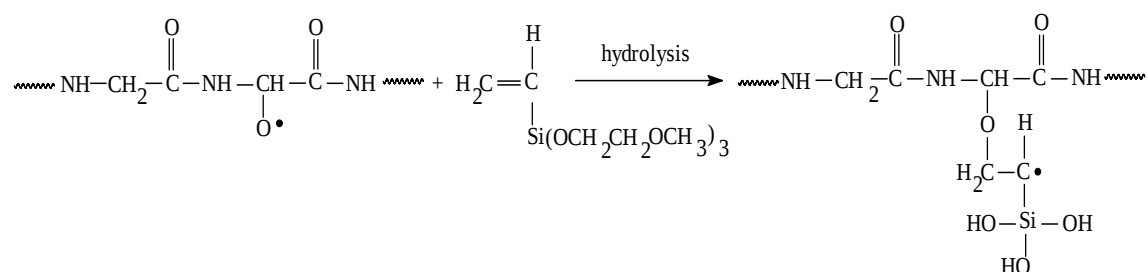
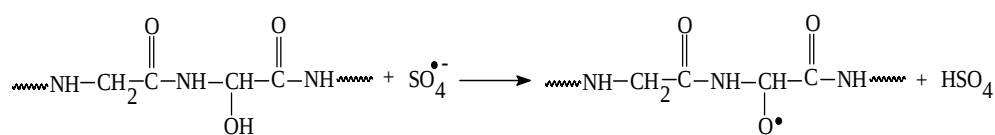


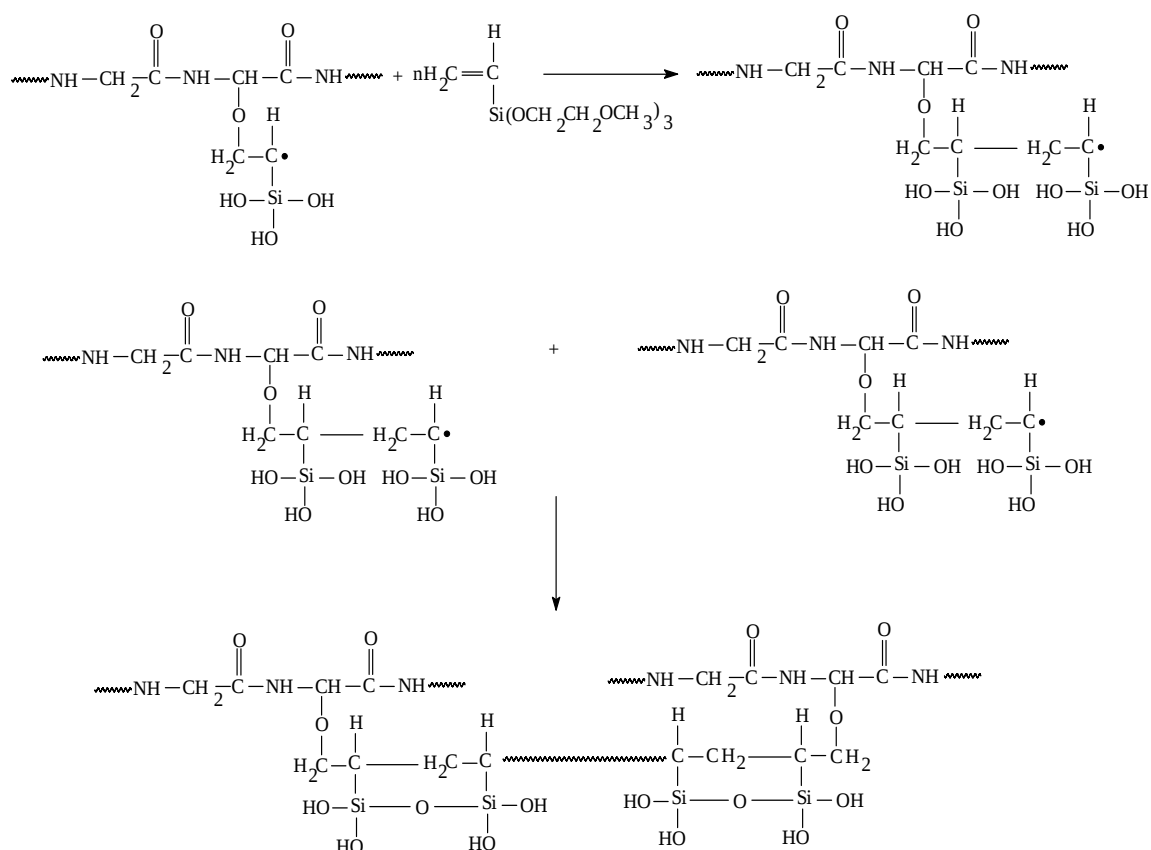
รูปที่ 4.3 ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งระหว่าง HEMA กับโปรตีนที่เป็นองค์ประกอบหลักในเส้นใยไหม [29]

การริเริ่มปฏิกิริยา



เมื่อ $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ คือ ตัวเริ่มต้น และ $\text{SO}_4^{\bullet-}$ คือ อนุมูลอิสระ



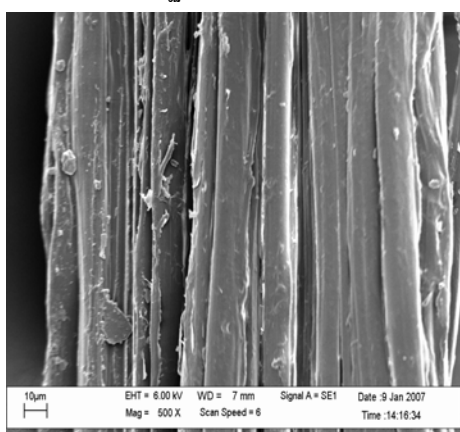


รูปที่ 4.4 ปฏิกริยาการเกิดพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่าง Silane A-172 กับ โปรตีนที่เป็นองค์ประกอบหลักในเส้นใยไหม [32]

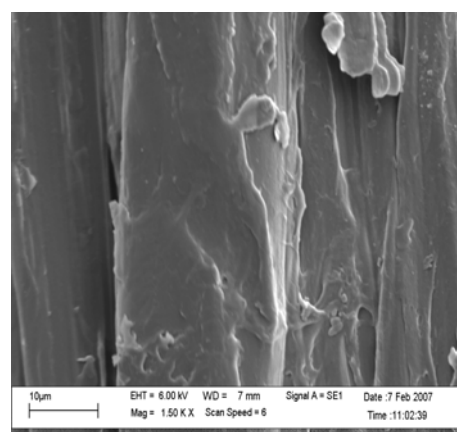
4.3 ฐานวิทยา

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสัณฐานวิทยาของเส้นใยไหมโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopes, SEM) ที่กำลังขยาย 500 และ 1500 เท่า เพื่อการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของเส้นใยไหม โดยแบ่งขั้นตอนการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วน คือ เส้นใยไหมดิบและเส้นใยไหมลอกกาบ เส้นใยไหมก่อนและหลังการต่อกึ่ง ซึ่งมีลักษณะต่างๆ ดังนี้

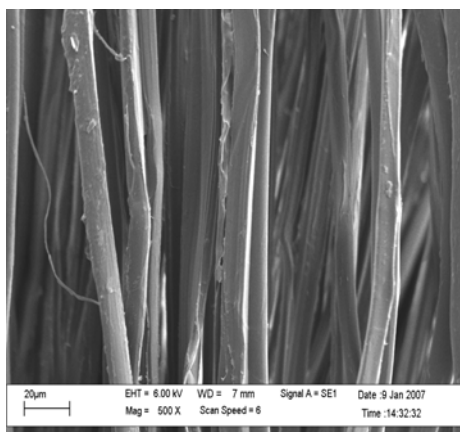
4.3.1 สัณฐานวิทยาของเส้นใยไหมดิบและเส้นใยไหมลอกกา



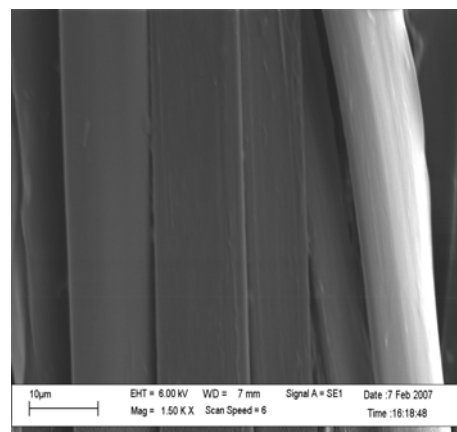
(ก)



(ข)



(ค)

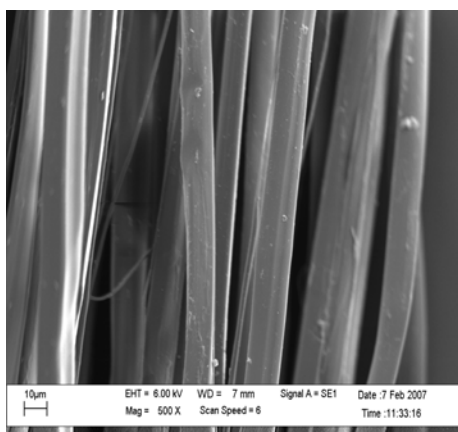


(ง)

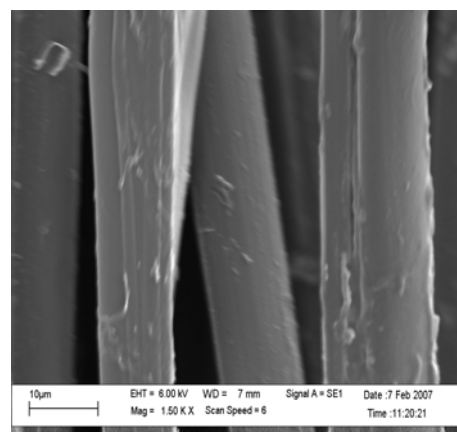
รูปที่ 4.5 สัณฐานวิทยาของ (ก) ไหมดิบที่กำลังขยาย 500 เท่า (ข) ไหมดิบที่กำลังขยาย 1500 เท่า (ค) ไหมลอกกาที่กำลังขยาย 500 เท่า และ (ง) ไหมลอกกาที่กำลังขยาย 1500 เท่า

จากการเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของเส้นใยไหมดิบกับเส้นใยไหมที่ผ่านการลอกกาโดยใช้ตัวทำละลายผสมระหว่างโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไบคาร์บอเนตที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 30 นาที พบว่าเส้นใยไหมดิบมีลักษณะของเส้นใยเกาะติดกันทำให้พื้นผิวของเส้นใยมีลักษณะเป็นคลื่นไม่สม่ำเสมอเนื่องจากกาไหมที่เคลือบอยู่ที่พื้นผิวด้านนอกของเส้นใย ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ก) และ รูปที่ 4.5 (ข) ส่วนเส้นใยไหมที่ผ่านการลอกกามีพื้นผิวก่อนข้างเรียบสม่ำเสมอมากกว่าเส้นใยไหมดิบและเส้นใยแต่ละเส้นมีลักษณะแยกออกจากกันไม่ถูกยึดติดกันเหมือนเส้นใยไหมดิบเป็นผลมาจากการลอกกาไหมออกด้วยสารละลาย (รูปที่ 4.5 (ค) และรูปที่ 4.5 (ง))

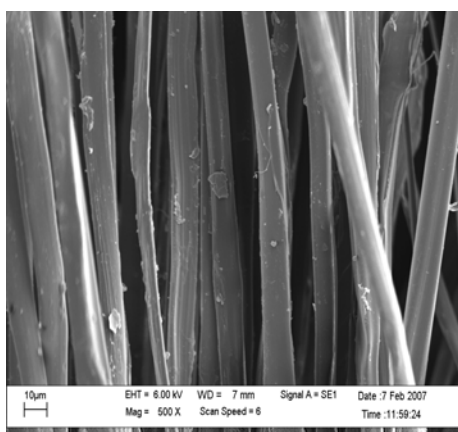
4.3.2 สัณฐานวิทยาของเส้นใยไหมที่ผ่านการตอกลงด้วย HEMA



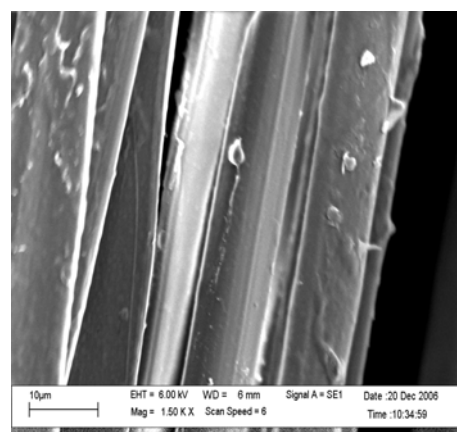
(ก)



(ข)



(ค)



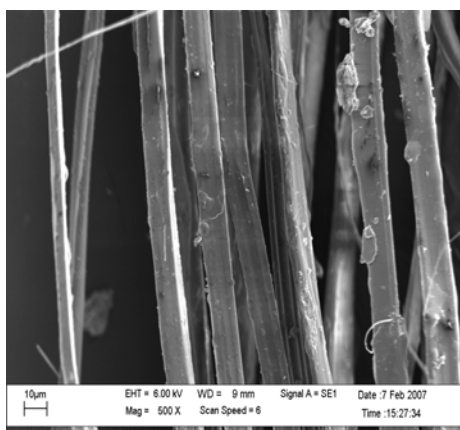
(ง)

รูปที่ 4.6 สัณฐานวิทยาของ (ก) เส้นใยไหมที่ตอกลงด้วย HEMA ความเข้มข้น 0.2 M. เวลา 15 นาที กำลังขยาย 500 เท่า (ข) เส้นใยไหมที่ตอกลงด้วย HEMA ความเข้มข้น 0.2 M. เวลา 15 นาที กำลังขยาย 1500 เท่า (ค) เส้นใยไหมที่ตอกลงด้วย HEMA ความเข้มข้น 0.4 M. เวลา 15 นาที กำลังขยาย 500 เท่า และ (ง) เส้นใยไหมที่ตอกลงด้วย HEMA ความเข้มข้น 0.4 M. เวลา 15 นาที กำลังขยาย 1500 เท่า

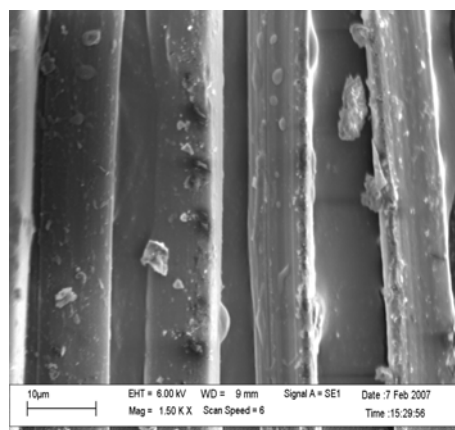
รูปที่ 4.6 จากการศึกษาเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของเส้นใยไหมที่ตอกลงด้วย HEMA ความเข้มข้น 0.2 M. และ ความเข้มข้น 0.4 M. พบว่าสัณฐานวิทยาของเส้นใยไหมที่ตอกลงด้วย HEMA ความเข้มข้น 0.2 M. ที่มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยเพิ่มขึ้นหลังการตอกลง 24.88% มีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างเรียบและสะอาดกว่าเส้นใยไหมที่ตอกลงด้วย HEMA ความเข้มข้น 0.4 M. ที่มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยเพิ่มขึ้นหลังการตอกลง 38.26% ซึ่งมีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างขรุขระ เนื่องจากการตอกลงเส้นใยก่อให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างเส้นใยและ HEMA บนพื้นผิวของเส้นใยเกิด

เป็นแผ่นพอลิเมอร์ของ HEMA เกาะอยู่ที่ผิวของเส้นใย จากผลการทดลองที่ได้สามารถสรุปได้ว่า เมื่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการตอกลงเพิ่มขึ้นส่งผลให้พื้นผิวของเส้นใยเกิดเป็นแผ่นพอลิเมอร์ของ HEMA เกาะอยู่ที่ผิวของเส้นใยเพิ่มมากขึ้น

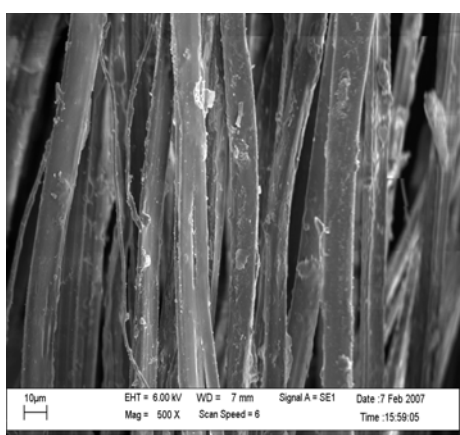
4.3.3 สัณฐานวิทยาของเส้นใยไหมที่ผ่านการตอกลงด้วย Silane A-172



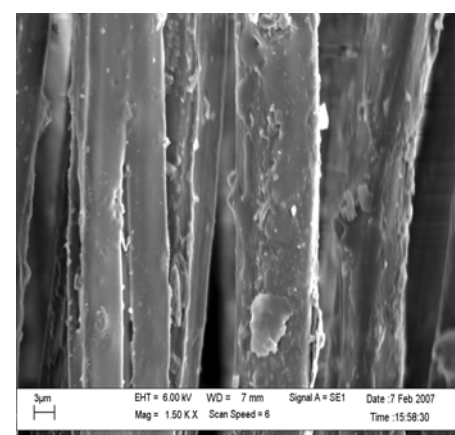
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.7 สัณฐานวิทยาของ (ก) เส้นใยไหมที่ตอกลงด้วย Silane A-172 ความเข้มข้น 0.4 M. เวลา 30 นาที กำลังขยาย 500 เท่า (ข) เส้นใยไหมที่ตอกลงด้วย Silane A-172 ความเข้มข้น 0.4 M. เวลา 30 นาที กำลังขยาย 1500 เท่า (ค) เส้นใยไหมที่ตอกลงด้วย Silane A-172 ความเข้มข้น 0.6 M. เวลา 30 นาที กำลังขยาย 500 เท่า และ (ง) เส้นใยไหมที่ตอกลงด้วย Silane A-172 ความเข้มข้น 0.6 M. เวลา 30 นาที กำลังขยาย 1500 เท่า

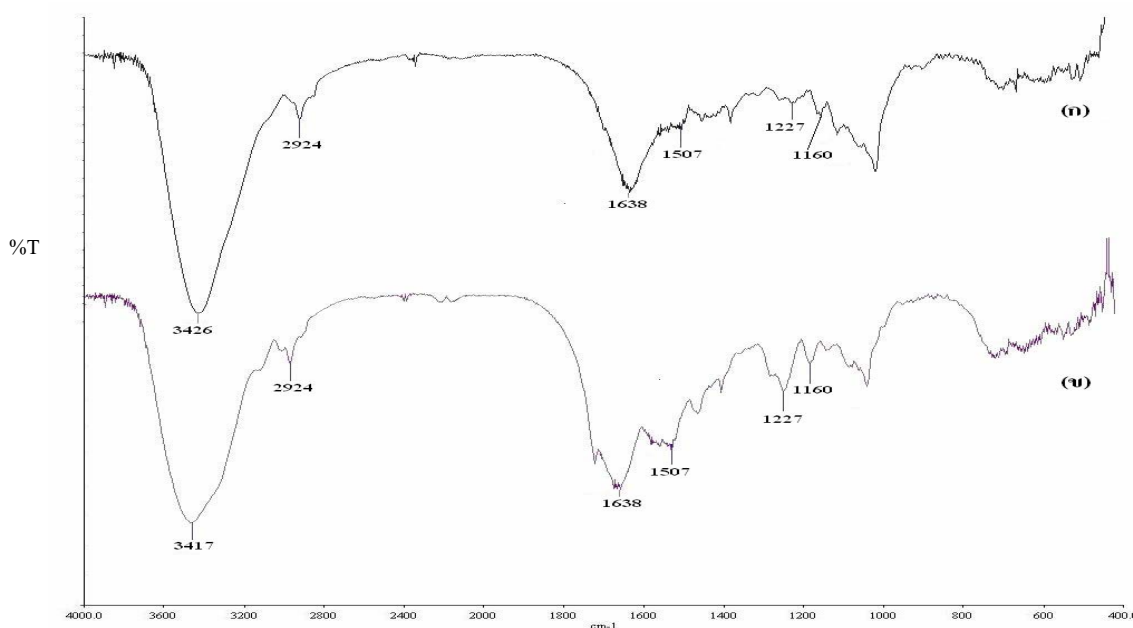
รูปที่ 4.7 จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวของเส้นใยไหมที่ตอกลงด้วย Silane A-172 ที่ความเข้มข้น 0.4 M. เปรียบเทียบกับลักษณะพื้นผิวของเส้นใยไหมที่ตอกลงด้วย Silane A-172 ที่ความเข้มข้น 0.6 M. พบว่าเส้นใยไหมที่ตอกลงด้วย Silane A-172 ที่ความเข้มข้น 0.6 M. ที่มีเปอร์เซ็นต์

น้ำหนักเส้นใยเพิ่มขึ้นหลังการต่อกิ่ง 15.03% มีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระกว่าเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย Silane A-172 ที่ความเข้มข้น 0.4 M. ที่มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยเพิ่มขึ้นหลังการต่อกิ่ง 8.34% เนื่องจากการเกิดพอลิเมอร์ไฮดรอกซิลของ Silane A-172 เกิดเป็นก้อนโพลิโกเมอร์เกาะบนพื้นผิวของเส้นใย ดังนั้นเมื่อเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักของเส้นใยเพิ่มขึ้นปริมาณของมอนอเมอร์ที่ใช้ในการต่อกิ่งที่สามารถเกิดการพอลิเมอร์ไฮดรอกซิลของ Silane A-172 เกิดเป็นก้อนโพลิโกเมอร์เกาะบนพื้นผิวของเส้นใยมีมากขึ้นส่งผลให้เส้นใยมีพื้นผิวที่ขรุขระและไม่สม่ำเสมอมากขึ้น

4.4 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชัน

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของเส้นใยไหมดิบ เส้นใยไหมลอกกา และเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วยไวนิลมอนอเมอร์โดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier transforms spectroscopy, FTIR)

4.4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของเส้นใยไหมดิบและเส้นใยไหมลอกกา



รูปที่ 4.8 อินฟราเรดสเปกตรัมของ (ก) เส้นใยไหมดิบ และ (ข) เส้นใยไหมลอกกา

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบอินฟราเรดสเปกตรัมระหว่างเส้นใยไหมดิบ (รูปที่ 4.8 (ก)) และเส้นใยไหมลอกกา (รูปที่ 4.8 (ข)) พบว่าอินฟราเรดสเปกตรัมของเส้นใยไหมดิบและเส้นใยไหมลอกกามีแถบการดูดกลืนที่คล้ายคลึงกันโดยตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของโครงสร้างไฟโบรอินที่มีโครงสร้างแบบแผ่นพับแบบเบต้า คือ ตำแหน่งเลขคลื่น 1507 cm^{-1} เป็นการดูดกลืนของ N-H bending ในหมู่เอไมด์ทุติยภูมิ (Secondary amine) และ $1680\text{--}1630\text{ cm}^{-1}$ เป็นการดูดกลืนของ C=O stretching กับ N-H bending โดยเป็นลักษณะแถบการดูดกลืนของ

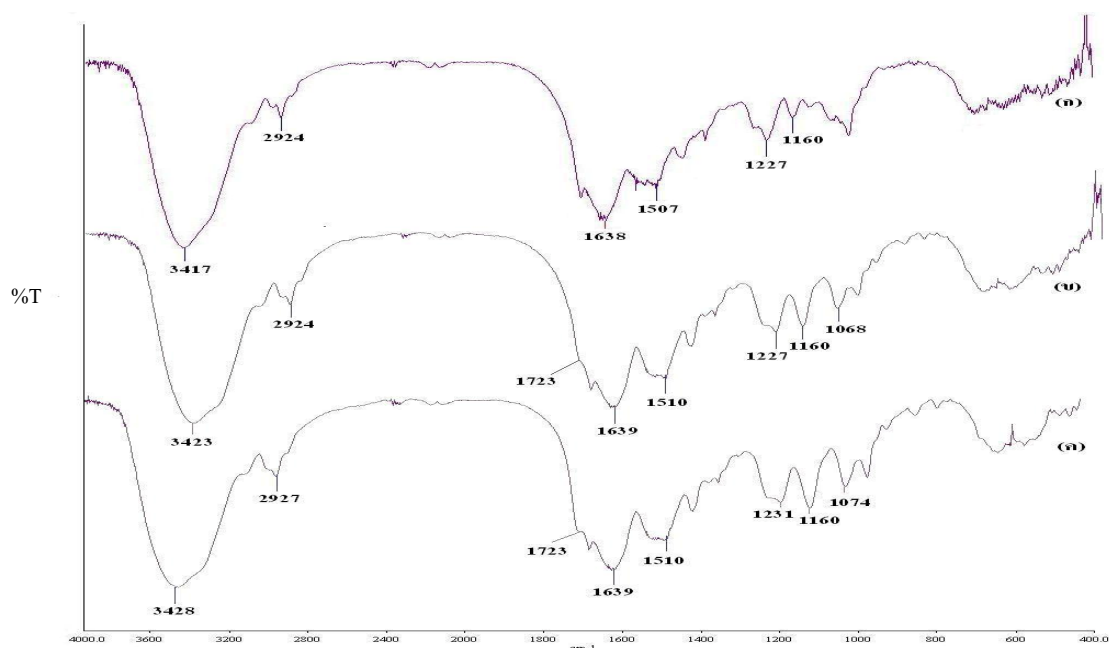
หมู่เอไมด์ปฐมภูมิ (Primary amide) และที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1160 cm^{-1} เป็นการดูดกลืนของ C-N stretching ส่วนที่ตำแหน่งเลขคลื่น $2990\text{-}2850\text{ cm}^{-1}$ เป็นการดูดกลืนของ C-H stretching ของ CH_3 และ CH_2 นอกจากนี้ในตำแหน่งเลขคลื่นที่สำคัญ คือ 3426 และ 3417 cm^{-1} เป็นการดูดกลืนของ N-H stretching ของเส้นใยไหมทั้งสองชนิด โดยลักษณะพีคของเส้นใยไหมดิบในช่วงเลขคลื่นนี้ แคมกว่าไหมลอกกาวและอยู่ที่ตำแหน่งเลขคลื่นสูงกว่าเส้นใยไหมลอกกาว ซึ่งความแตกต่างที่เกิดขึ้นคาดว่าอาจเกิดจากองค์ประกอบของกาวไหมที่เคลือบอยู่บนเส้นใยไหมดิบมีกรดอะมิโนที่มีหมู่ข้างเคียงเป็นกรดและมีหมู่เอไมด์ที่เป็นอิสระมากกว่าเส้นใยไหมลอกกาว

ตำแหน่งอินฟราเรดสเปกตรัมที่สำคัญของเส้นใยไหมดิบและเส้นใยไหมลอกกาวที่ตำแหน่งเลขคลื่นเดียวกันและที่แตกต่างกันระหว่างเส้นใยไหมดิบและเส้นใยไหมลอกกาวสามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สรุปตำแหน่งแถบการดูดกลืนของไหมดิบและไหมลอกกาวที่ปรากฏในรูปที่ 4.8

ชนิดของพอลิเมอร์	เลขคลื่น (cm^{-1})	ช่วงการดูดกลืนของ	เอกสารอ้างอิง
ไฟโบรอิน	3500 -3300	N-H stretching	40
ไฟโบรอิน	2990 – 2850	C-H stretching in $-\text{CH}_3$, $-\text{CH}_2$	9
ไฟโบรอิน	1680-1630	C=O stretching and N-H bending in amides (amide I band)	35,40
ไฟโบรอิน	1507	N-H bending in amides (amide II band)	41,42
ไฟโบรอิน	1250-1000	C-N stretching	35,42

4.4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย HEMA ที่ความเข้มข้น 0.2 และ 0.4 M.



รูปที่ 4.9 อินฟราเรดสเปกตรัมของ (ก) เส้นใยไหมที่ผ่านการลอกกาว (ข) เส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย HEMA ความเข้มข้น 0.2 M. เวลา 15 นาที มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยเพิ่มขึ้นหลังการต่อกึ่ง 24.88% และ (ค) เส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย HEMA ความเข้มข้น 0.4 M. เวลา 15 นาที มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยเพิ่มขึ้น หลังการต่อกึ่ง 38.26 %

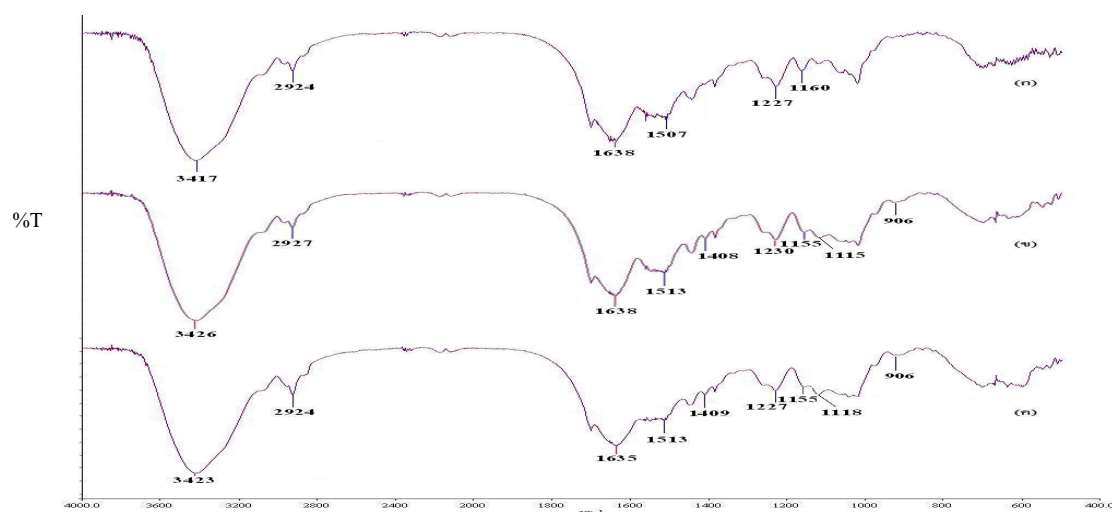
จากรูปที่ 4.9 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของเส้นใยไหมลอกกาว (รูปที่ 4.9 (ก)) และเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย HEMA ที่ความเข้มข้น 0.2 M. (รูปที่ 4.9 (ข)) และ 0.4 M. (รูปที่ 4.9 (ค)) เวลา 15 นาที พบว่า สเปกตรัมของเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย HEMA มีลักษณะแถบการดูดกลืนคล้ายคลึงกันกับเส้นใยไหมลอกกาวยกเว้นที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3417 cm^{-1} ซึ่งเป็นการดูดกลืนของ N-H stretching ของเส้นใยไหมลอกกาวเกิดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อทำการตัดแปรรเส้นใยโดยการต่อกึ่งเส้นใยด้วย HEMA ทำให้แถบการดูดกลืนในช่วงเลขคลื่นดังกล่าวเลื่อนไปยังตำแหน่งเลขคลื่นที่สูงขึ้นกว่าเส้นใยไหมลอกกาว คือ ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3423 cm^{-1} และ 3428 cm^{-1} และจากการเปรียบเทียบอินฟราเรดสเปกตรัมของเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย HEMA กับเส้นใยไหมลอกกาวพบว่าเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย HEMA เกิดแถบการดูดกลืนที่เพิ่มขึ้นจากเส้นใยไหมลอกกาวที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1723 cm^{-1} ซึ่งเป็นการดูดกลืนของ C=O stretching ของหมู่เอสเทอร์ที่เป็นหมู่ข้างเคียงของ PHEMA ส่วนที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1068 cm^{-1} และ 1074 cm^{-1} เป็นการดูดกลืนของ C-O stretching ของหมู่เอสเทอร์ที่เป็นหมู่ข้างเคียงของ PHEMA

สรุปตำแหน่งอินฟราเรดสเปกตรัมที่สำคัญของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย HEMA ที่ตำแหน่งเลขคลื่นต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 สรุปแถบการดูดกลืนของไหมลอกกาวและไหมที่ต่อกึ่งด้วย HEMA ที่ปรากฏในรูปที่ 4.9

ชนิดของพอลิเมอร์	เลขคลื่น (cm^{-1})	ช่วงการดูดกลืนของ	เอกสารอ้างอิง
ไฟโบรอิน	3500 -3300	N-H stretching	40
ไฟโบรอิน	2990 – 2850	C-H stretching in $-\text{CH}_3$, $-\text{CH}_2$	9
ไฟโบรอิน	1680-1630	C=O stretching and N-H bending in amides (amide I band)	35,40
ไฟโบรอิน	1507	N-H bending in amides (amide II band)	41,42
ไฟโบรอิน	1250-1000	C-N stretching	35,42
PHEMA 0.2 และ 0.4 M.	1723	C=O stretching in ester	34
PHEMA 0.2 และ 0.4 M.	1200-1000	C-O stretching in ester	34,42

4.4.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย Silane A-172 ที่ความเข้มข้น 0.4 และ 0.6 M.



รูปที่ 4.10 อินฟราเรดสเปกตรัมของ (ก) เส้นใยไหมที่ผ่านการลอกกาว (ข) เส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย Silane A-172 ความเข้มข้น 0.4 M. เวลา 30 นาที มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยเพิ่มขึ้นหลังการต่อกึ่ง 8.34% และ (ค) เส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย Silane A-172 ความเข้มข้น 0.6 M. เวลา 30 นาที มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยเพิ่มขึ้นหลังการต่อกึ่ง 15.03 %

จากรูปที่ 4.10 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของเส้นใยไหมลอกกาว (รูปที่ 4.10 (ก)) และเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย Silane A-172 ที่ความเข้มข้น 0.4 M. (รูปที่ 4.10 (ข)) และ 0.6 M. (รูปที่ 4.10 (ค)) เวลา 30 นาที พบว่า สเปกตรัมของเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย Silane A-172 มีลักษณะแถบการดูดกลืนคล้ายคลึงกันกับเส้นใยไหมลอกกาว ยกเว้นที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3417 cm^{-1} ซึ่งเป็นการดูดกลืนของ N-H stretching ของเส้นใยไหมลอกกาวเกิดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อทำการตัดแปรรเส้นใยโดยการต่อกึ่งเส้นใยด้วย Silane A-172 ทำให้แถบการดูดกลืนในช่วงเลขคลื่นดังกล่าวเลื่อนไปยังตำแหน่งเลขคลื่นที่สูงขึ้นกว่าเส้นใยไหมลอกกาว คือ ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3426 cm^{-1} และ 3423 cm^{-1} และจากการเปรียบเทียบอินฟราเรดสเปกตรัมของเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย Silane A-172 กับเส้นใยไหมลอกกาวพบว่าเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย Silane A-172 เกิดแถบการดูดกลืนที่เพิ่มขึ้นจากเส้นใยไหมลอกกาวที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1409 cm^{-1} - 1408 cm^{-1} ซึ่งเป็นการดูดกลืนของ Si-C ที่เกิดจากการต่อกึ่งบนเส้นใย และที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1115 cm^{-1} - 1118 cm^{-1} และ 1155 cm^{-1} ซึ่งเป็นการดูดกลืนของ Si-O stretching ของ ซิลอกเซน ส่วนที่ตำแหน่งเลขคลื่น 906 cm^{-1} เป็นการดูดกลืนของ Si-OH ที่เกิดจากการไฮโดรไลซิสของ Silane A-172 สรุปตำแหน่งอินฟราเรดสเปกตรัมที่สำคัญของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย Silane A-172 ที่ตำแหน่งเลขคลื่นต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.5

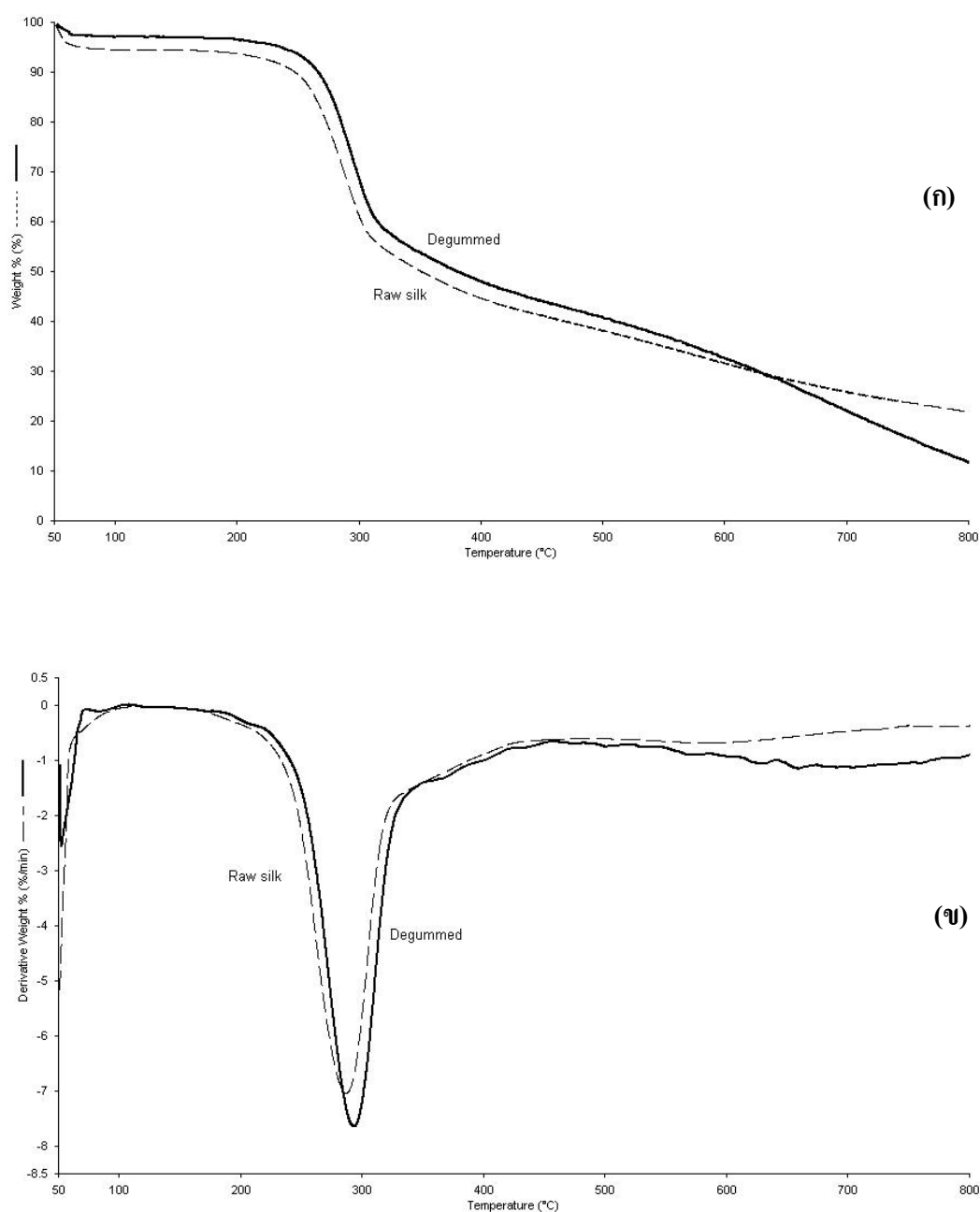
ตารางที่ 4.5 สรุปแถบการดูดกลืนของไหมลอกกาวและไหมที่ต่อกึ่งด้วย Silane A-172 ที่ปรากฏในรูปที่ 4.10

ชนิดของพอลิเมอร์	เลขคลื่น (cm^{-1})	ช่วงการดูดกลืนของ	เอกสารอ้างอิง
ไฟโบรอิน	3500 -3300	N-H stretching	40
ไฟโบรอิน	2990 – 2850	C-H stretching in $-\text{CH}_3$, $-\text{CH}_2$	9
ไฟโบรอิน	1680-1630	C=O stretching and N-H bending in amides (amide I band)	35,40
ไฟโบรอิน	1507	N-H bending in amides (amide II band)	41,42
ไฟโบรอิน	1250-1000	C-N stretching	35,42
Silane 0.4 และ 0.6 M.	1420-1400	Si-C	42
Silane 0.4 และ 0.6 M.	1200-1000	Si-O stretching in siloxane	32,42
Silane 0.4 และ 0.6 M.	910-820	Si-OH	42

4.5 สมบัติทางความร้อนของเส้นใย

สมบัติทางความร้อนของเส้นใยเป็นสมบัติหนึ่งที่สำคัญต่อการใช้งานของเส้นใย ซึ่งในทางวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์นิยมศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนโดยใช้เทคนิคเทอร์มัลกราวิเมตริก (Thermal Gravimetric Analysis, TGA) เพื่อบอกอุณหภูมิการสลายตัวของวัสดุที่ทำการทดสอบ

4.5.1 อุณหภูมิการสลายตัวของเส้นใยไหมดิบและเส้นใยไหมลอกกาว

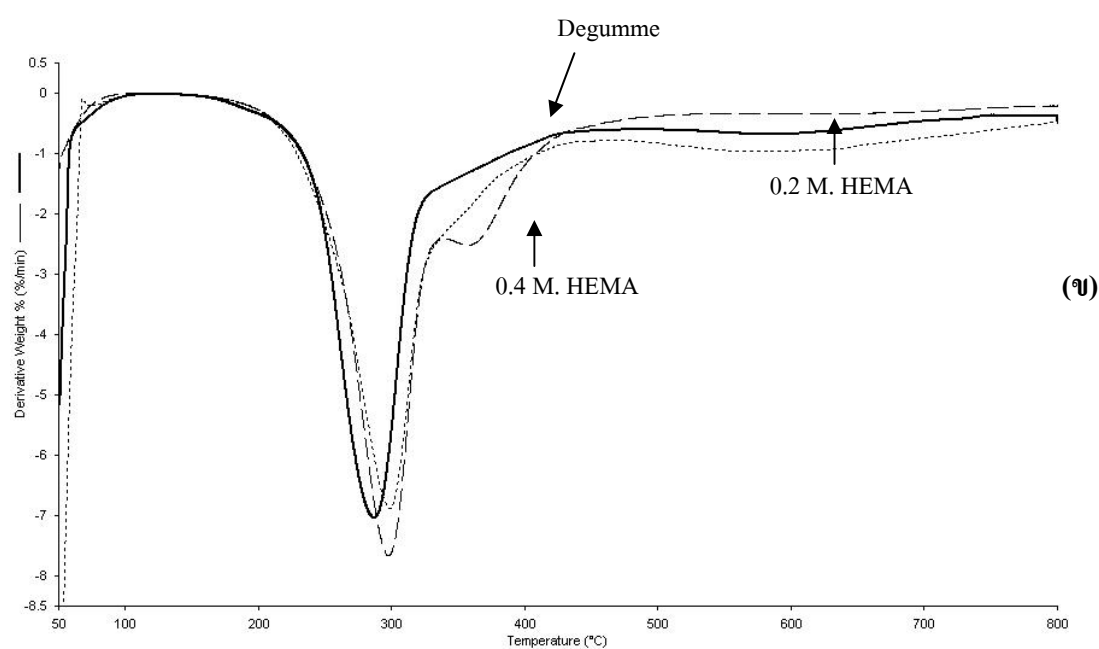
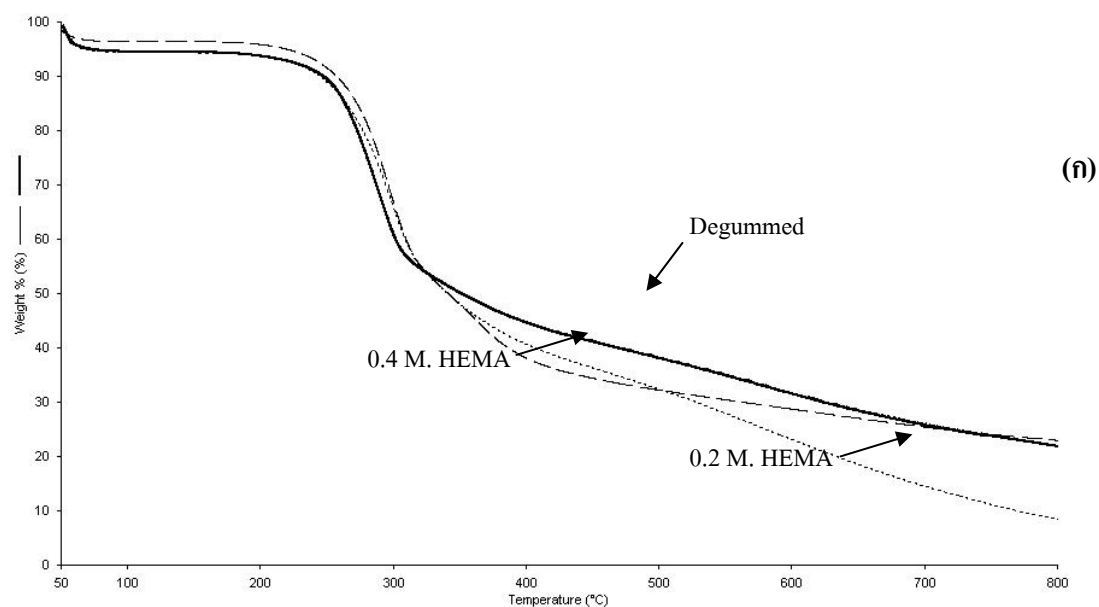


รูปที่ 4.11 เทอร์โมแกรมการสลายตัวทางความร้อนของ เส้นใยไหมดิบ และเส้นใยไหมลอกกาว โดย (ก) TGA และ (ข) DTG

จากรูปที่ 4.11 เป็นเทอร์โมแกรมการสลายตัวทางความร้อนของเส้นใยไหมดิบและเส้นใยไหมลอกกาว พบว่าเส้นใยไหมมีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนที่เกิดจากการสูญเสียน้ำหนักของเส้นใย 2 ช่วงโดยการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนในช่วงแรกเป็นการระเหยของน้ำที่เป็นองค์ประกอบของเส้นใยไหมทั้งสองชนิดที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส ส่วนในช่วงที่สองเป็นการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของการสลายตัวของไฟโบรอินในส่วนที่มีโครงสร้างเป็นแบบแผ่นจีบเบต้าในช่วงอุณหภูมิ 256-259 องศาเซลเซียส [40] เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของเส้นใยไหมดิบและเส้นใยไหมลอกกาวพบว่าเส้นใยไหมดิบมีอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวต่ำกว่าเส้นใยไหมลอกกาวซึ่งคาดว่าอาจเป็นผลมาจากการสลายตัวของเส้นใยไหมเริ่มจากการสลายตัวของกาวไหมที่ประกอบด้วยกรดอะมิโนสายโซ่สั้นๆ ซึ่งจากลักษณะดังกล่าวส่งผลให้เส้นใยไหมดิบมีอุณหภูมิการสลายตัวต่ำกว่าเส้นใยไหมลอกกาว โดยอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวของเส้นใยไหมดิบและเส้นใยไหมลอกกาว คือ 256 และ 259 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

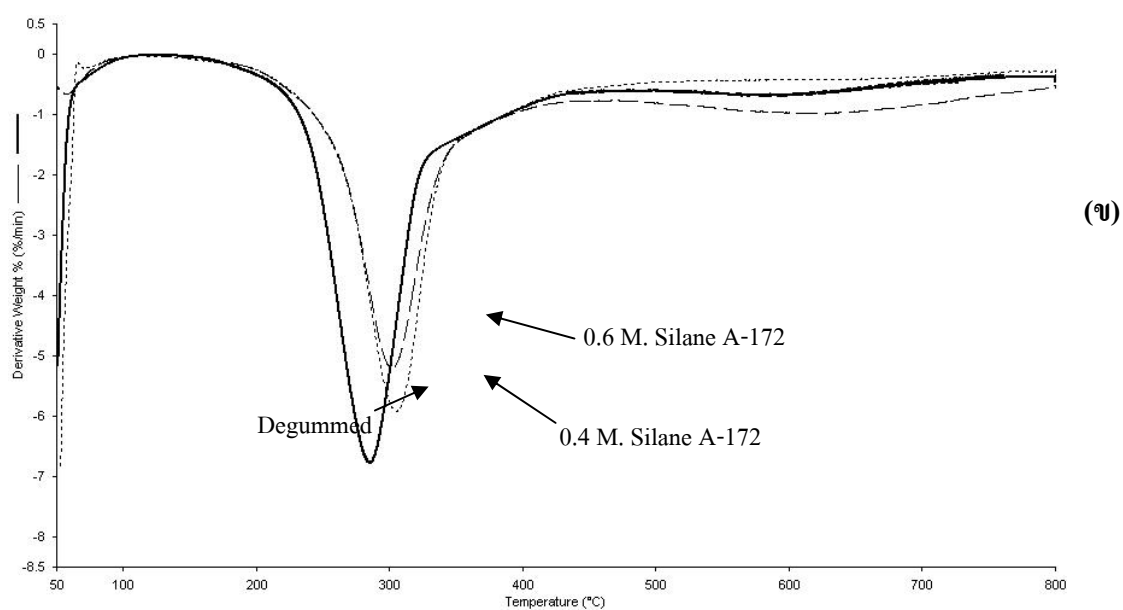
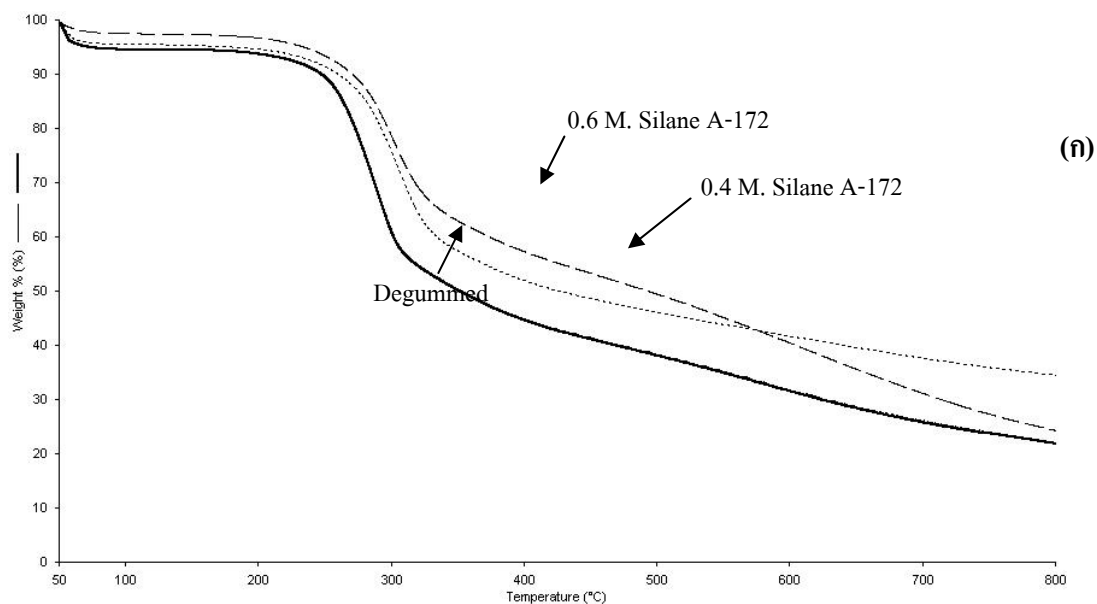
4.5.2 อุณหภูมิการสลายตัวของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย HEMA ที่ความเข้มข้น 0.2 และ 0.4 M. เวลา 15 นาที

จากรูปที่ 4.12 เมื่อเปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนระหว่างเส้นใยไหมลอกกาวกับเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย HEMA ที่ความเข้มข้น 0.2 และ 0.4 M. เวลา 15 นาที พบว่าอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวของเส้นใยไหมลอกกาว คือ 259 องศาเซลเซียส ส่วนเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย HEMA ที่ความเข้มข้น 0.2 M. มีอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวที่ 261 และ 353 องศาเซลเซียสและเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย HEMA ที่ความเข้มข้น 0.4 M. มีอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวที่ 266 และ 356 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงการสลายตัวของไฟโบรอินและ PHEMA ตามลำดับ [34]



รูปที่ 4.12 เทอร์โมแกรมการสลายตัวทางความร้อนของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย HEMA ที่ความเข้มข้น 0.2 และ 0.4 M. เวลา 15 นาที โดย (ก) TGA และ (ข) DTG

4.5.3 อุณหภูมิการสลายตัวของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ตอ่กึ่งด้วย Silane A-172 ที่ความเข้มข้น 0.4 และ 0.6 M. เวลา 30 นาที



รูปที่ 4.13 เทอร์โมแกรมการสลายตัวทางความร้อนของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ตอ่กึ่งด้วย Silane A-172 ที่ความเข้มข้น 0.4 และ 0.6 M. เวลา 30 นาที โดย (ก) TGA และ (ข) DTG

จากรูปที่ 4.13 เมื่อเปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนระหว่างเส้นใยไหมลอกกาวกับเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย Silane A-172 ที่ความเข้มข้น 0.4 และ 0.6 M. เวลา 30 นาที พบว่าอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวของเส้นใยไหมลอกกาว คือ 259 องศาเซลเซียส ส่วนเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย Silane A-172 ที่ความเข้มข้น 0.4 M. มีอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวที่ 269 และ 375 องศาเซลเซียสและเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย Silane A-172 ที่ความเข้มข้น 0.6 M. มีอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวที่ 274 และ 386 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นช่วงการสลายตัวของไฟโบรอินและ Silane A-172 ตามลำดับ

จากเทอร์โมแกรมการสลายตัวของเส้นใยไหมในรูปที่ 4.11-4.13 สามารถอธิบายได้ว่าเส้นใยไหมลอกกาวมีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนที่เกิดจากการสูญเสียน้ำหนักของเส้นใย 2 ช่วง ส่วนเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งมีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนที่เกิดจากการสูญเสียน้ำหนักของเส้นใย 3 ช่วง โดยในช่วงแรกเป็นการระเหยของน้ำที่เป็นองค์ประกอบของเส้นใยไหมที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส ซึ่งเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย HEMA ทั้งสองความเข้มข้นมีการสูญเสียน้ำหนักของเส้นใยในช่วงนี้มากกว่าเส้นใยไหมลอกกาวเล็กน้อยเป็นเพราะมอนอเมอร์ที่นำมาใช้ในการต่อกึ่งมีสมบัติที่ชอบน้ำ ในขณะที่เส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย Silane A-172 ทั้งสองความเข้มข้นมีการสูญเสียน้ำหนักของเส้นใยในช่วงนี้น้อยกว่าเส้นใยไหมลอกกาวเล็กน้อยเพราะมอนอเมอร์ที่นำมาใช้ในการต่อกึ่งมีสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ ส่วนขั้นที่สองเป็นการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของการสลายตัวของไฟโบรอินในส่วนที่มีโครงสร้างเป็นแบบแผ่นจิบเบด้าในช่วงอุณหภูมิประมาณ 256-274 องศาเซลเซียส [40] ส่วนขั้นสุดท้ายเป็นการสลายตัวของมอนอเมอร์ที่ใช้ในการต่อกึ่งในช่วงอุณหภูมิประมาณ 353-386 องศาเซลเซียส และเมื่อพิจารณาอุณหภูมิการสลายตัวของเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย HEMA ที่ความเข้มข้น 0.2 และ 0.4 M. และ Silane A-172 ที่ความเข้มข้น 0.4 และ 0.6 M สามารถสรุปได้ว่าการต่อกึ่งเส้นใยไม่สามารถรวมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับเส้นใยไหมได้ แต่การต่อกึ่งทำให้เส้นใยไหมมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่าเส้นใยไหมลอกกาวทั้งสองความเข้มข้น อาจเกิดจากมอนอเมอร์ที่นำมาใช้ในการต่อกึ่งซึ่ง HEMA มีหมู่ข้างเคียงเป็นพวกคาร์บอนิล หมู่ฟังก์ชันเหล่านี้อาจทำให้เกิดอันตรกิริยาที่แข็งแรงระหว่างสายโซ่ไฟโบรอินและมอนอเมอร์ทั้งภายในและระหว่างโมเลกุล เพราะการต่อกึ่งทำให้เกิดเป็นพอลิเมอร์ในส่วนที่เป็นออสถฐานของเส้นใย ส่วน Silane A-172 เป็นสารประกอบออร์แกโนซิลิกอนซึ่งมีพันธะ Si-O ทำให้เส้นใยที่ต่อกึ่งด้วย Silane A-172 มีเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงขึ้นและเมื่อพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการต่อกึ่งพบว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของเส้นใยหลังการต่อกึ่งเพิ่มขึ้นเส้นใยไหมมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้นซึ่งอาจเกิดจากเส้นใยมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดอันตรกิริยาที่แข็งแรงระหว่างไฟโบรอินและพอลิเมอร์ทั้งภายในและระหว่างโมเลกุลจำนวนมากขึ้น

จากเทอร์โมแกรมการสลายตัวของเส้นใยไหมในรูปที่ 4.11 - 4.13 สามารถสรุปอุณหภูมิในการสลายตัวของเส้นใยไหมดิบ เส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA และ Silane A-172 ในช่วงอุณหภูมิต่างๆ ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 อุณหภูมิการสลายตัวของเส้นใยไหมดิบ เส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA และ Silane A-172 ที่ได้จากเทคนิคเทอร์มัลกราวิเมตริก

ชนิดของตัวอย่าง	อุณหภูมิในการสลายตัว (onset) (°C)		
	ไฟโบรอิน	HEMA	Silane A-172
ไหมดิบ	256	-	-
ไหมลอกกาว	259	-	-
HEMA 0.2 M. 15 นาที	261	353	-
HEMA 0.4 M. 15 นาที	266	356	-
Silane A-172 0.4 M. 30 นาที	269	-	375
Silane A-172 0.6 M. 30 นาที	274	-	386

4.6 สมบัติเชิงกลของเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA และ Silane A-172

ขั้นตอนนี้ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของความเข้มข้นและเวลาที่ใช้ในกระบวนการปรับปรุงสมบัติเส้นใยไหมด้วยวิธีการต่อกิ่งด้วย HEMA และ Silane A-172 ที่มีต่อสมบัติทางแรงดึงของเส้นใยไหมดิบ เส้นใยไหมลอกกาว และเส้นใยไหมต่อกิ่งกับไวนิลมอนอเมอร์ สมบัติทางแรงดึงของเส้นใยที่ถูกนำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ ได้แก่ แรงที่ใช้ในการดึง (Load) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) มอดุลัส (Modulus) และ เทนาซิตี (Tenacity)

4.6.1 แรงที่ใช้ในการดึง (Load)

การศึกษาแรงที่ใช้ในการดึงเป็นการวัดแรงที่ใช้ดึงให้เส้นใยขาดออกจากกัน ซึ่งได้ทำการศึกษาแรงที่ใช้ในการดึง (Load) ของเส้นใยไหมดิบ เส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมต่อกิ่ง โดยเส้นใยไหมดิบและเส้นใยไหมลอกกาวมีค่าแรงที่ใช้ในการดึงเป็น 5.93 ± 0.45 และ 5.56 ± 0.48 N ตามลำดับ

ตารางที่ 4.7 แรงที่ใช้ในการดึง (Load) ของเส้นใยไหมที่ผ่านการตอ่กึ่งด้วย HEMA ที่ความเข้มข้นและเวลาต่างๆ กัน

HEMA	Load (N)				
	เวลา (นาทึ)				
ความเข้มข้น	15 min	30 min	45 min	60 min	120 min
0.1 M.	5.73 ± 0.12	5.77 ± 0.40	5.75 ± 0.33	5.73 ± 0.32	5.74 ± 0.27
0.2 M.	5.87 ± 0.23	5.92 ± 0.42	5.92 ± 0.48	5.95 ± 0.36	5.93 ± 0.30
0.3 M.	5.93 ± 0.27	5.94 ± 0.27	5.96 ± 0.36	6.05 ± 0.07	6.00 ± 0.20
0.4 M.	5.97 ± 0.30	6.01 ± 0.16	6.00 ± 0.14	6.03 ± 0.28	6.05 ± 0.38

ตารางที่ 4.8 แรงที่ใช้ในการดึง (Load) ของเส้นใยไหมที่ผ่านการตอ่กึ่งด้วย Silane A-172 ที่ความเข้มข้นและเวลาต่างๆ กัน

Silane A-172	Load (N)				
	เวลา (นาทึ)				
ความเข้มข้น	15 min	30 min	45 min	60 min	120 min
0.2 M.	5.64 ± 0.19	5.58 ± 0.38	5.61 ± 0.37	5.67 ± 0.32	5.64 ± 0.28
0.4 M.	5.85 ± 0.40	5.87 ± 0.26	5.82 ± 0.22	5.86 ± 0.24	5.83 ± 0.29
0.6 M.	5.89 ± 0.24	5.90 ± 0.40	5.86 ± 0.25	5.82 ± 0.33	5.88 ± 0.29
0.8 M.	5.86 ± 0.20	5.88 ± 0.35	5.87 ± 0.26	5.90 ± 0.32	5.85 ± 0.20

เมื่อเปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการดึงของเส้นใยไหมดิบและเส้นใยไหมลอกกว พบว่าเส้นใยไหมดิบมีค่าแรงที่ใช้ในการดึงใกล้เคียงกับเส้นใยไหมลอกกว เมื่อเปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการดึงระหว่างเส้นใยไหมลอกกวกับเส้นใยไหมที่ตอ่กึ่งด้วย HEMA และ Silane A-172 ที่ความเข้มข้นและเวลาต่างๆ กัน พบว่าเส้นใยที่ทำการตอ่กึ่งมีค่าแรงที่ใช้ในการดึงใกล้เคียงกับเส้นใยไหมลอกกว ถึงแม้ว่ามอนอเมอร์ที่ใช้ในการตอ่กึ่งเกิดการรวมตัวกันเป็น โอลิโกเมอร์เกาะอยู่พื้นผิวของเส้นใย แต่ความสามารถในการต้านแรงที่ใช้ในการดึงไม่มากขึ้น จากตารางที่ 4.7 และ 4.8 เมื่อพิจารณาความเข้มข้นและเวลาที่ใช้ในการตอ่กึ่งด้วย HEMA และ Silane A-172 พบว่าเมื่อความเข้มข้นและเวลาที่ใช้ในการตอ่กึ่งเพิ่มขึ้น เปอร์เซนต์น้ำหนักของเส้นใยหลังการตอ่กึ่งเพิ่มขึ้น ค่าแรงที่ใช้ในการดึงมีค่าใกล้เคียงกัน

4.6.2 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break)

ความสามารถในการยึดของเส้นใยเป็นการวัดระยะทางที่เปลี่ยนแปลงในทิศทางของแรงดึง เทียบกับความยาวเริ่มต้น ค่าที่ได้มีหน่วยเป็นค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด (%Elongation) ซึ่งได้ ทำการศึกษาเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) ของเส้นใยไหมดิบ เส้นใยไหมลอกขาว และเส้นใยไหมต่อกึ่ง โดยเส้นใยไหมดิบ และเส้นใยไหมลอกขาวมี เปอร์เซ็นต์การดึงยืดเป็น 19.33 ± 2.42 และ 25.49 ± 4.27 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.9 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) ของเส้นใยไหมที่ผ่านการต่อกึ่ง ด้วย HEMA ที่ความเข้มข้นและเวลาต่างๆ กัน

HEMA	Elongation at break (%)				
	เวลา (นาที)				
ความเข้มข้น	15 min	30 min	45 min	60 min	120 min
0.1 M.	23.00 ± 2.08	21.50 ± 1.52	21.02 ± 1.52	21.49 ± 2.45	21.81 ± 1.36
0.2 M.	19.94 ± 1.61	20.07 ± 2.07	20.27 ± 2.44	19.94 ± 2.89	19.67 ± 2.64
0.3 M.	19.35 ± 1.42	18.95 ± 2.42	18.27 ± 0.74	18.13 ± 1.32	16.63 ± 0.96
0.4 M.	18.97 ± 2.30	16.80 ± 2.89	16.93 ± 1.13	16.91 ± 0.92	16.02 ± 1.79

ตารางที่ 4.10 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) ของเส้นใยไหมที่ผ่านการต่อกึ่ง ด้วย Silane A-172 ที่ความเข้มข้นและเวลาต่างๆ กัน

Silane A-172	Elongation at break (%)				
	เวลา (นาที)				
ความเข้มข้น	15 min	30 min	45 min	60 min	120 min
0.2 M.	25.75 ± 2.85	25.55 ± 4.34	25.10 ± 3.29	25.61 ± 2.90	25.97 ± 2.77
0.4 M.	26.47 ± 3.35	26.33 ± 3.20	26.40 ± 2.48	26.10 ± 2.32	26.15 ± 2.87
0.6 M.	27.08 ± 1.30	27.73 ± 3.37	27.62 ± 3.55	27.15 ± 0.72	27.67 ± 3.40
0.8 M.	29.05 ± 2.13	28.96 ± 1.73	28.82 ± 1.90	28.92 ± 2.20	28.95 ± 1.97

เมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาดของเส้นใยไหมดิบและเส้นใยไหมลอกกาว พบว่าเส้นใยไหมลอกกาวมีเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาดสูงกว่าเส้นใยไหมดิบ เนื่องจากกาวไหมที่เคลือบอยู่ที่ผิวของเส้นใยเป็นตัวขัดขวางการส่งผ่านแรงดึงของเส้นใยทำให้เส้นใยมีความสามารถในการกระจายแรงของเส้นใยลดลงส่งผลให้เส้นใยมีความสามารถในการยืดตัวและเมื่อกำจัดกาวไหมซึ่งเป็นตัวขัดขวางการเคลื่อนที่ออกไป ทำให้เส้นใยมีความสามารถในการกระจายแรงมากขึ้น ดังนั้นเส้นใยไหมลอกกาวจึงมีความสามารถในการดึงยึดสูงกว่าเส้นใยไหมดิบ จากตารางที่ 4.9 เมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาดของเส้นใยไหมลอกกาวกับเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA พบว่าเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA ในทุกเวลาและทุกความเข้มข้นมีความสามารถในการดึงยึดต่ำกว่าเส้นใยไหมลอกกาว เนื่องจากมอนอเมอร์ที่ใช้ในการต่อกิ่งเส้นใยเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์รวมแบบต่อกิ่งในบริเวณ อดัณฐานของเส้นใยเกิดเป็นโอลิโกเมอร์เกาะอยู่ที่พื้นผิวของเส้นใย ซึ่งโอลิโกเมอร์ที่เกิดขึ้นเป็นตัวขัดขวางการส่งผ่านแรงดึงของเส้นใย ทำให้เส้นใยมีความสามารถในการกระจายแรงของเส้นใยลดลง จึงส่งผลให้เส้นใยที่ต่อกิ่งมีความสามารถในการดึงยึดลดลง เมื่อพิจารณาความเข้มข้นและเวลา พบว่าที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของเส้นใยหลังการต่อกิ่งเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง แต่การใช้เวลาในการต่อกิ่งเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของเส้นใยหลังการต่อกิ่งใกล้เคียงกัน เปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาดจึงมีค่าใกล้เคียงกัน และจากตารางที่ 4.10 เมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาดของเส้นใยไหมลอกกาวกับเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย Silane A-172 พบว่าเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย Silane A-172 ในทุกเวลาและทุกความเข้มข้นมีความสามารถในการดึงยึดสูงกว่าเส้นใยไหมลอกกาวเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากมอนอเมอร์ที่ใช้ในการต่อกิ่งเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์รวมแบบต่อกิ่งกับเส้นใยและเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบควบแน่นของมอนอเมอร์เกิดเป็นสายโซ่พอลิไซลอคเซนซึ่งมีความยืดหยุ่นสูง [32] ทำให้เส้นใยมีความสามารถในการดึงยึดสูงขึ้นเล็กน้อย และเมื่อพิจารณาความเข้มข้นและเวลา พบว่าที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของเส้นใยหลังการต่อกิ่งเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาดมีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อย แต่การใช้เวลาในการต่อกิ่งเพิ่มขึ้นเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาดมีค่าใกล้เคียงกัน

4.6.3 มอดุลัส (Modulus)

เป็นค่าที่แสดงถึงค่าความแข็งของเส้นใย ซึ่งเป็นการวัดความสามารถในการทนต่อแรงดึงจากภายนอก โดยเป็นอัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อความเครียด ค่าที่ได้มีหน่วยเป็นจิกกะปาสคาน (GPa) ซึ่งได้ทำการศึกษามอดุลัส (Modulus) ของเส้นใยไหมดิบ เส้นใยไหมลอกกาว และเส้นใยไหมต่อกิ่ง โดยเส้นใยไหมดิบและเส้นใยไหมลอกกาวมีค่ามอดุลัส เป็น 4.08 ± 0.25 และ 2.44 ± 0.13 GPa ตามลำดับ

ตารางที่ 4.11 มอดุลัส (Modulus) ของเส้นใยไหมที่ผ่านการต่อกิ่งด้วย HEMA ที่ความเข้มข้นและเวลาต่างๆ กัน

HEMA	Modulus (GPa)				
	เวลา (นาทีก)				
ความเข้มข้น	15 min	30 min	45 min	60 min	120 min
0.1 M.	2.63 ± 0.51	2.66 ± 0.28	2.62 ± 0.31	2.63 ± 0.22	2.65 ± 0.37
0.2 M.	2.73 ± 0.30	2.78 ± 0.55	2.79 ± 0.22	2.75 ± 0.13	2.76 ± 0.18
0.3 M.	2.79 ± 0.37	2.84 ± 0.22	2.84 ± 0.51	2.93 ± 0.27	2.92 ± 0.32
0.4 M.	2.85 ± 0.17	2.93 ± 0.38	2.90 ± 0.34	3.01 ± 0.33	3.02 ± 0.23

ตารางที่ 4.12 มอดุลัส (Modulus) ของเส้นใยไหมที่ผ่านการต่อกิ่งด้วย Silane A-172 ที่ความเข้มข้นและเวลาต่างๆ กัน

Silane A-172	Modulus (GPa)				
	เวลา (นาทีก)				
ความเข้มข้น	15 min	30 min	45 min	60 min	120 min
0.2 M.	2.49 ± 0.13	2.53 ± 0.11	2.52 ± 0.28	2.52 ± 0.29	2.58 ± 0.15
0.4 M.	2.62 ± 0.27	2.68 ± 0.27	2.65 ± 0.28	2.68 ± 0.22	2.63 ± 0.25
0.6 M.	2.65 ± 0.25	2.61 ± 0.31	2.60 ± 0.15	2.67 ± 0.27	2.66 ± 0.66
0.8 M.	2.63 ± 0.19	2.70 ± 0.30	2.72 ± 0.22	2.67 ± 0.34	2.69 ± 0.26

เมื่อเปรียบเทียบค่ามอดุลัสของเส้นใยไหมดิบและเส้นใยไหมลอกกาว พบว่าเส้นใยไหมดิบมีค่ามอดุลัสสูงกว่าเส้นใยไหมลอกกาวเพราะกาวไหมมีลักษณะเป็นของแข็งสีเหลืองเคลือบอยู่ที่ผิวของเส้นใยทำให้เส้นใยแข็งแรงกระด้างมีความสามารถในการต้านแรงดึงสูงแต่ความสามารถในการดึงยืดต่ำ เมื่อเปรียบเทียบค่ามอดุลัสของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA และ Silane A-172 พบว่าเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA และ Silane A-172 ทุกความเข้มข้นและทุกช่วงเวลามีค่ามอดุลัสใกล้เคียงกับเส้นใยไหมลอกกาว และจากตารางที่ 4.11 และ 4.12 เมื่อพิจารณาความเข้มข้นและเวลาที่ใช้ในการต่อกิ่งด้วย HEMA และ Silane A-172 พบว่าที่ความเข้มข้นและเวลาที่ใช้ในการต่อกิ่งเพิ่มขึ้นค่ามอดุลัสมีค่าใกล้เคียงกัน

4.6.4 เทนาซิตี (Tenacity)

เป็นการวัดแรงต่อน้ำหนักมีหน่วยเป็นกรัมต่อเดนิเยร์ (g/denier) โดยในทางอุตสาหกรรมค่าเทนาซิตีนิยมนำไปใช้ออกความแข็งแรงของเส้นใย ซึ่งได้ทำการศึกษาเทนาซิตี (Tenacity) ของเส้นใยไหมดิบ เส้นใยไหมลอกกว และเส้นใยไหมตอกิ่ง โดยเส้นใยไหมดิบและเส้นใยไหมลอกกว มีค่าเทนาซิตีเป็น 3.47 ± 0.33 และ 4.05 ± 0.39 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.13 เทนาซิตี (Tenacity) ของเส้นใยไหมตอกิ่งด้วย HEMA ที่ความเข้มข้นและเวลาต่างๆ กัน

HEMA	Tenacity (g/denier)				
	เวลา (นาที)				
ความเข้มข้น	15 min	30 min	45 min	60 min	120 min
0.1 M.	3.51 ± 0.41	3.47 ± 0.44	3.49 ± 0.54	3.48 ± 0.55	3.46 ± 0.29
0.2 M.	3.46 ± 0.28	3.42 ± 0.28	3.35 ± 0.27	3.36 ± 0.44	2.90 ± 0.17
0.3 M.	3.19 ± 0.33	3.02 ± 0.20	2.92 ± 0.29	2.94 ± 0.42	2.83 ± 0.11
0.4 M.	3.08 ± 0.32	2.90 ± 0.37	2.90 ± 0.17	2.73 ± 0.26	2.63 ± 0.23

ตารางที่ 4.14 เทนาซิตี (Tenacity) ของเส้นใยไหมตอกิ่งด้วย Silane A-172 ที่ความเข้มข้นและเวลาต่างๆ กัน

Silane A-172	Tenacity (g/denier)				
	เวลา (นาที)				
ความเข้มข้น	15 min	30 min	45 min	60 min	120 min
0.2 M.	3.96 ± 0.42	3.92 ± 0.38	3.97 ± 0.42	3.95 ± 0.39	3.93 ± 0.62
0.4 M.	3.83 ± 0.43	3.89 ± 0.51	3.77 ± 0.55	3.79 ± 0.27	3.64 ± 0.76
0.6 M.	3.58 ± 0.48	3.52 ± 0.67	3.60 ± 0.28	3.58 ± 0.22	3.47 ± 0.44
0.8 M.	3.65 ± 0.43	3.60 ± 0.42	3.55 ± 0.32	3.66 ± 0.22	3.57 ± 0.29

เมื่อเปรียบเทียบค่าเทนาคีของเส้นใยไหมดิบและเส้นใยไหมลอกกาว พบว่าเส้นใยไหมดิบมีค่าเทนาคีต่ำกว่าเส้นใยไหมลอกกาว เนื่องจากเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของเส้นใยที่หายไปหลังการลอกกาวสูงกว่าอัตราการเพิ่มแรงที่ใช้ในการดึงให้เส้นใยไหมขาด เมื่อเปรียบเทียบค่าเทนาคีของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย HEMA และ Silane A-172 พบว่าเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย HEMA และ Silane A-172 ทุกความเข้มข้นและทุกช่วงเวลามีค่าเทนาคีต่ำกว่าเส้นใยไหมลอกกาวเล็กน้อย เนื่องจากเส้นใยไหมที่ทำการต่อกึ่งมีน้ำหนักที่เพิ่มมากขึ้นในขณะที่ใช้แรงในการดึงเท่าเดิม จากตารางที่ 4.13 เมื่อพิจารณาความเข้มข้นและเวลาที่ใช้ในการต่อกึ่งด้วย HEMA พบว่าที่ความเข้มข้นและเวลาที่ใช้ในการต่อกึ่งเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของเส้นใยหลังการต่อกึ่งเพิ่มขึ้น ค่าเทนาคีมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เนื่องจากปริมาณของพอลิเมอร์ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์รวมแบบต่อกึ่งมากขึ้นทำให้น้ำหนักของเส้นใยหลังการต่อกึ่งเพิ่มสูงขึ้นแต่แรงที่ใช้ในการดึงให้เส้นใยไหมขาดมีค่าเท่าเดิม และจากตารางที่ 4.14 เมื่อพิจารณาความเข้มข้นและเวลาที่ใช้ในการต่อกึ่งด้วย Silane A-172 พบว่าที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของเส้นใยหลังการต่อกึ่งเพิ่มขึ้นค่าเทนาคีมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ส่วนเวลาที่ใช้ในการต่อกึ่งเพิ่มขึ้น ค่าเทนาคีไม่เปลี่ยนแปลง

4.7 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมี

สมบัติของเส้นใยจะส่งผลโดยตรงต่อสมบัติการใช้งานเฉพาะด้านของผลิตภัณฑ์ดังนั้นต้องเข้าใจและเลือกใช้เส้นใยให้เหมาะสมกับงาน ซึ่งโดยทั่วไปสมบัติของเส้นใยจะถูกกำหนดจากปัจจัยต่างๆ ซึ่งสามารถแบ่งการศึกษาเส้นใยออกได้เป็นสองส่วน คือ สมบัติกายภาพและสมบัติทางเคมี โดยในส่วนของสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความชื้นรีเจน (Moisture regain) และในส่วนของสมบัติทางเคมี ได้แก่ การทดสอบความคงทนต่อกรดและความคงทนต่อด่างของเส้นใยไหมดิบไหมลอกกาว และเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย HEMA และ Silane A-172

4.7.1 ความชื้นรีเจน (Moisture Regain)

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบความสามารถในการดูดความชื้นของเส้นใยไหมดิบเส้นใยไหมลอกกาว และเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย HEMA และ Silane A-172 ที่สภาวะมาตรฐาน คือ อุณหภูมิ 20°C ความชื้นสัมพัทธ์ 65 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดลองที่ได้ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 เปอร์เซ็นต์ความขึ้นรีเทนของเส้นใยไหมดิบ เส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมตอกิ่ง

ชนิดของตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังจากการตอกิ่ง	ความขึ้นรีเทน(%)
ไหมดิบ	-	1.62 ± 0.87
ไหมลอกกาว	-	5.18 ± 1.07
0.2 M. HEMA 15 นาที	24.88 ± 2.53	7.33 ± 0.73
0.4 M. HEMA 15 นาที	38.26 ± 1.61	7.54 ± 1.31
0.4 M. Silane A-172 30 นาที	8.34 ± 1.47	4.87 ± 0.90
0.6 M. Silane A-172 30 นาที	15.03 ± 2.19	4.73 ± 0.73

จากการพิจารณาเปรียบเทียบความขึ้นรีเทนระหว่างเส้นใยไหมดิบกับเส้นใยไหมลอกกาว และระหว่างเส้นใยไหมลอกกาวกับเส้นใยไหมที่ตอกิ่งด้วยไวนิลมอนอเมอร์ (ตารางที่ 4.15) พบว่า เส้นใยไหมดิบมีความขึ้นรีเทนน้อยกว่าไหมลอกกาวซึ่งเป็นผลมาจากองค์ประกอบของกาวไหมที่เคลือบอยู่ที่พื้นผิวด้านนอกที่นอกจากจะมีกรดอะมิโนเป็นองค์ประกอบหลักแล้ว แต่ยังมีสารอื่นๆ เคลือบอยู่ด้านนอกด้วย เช่น ซัลเฟอร์ คาร์โบไฮเดรต วัตถุเคมี และสารอนินทรีย์ เป็นต้น ทำให้เส้นใยมีลักษณะที่เป็นส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) มากกว่าเพราะเหตุนี้เส้นใยไหมดิบจึงมีความขึ้นรีเทนต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยไหมที่ผ่านการลอกกาว

ส่วนในกรณีของเส้นใยไหมลอกกาวกับเส้นใยไหมที่ตอกิ่งด้วย HEMA ที่ความเข้มข้น 0.2 และ 0.4 M. พบว่าเส้นใยไหมที่ตอกิ่งด้วย HEMA ทั้ง 2 ความเข้มข้นมีความขึ้นรีเทนสูงกว่าเส้นใยไหมลอกกาวเป็นผลมาจากเส้นใยไหมที่ตอกิ่งด้วย HEMA ทั้ง 2 ความเข้มข้นมีไฮโดรพอลิเมอร์ของ HEMA ที่เป็นส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) โดยเฉพาะหมู่ไฮดรอกซิลมาเกาะอยู่ที่พื้นผิวด้านนอกของเส้นใยมากขึ้นจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เส้นใยไหมที่ตอกิ่งด้วย HEMA มีความขึ้นรีเทนเพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความขึ้นรีเทนของเส้นใยไหมที่ตอกิ่งด้วย HEMA ทั้ง 2 ความเข้มข้น พบว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของเส้นใยหลังการตอกิ่งเพิ่มขึ้นความขึ้นรีเทนเพิ่มขึ้นไม่แตกต่างกัน

เมื่อเปรียบเทียบความขึ้นรีเทนระหว่างเส้นใยไหมลอกกาวกับเส้นใยไหมที่ตอกิ่งด้วย Silane A-172 ทั้ง 2 ความเข้มข้น พบว่าเส้นใยไหมที่ตอกิ่งด้วย Silane A-172 มีความขึ้นรีเทนลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยไหมลอกกาว อาจเป็นเพราะ Silane A-172 มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) เนื่องจากมีความเป็นขั้วน้อยเมื่อเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่งกับเส้นใยไหม ทำให้เส้นใยไหมที่ตอกิ่งด้วย Silane A-172 มีความไม่ชอบน้ำ แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบ

ความชื้นรีเจนของเส้นใยไหมที่ตอ้งด้วย Silane A-172 ทั้ง 2 ความเข้มข้น พบว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของเส้นใยหลังการตอ้งเพิ่มขึ้นความชื้นรีเจนไม่แตกต่างกันเช่นเดียวกับกรณีของเส้นใยไหมที่ตอ้งด้วย HEMA

4.7.2 ความทนต่อการกรดและด่าง (Acid Resistance and Alkaline Resistance)

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความทนทานต่อการกรดและด่างของเส้นใยไหมดิบ เส้นใยไหมลอกขาว และเส้นใยไหมที่ตอ้งด้วย HEMA และ Silane A-172 เนื่องจากเส้นใยจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อถูกสารเคมี ได้แก่ กรด ด่าง ซึ่งค่าความทนต่อการกรดและด่างของเส้นใยไหมได้จากความสามารถในการละลายในกรดและด่างของไหมดิบ เส้นใยไหมลอกขาว และเส้นใยไหมที่ตอ้งด้วย HEMA และ Silane A-172 โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของเส้นใยหลังการทดสอบ ทั้งนี้เพื่อจะเป็นแนวทางในการทำมาสะอาดและดูแลรักษาให้เหมาะสมชนิดของเส้นใย ดังแสดงในตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 เปอร์เซนต์น้ำหนักที่หายไปในการดและด่างของเส้นใยไหมดิบ เส้นใยไหมลอกขาว และเส้นใยไหมที่ตอ้งด้วย HEMA และ Silane A-172

ชนิดของตัวอย่าง	เปอร์เซนต์น้ำหนักที่หายไป	
	กรด	ด่าง
ไหมดิบ	44.09 ± 1.10	15.92 ± 0.72
ไหมลอกขาว	21.78 ± 1.33	6.42 ± 1.81
0.2 M. HEMA 15 นาที	9.75 ± 1.22	4.95 ± 0.70
0.4 M. HEMA 15 นาที	6.17 ± 1.69	4.62 ± 0.62
0.4 M. Silane A-172 30 นาที	12.22 ± 1.11	6.26 ± 0.23
0.6 M. Silane A-172 30 นาที	20.49 ± 0.40	6.38 ± 0.52

จากการทดสอบความทนต่อการกรดของเส้นใยไหมดิบและเส้นใยไหมลอกขาว พบว่าเส้นใยไหมดิบเปลี่ยนสีจากสีเหลืองเป็นสีเขียว ส่วนเส้นใยไหมลอกขาวเปลี่ยนเป็นสีขาวซึ่งเป็นผลมาจากการขาดออกจากกันของพันธะเพปไทด์ของโปรตีน [1] ในขณะที่การทดสอบความทนต่อด่างของเส้นใยไหมดิบเปลี่ยนสีจากสีเหลืองเป็นสีขาวและเส้นใยไหมลอกขาวมีลักษณะฟูขึ้นเล็กน้อยและความมันเงาลดลง เพราะด่างทำให้เส้นใยไหมเกิดการพองตัวเมื่อเส้นใยไหมแช่อยู่ในสารละลายด่างเป็นเวลานานๆ ส่งผลให้พันธะเพปไทด์ที่ปลายสายโซ่ของโปรตีนเส้นใยไหมเกิดการไฮโดรไลซ์ [1] ทำให้ความมันเงาของเส้นใยไหมลดลง และเมื่อเปรียบเทียบความทนต่อการกรดและด่างระหว่างเส้นใยไหมดิบกับเส้นใยไหมลอกขาว พบว่าเส้นใยไหมดิบมีความทนต่อการ

และต่างต่ำกว่าเส้นใยไหมลอกกาว เนื่องจากกาวไหมที่เคลือบอยู่บนเส้นใยไหมดิบเป็นสายโซ่โมเลกุลพอลิเปปไทด์มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าไฟโบรอินจึงทำให้กาวไหมละลายได้ในกรดหรือด่าง [1]

เมื่อพิจารณาความคงทนต่อกรดและด่างของเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA ทั้ง 2 ความเข้มข้นพบว่าลักษณะของเส้นใยที่ต่อกิ่งด้วย HEMA ทั้ง 2 ความเข้มข้นมีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก แต่เมื่อเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของเส้นใยที่ต่อกิ่งด้วย HEMA ทั้ง 2 ความเข้มข้นกับเส้นใยไหมดิบและเส้นใยไหมลอกกาวพบว่าเส้นใยที่ต่อกิ่งด้วย HEMA ทั้ง 2 ความเข้มข้นมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของเส้นใยน้อยกว่าเส้นใยไหมดิบและไหมลอกกาวอย่างเห็นได้ชัด แสดงว่าเส้นใยที่ต่อกิ่งด้วย HEMA ทั้ง 2 ความเข้มข้นมีความคงทนต่อกรดและด่างมากกว่าเส้นใยไหมลอกกาวเนื่องจากการต่อกิ่งเส้นใยไหมทำให้บริเวณอสังฐานมีความหนาแน่นมากขึ้น กรดและด่างจึงแทรกซึมลงไปเส้นใยไหมต่อกิ่งได้ยากกว่าเส้นใยไหมลอกกาว

ในขณะที่การทดสอบความคงทนต่อกรดและด่างของเส้นใยที่ต่อกิ่งด้วย Silane A-172 ทั้ง 2 ความเข้มข้นพบว่าเมื่อความเข้มข้นของ Silane A-172 เพิ่มขึ้น ความคงทนต่อกรดของเส้นใยที่ต่อกิ่งด้วย Silane A-172 มีแนวโน้มลดลง แต่ความคงทนต่อด่างไม่เปลี่ยนแปลง และมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของเส้นใยน้อยกว่าเส้นใยไหมดิบและเส้นใยไหมลอกกาว

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบผลของชนิดมอนอเมอร์พบว่าเส้นใยที่ต่อกิ่งด้วย HEMA มีความคงทนต่อกรดและด่างมากกว่าเส้นใยที่ต่อกิ่งด้วย Silane A-172 เพราะเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของเส้นใย หลังการต่อกิ่งด้วย HEMA เพิ่มขึ้นมากกว่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของเส้นใยหลังการต่อกิ่งด้วย Silane A-172 ทำให้บริเวณอสังฐานของเส้นใยมีความหนาแน่นมากกว่าจึงทำให้กรดและด่างแทรกซึมลงไปเส้นใยไหมได้ยากกว่า

4.8 กระบวนการย้อมสี

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการย้อมสีเส้นใยไหมลอกกาว เส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA ที่ความเข้มข้น 0.2 กับ 0.4 M. เวลา 15 นาที และ Silane A-172 ที่ความเข้มข้น 0.4 กับ 0.6 M. เวลา 30 นาที โดยศึกษาด้านความสามารถในการย้อมสี ความเข้มของสีที่ย้อมติดบนเส้นใย ความคงทนของสีย้อมหลังการซัก ความคงทนของสีต่อเหงื่อ และความคงทนของสีต่อแสง โดยสีที่ใช้ในการย้อมจะใช้สีย้อมธรรมชาติ คือ ขมิ้น และครั่ง ซึ่งสารให้สีของขมิ้น คือ เคอร์คูมิน เป็นสารให้สีในกลุ่มฟลาโวนอยด์ โดยใช้ตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำกับเอทานอลในอัตราส่วน 25:75 เป็นตัวสกัด [29] ส่วนสารให้สีของครั่ง คือ แลคคาอิกแอซิด เป็นสารให้สีในกลุ่มแอนทราควิโนน ใช้ตัวทำละลายน้ำเป็นตัวสกัด [19] และใช้โพแทสเซียมอะลูมิเนียมซัลเฟต (สารส้ม, $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$) เป็นสารเคมีช่วยให้สีย้อมติดเส้นใยได้ดีขึ้นหรือที่เรียกว่า มอร์แดนท์ ซึ่งมีอิทธิพลต่อเฉดสีและความคงทนของสีต่อสภาวะต่างๆ

4.8.1 ความสามารถในการย้อมสี

งานวิจัยนี้ได้พิจารณาความสามารถในการย้อมสีของเส้นใยไหมจากค่า K/S โดยการวัดสีเพื่อหาค่า R (Reflectance) ซึ่งเป็นค่าการสะท้อนที่ความยาวคลื่นของการดูดกลืนแสงสูงสุด โดยวัดออกมาเป็นค่า %R แล้วนำมาคำนวณหาค่า K/S จากสูตร $K/S = (1 - R)^2 / 2R$ โดย K = absorption coefficient และ S = scattering coefficient ซึ่งใช้บอกความสามารถในการติดสีของเส้นใยได้ โดยถ้าค่า K/S มาก แสดงถึงความสามารถในการย้อมติดสีมาก และถ้าค่า K/S น้อย แสดงถึงความสามารถในการย้อมติดสีน้อย โดยสีย้อมขมื่นและสีย้อมครั้งดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นมากที่สุดคือ 410 nm. และ 500 nm. ตามลำดับ

ในส่วนนี้จะศึกษาหาความสามารถในการย้อมสีของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ดอ์กั้ด้วย HEMA และ Silane A-172 ด้วยสีย้อมธรรมชาติที่ได้จาก ขมิ้น และครั้ง

ตารางที่ 4.17 ความสามารถในการย้อมสีของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ดอ์กั้ด้วย HEMAและ Silane A-172 ที่ทำการย้อมสีด้วยสีย้อมขมื่น

ชนิดของตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังจากการดอ์กั้	% R	ค่า K/S	% K/S
ไหมลอกกาว	-	0.89	55.18	-
0.2 M. HEMA 15 นาที	24.88 ± 2.53	0.68	72.53	31.44
0.4 M. HEMA 15 นาที	38.26 ± 5.66	0.58	85.21	54.42
0.4 M. Silane A-172 30 นาที	8.34 ± 1.47	0.93	52.77	-4.36
0.6 M. Silane A-172 30 นาที	15.03 ± 2.19	1.11	44.46	-19.43

หมายเหตุ : เครื่องหมายติดลบ (-) แสดงถึงความสามารถในการย้อมสีของเส้นใยไหมดอ์กั้ที่ลดลงจากไหมลอกกาว

ตารางที่ 4.18 ความสามารถในการย้อมสีของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย HEMA และ Silane A-172 ที่ทำการย้อมสีด้วยสีย้อมครั้ง

ชนิดของตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังจากการต่อกึ่ง	% R	ค่า K/S	% K/S
ไหมลอกกาว	-	4.70	9.66	-
0.2 M. HEMA 15 นาที	24.88 ± 2.53	4.32	10.60	9.73
0.4 M. HEMA 15 นาที	38.26 ± 5.66	3.81	12.14	25.67
0.4 M. Silane A-172 30 นาที	8.34 ± 1.47	4.90	9.23	-4.45
0.6 M. Silane A-172 30 นาที	15.03 ± 2.19	5.23	8.59	-11.08

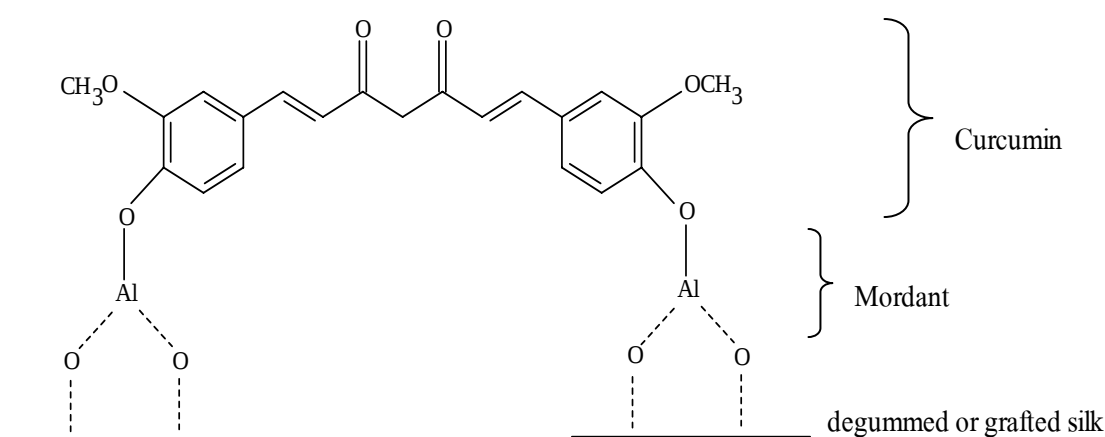
หมายเหตุ : เครื่องหมายติดลบ (-) แสดงถึงความสามารถในการย้อมสีของเส้นใยไหมต่อกึ่งที่ลดลงจากไหมลอกกาว

จากตารางที่ 4.17 และ 4.18 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความสามารถในการย้อมติดสีระหว่างเส้นใยไหมลอกกาวกับเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย HEMA และ Silane A-172 พบว่าเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย HEMA ทั้ง 2 ความเข้มข้นมีความสามารถในการย้อมติดสีทั้งสีย้อมขมิ้นและครั่งบนเส้นใยสูงกว่าเส้นใยไหมลอกกาว อาจเนื่องมาจากมอนอเมอร์ที่ใช้ในการต่อกึ่งและการใช้มอร์แดนท์ทำให้โครงสร้างของเส้นใยตรงบริเวณออสันฐานมีลักษณะเปิดและหนาแน่นมากขึ้น นอกจากนี้โครงสร้างของเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย HEMA สามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างสีย้อมกับเส้นใยได้มากขึ้นเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสีย้อมกับมอนอเมอร์ที่ใช้ในการต่อกึ่งและมอร์แดนท์ที่ใช้เป็นสารย้อมติด ส่วนเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย Silane A-172 ทั้ง 2 ความเข้มข้นมีความสามารถในการย้อมติดสีทั้งสีย้อมขมิ้นและครั่งบนเส้นใยต่ำกว่าเส้นใยไหมลอกกาว อาจเนื่องมาจาก Silane A-172 มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ทำให้น้ำซึ่งเป็นตัวกลางในการย้อมสีสามารถแทรกซึมเข้าไปในเส้นใยที่ต่อกึ่งด้วย Silane A-172 ได้น้อย เม็ดสีที่อยู่ในตัวทำละลายที่เป็นน้ำจึงไม่สามารถเข้าไปยึดเกาะหรือเกิดอันตรกิริยากับเส้นใยได้ดีพอ

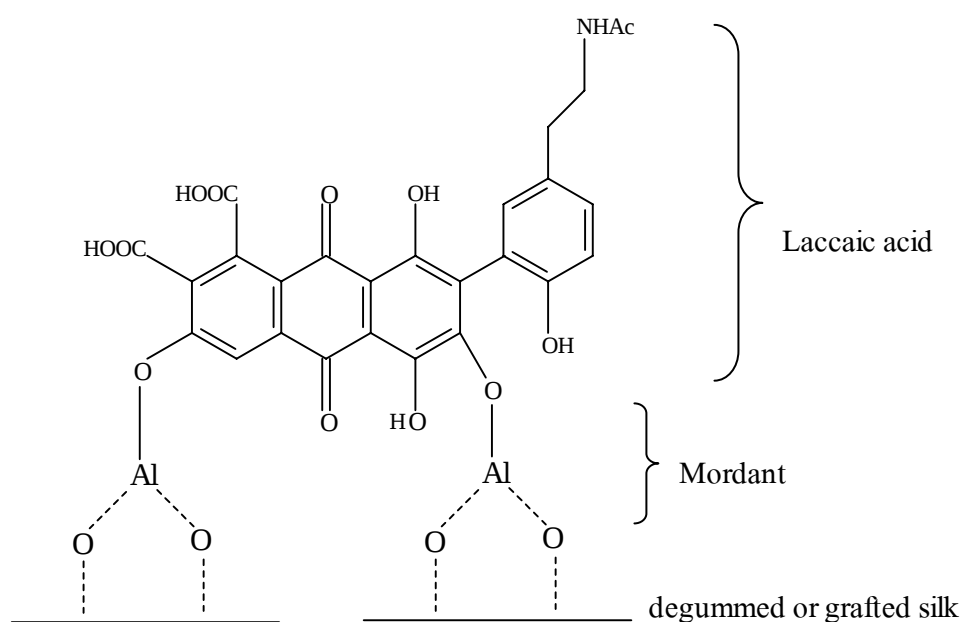
เมื่อพิจารณาความเข้มข้นที่ใช้ในการต่อกึ่งเส้นใย พบว่าเส้นใยไหมที่ทำการต่อกึ่งด้วย HEMA ที่ความเข้มข้น 0.4 M. มีความสามารถในการย้อมติดสีบนเส้นใยสูงกว่าเส้นใยไหมที่ทำการต่อกึ่งที่ ความเข้มข้น 0.2 M อาจเป็นเพราะเมื่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของเส้นใยหลังการต่อกึ่งเพิ่มขึ้นทำให้โครงสร้างของเส้นใยตรงบริเวณออสันฐานมีลักษณะเปิดมากขึ้น อีกทั้งเส้นใยมีหมู่ข้างเคียงที่สามารถเกิดอันตรกิริยากับสีย้อมได้มากขึ้น ส่วนเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย Silane A-172 ที่ความเข้มข้น 0.6 M. มีความสามารถในการย้อมติดสีต่ำกว่าเส้นใยไหมต่อกึ่งที่ความเข้มข้น 0.4 M. อาจเนื่องจากเมื่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยหลังการต่อกึ่งเพิ่มขึ้นทำให้เส้นใยมีความไม่ชอบน้ำมากขึ้น

เมื่อสีจึงแทรกเข้าไปในเส้นใยได้น้อยลง เมื่อเปรียบเทียบชนิดของมอนอเมอร์ที่ใช้ในการต่อกิ่งพบว่าเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA ความสามารถในการย้อมติดสีบนเส้นใยมากกว่าเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย Silane A-172 อาจเป็นเพราะ Silane A-172 มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ทำให้เส้นใยที่ต่อกิ่งด้วย Silane A-172 มีความสามารถในการดูดซับน้ำซึ่งเป็นตัวกลางในการย้อมสีได้น้อยกว่า ดังนั้นจึงมีความสามารถในการย้อมติดสีบนเส้นใยน้อยกว่าเส้นใยที่ต่อกิ่งด้วย HEMA

และเมื่อเปรียบเทียบชนิดของสีย้อมที่ย้อมติดบนเส้นใย พบว่าสีย้อมที่ได้จากครั่งมีความสามารถในการย้อมติดสีบนเส้นใยน้อยกว่าสีย้อมที่ได้จากขมิ้น อาจเนื่องจากโครงสร้างของสีย้อมครั่งเป็นโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ทำให้แทรกซึมเข้าไปในเส้นใยได้ยากกว่าจึงสามารถย้อมติดสีบนเส้นใยน้อยกว่า



รูปที่ 4.14 สารประกอบเชิงซ้อนที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างสีขมิ้นกับโลหะและเส้นใยไหม



รูปที่ 4.15 สารประกอบเชิงซ้อนที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างสีครั่งกับโลหะและเส้นใยไหม

4.8.2 การวัดการเปลี่ยนแปลงสี

ในทางอุตสาหกรรมบอกความแตกต่างของสีทางสิ่งทอที่โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งเป็นเทคนิคที่นิยมนำมาใช้ในการบอกความแตกต่างของสีตามมาตรฐาน CIELAB ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเทคนิคนี้มาใช้ในการบอกความแตกต่างของสีของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยที่ต่อกิ่งด้วย HEMA และ Silane A-172 ที่ย้อมสีด้วยสีย้อมธรรมชาติ

4.8.2.1 เส้นใยไหมที่ทำการย้อมด้วยสีธรรมชาติ

นำเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยที่ต่อกิ่งด้วย HEMA และ Silane ที่ย้อมสีด้วยสีย้อมธรรมชาติ มาวัดความแตกต่างของสีด้วยระบบ CIE L^* a^* b^* C^* และ h° โดยค่า L^* แสดงถึงความสว่างของเส้นใย a^* แสดงลักษณะของสีที่ไปยังแสงสีแดงหรือแสงสีเขียว b^* แสดงลักษณะของสีที่ไปยังแสงสีเหลืองหรือแสงสีน้ำเงิน C^* (Chroma) บอกถึงความสดใสของสี และ h° (Hue angle) เป็นตัวเลขที่ระบุว่าคุณสีนั้นมีตำแหน่งอยู่ที่ใดมีหน่วยเป็นองศา ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.19 และ 4.20

ตารางที่ 4.19 การวัดสีของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA และ Silane A-172 ที่ย้อมสีด้วยสีย้อมขมิ้น

ชนิดของตัวอย่าง	สีย้อมขมิ้น				
	L^*	a^*	b^*	C^*	h°
ไหมลอกกาว	47.22	14.65	69.92	71.44	78.17
0.2 M. HEMA 15 นาที	52.72	14.76	76.68	78.09	79.10
0.4 M. HEMA 15 นาที	54.49	16.45	78.32	80.03	78.14
0.4 M. Silane A-172 30 นาที	61.85	13.85	84.54	85.67	80.70
0.6 M. Silane A-172 30 นาที	63.68	14.74	81.53	82.85	79.75

จากตารางที่ 4.19 เป็นข้อมูลการวัดสีของเส้นใยไหมที่ย้อมสีด้วยสีย้อมขมิ้นของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA และ Silane A-172 พบว่าเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA และ Silane A-172 ทั้งสองความเข้มข้นมีค่า L^* a^* b^* C^* และ h° ใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาค่าความสดใส (C^*) และค่า b^* พบว่าเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA และ Silane A-172 ทั้งสองความเข้มข้นมีความสดใสและมีสีเหลืองมากกว่าเส้นใยไหมลอกกาวจากลักษณะดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่ามอโนเมอร์ที่ใช้ในปฏิกิริยาการต่อกิ่งไม่ส่งผลกระทบต่อเฉดสีของเส้นใย โดยเฉดสีของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA และ Silane A-172 ทั้งสองความเข้มข้นให้เฉดสีไปทางสีเหลือง

ตารางที่ 4.20 การวัดสีของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA และ Silane A-172 ที่ย้อมสีด้วยสีย้อมครั้ง

ชนิดของตัวอย่าง	สีย้อมครั้ง				
	L*	a*	b*	C*	h°
ไหมลอกกาว	25.13	22.98	0.93	23.00	2.33
0.2 M. HEMA 15 นาที	28.45	19.58	-2.01	19.69	5.86
0.4 M. HEMA 15 นาที	31.13	19.43	-2.28	19.57	6.70
0.4 M. Silane A-172 30 นาที	25.15	18.7	-1.60	18.77	4.90
0.6 M. Silane A-172 30 นาที	33.52	22.14	-1.73	22.21	4.48

จากตารางที่ 4.20 เป็นข้อมูลการวัดสีของเส้นใยไหมที่ย้อมสีด้วยสีย้อมครั้งของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA และ Silane A-172 พบว่าเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA และ Silane A-172 ทั้งสองความเข้มข้นมีค่า L* a* b* C* และ h° ใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาค่าความสดสี (C*) และค่า b* พบว่าเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA และ Silane A-172 ทั้งสองความเข้มข้นมีความสดสีน้อยกว่าเส้นใยไหมลอกกาว ส่วนค่า b* พบว่าเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA และ Silane A-172 ทั้งสองความเข้มข้นมีสีไปทางสีน้ำเงิน แต่เส้นใยไหมลอกกาวมีสีไปทางสีเหลืองทำให้เส้นใยที่ได้มีเฉดสีที่ต่างกันเล็กน้อย โดยเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA มีสีม่วงอมน้ำเงินมากกว่าเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย Silane A-172 ส่วนเส้นใยไหมลอกกาวมีสีม่วงอมแดง จากลักษณะดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่ามอนอเมอร์ที่ใช้ในปฏิกิริยาการต่อกิ่งส่งผลกระทบต่อเฉดสีของเส้นใยเล็กน้อย โดยเฉดสีของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA และ Silane A-172 ทั้งสองความเข้มข้นให้เฉดสีไปทางสีแดง

4.9 การทดสอบความคงทนของสี (Color fastness)

ในงานวิจัยนี้ นอกจากศึกษาความสามารถในการย้อมติดสีของเส้นใยแล้ว ยังทำการศึกษาความคงทนของสีย้อมหลังการซัก ความคงทนของสีต่อเหงื่อ และความคงทนของสีต่อแสงของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วยไวนิลมอนอเมอร์ที่ย้อมด้วยสีย้อมธรรมชาติ คือ สีย้อมขมิ้น และครั่ง

4.9.1 การทดสอบความคงทนของสีต่อแสง (แสงซินอนอาร์ก)

การทดสอบนี้เป็นการประเมินการทดสอบความคงทนของสีต่อแสงของเส้นใยไหมลอกกาวและไหมที่ตอกลงด้วยไวนิลมอนอเมอร์ที่ย้อมสีด้วยสีย้อมธรรมชาติเปรียบเทียบกับผ้าขนสัตว์มาตรฐานภายใต้สภาวะที่กำหนด ซึ่งสามารถจัดระดับความคงทนของสีต่อแสงได้ 8 ระดับ โดยการรายงานค่าแสดงเป็นตัวเลขจาก 1-8 แสดงดังตารางที่ 4.21

- ระดับ 8 ดียอดเยี่ยม (Superative)
- ระดับ 7 ดีเลิศ (Excellent)
- ระดับ 6 ดีมาก (Very Good)
- ระดับ 5 ดี (Good)
- ระดับ 4 ดีปานกลาง (Fairly Good)
- ระดับ 3 ปานกลาง (Fair)
- ระดับ 2 คุณภาพต่ำ (Poor)
- ระดับ 1 คุณภาพต่ำมาก (Very Poor)

ตารางที่ 4.21 ค่าความคงทนของสีต่อแสงของเส้นใยไหมลอกกาวและไหมตอกลงที่ย้อมสีด้วยสีย้อมธรรมชาติ คือ ขมิ้น และครั้ง

ชนิดของตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังจากการตอกลง	ระดับความคงทนของสีย้อม	
		สีขมิ้น	สีครั้ง
ไหมลอกกาว	-	1-2	4-5
0.2 M. HEMA 15 นาที	24.88 ± 2.53	1-2	4-5
0.4 M. HEMA 15 นาที	38.26 ± 5.66	1-2	4-5
0.4 M. Silane A-172 30 นาที	8.34 ± 1.47	1	4
0.6 M. Silane A-172 30 นาที	15.03 ± 2.19	1	4

จากตารางที่ 4.21 เป็นการประเมินความคงทนของสีต่อแสงของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ตอกลงด้วย HEMA และ Silane A-172 ที่ย้อมสีเส้นใยด้วยสีขมิ้นและครั้ง พบว่าเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ตอกลงด้วย HEMA ทั้งสองความเข้มข้นมีความคงทนของสีต่อแสงอยู่ในระดับเดียวกันซึ่งสูงกว่าเส้นใยไหมที่ตอกลงด้วย Silane A-172 ทั้งสองความเข้มข้นเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นที่ใช้ในการตอกลงของ HEMA และ Silane A-172 ทั้งสองความเข้มข้น พบว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของเส้นใยหลังการตอกลงเพิ่มขึ้นระดับความคงทน

ของสีต่อแสงอยู่ในระดับเดียวกัน แสดงว่าการต่อกิ่งเส้นใยใหม่ด้วย HEMA และ Silane A-172 ที่เปอร์เซ็นต์การต่อกิ่งแตกต่างกันไม่ช่วยเพิ่มความคงทนของสีต่อแสง

แต่เมื่อเปรียบเทียบชนิดของสีย้อมที่มีต่อระดับความคงทนของสีต่อแสง พบว่าเส้นใยที่ย้อมสีด้วยสีย้อมครั้งมีระดับความคงทนของสีต่อแสงสูงกว่าเส้นใยที่ย้อมสีด้วยสีย้อมขมึ้น อาจเนื่องจากในโครงสร้างหลักของสีย้อมครั้งประกอบด้วยวงเบนซีนซึ่งมีความเสถียรเนื่องจากอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้รอบวง (Delocalize) ทำให้สีย้อมครั้งมีความไวต่อแสงน้อยกว่าสีย้อมขมึ้น สีย้อมครั้งจึงทนแสงได้ดีกว่า

จากการประเมินผลการทดสอบที่ได้สามารถสรุปได้ว่าเส้นใยใหม่ที่ย้อมสีด้วยสีย้อมครั้งมีระดับความคงทนของสีต่อแสงอยู่ในเกณฑ์ดีทั้งเส้นใยใหม่ลอกขาวและเส้นใยใหม่ต่อกิ่งด้วย HEMA และ Silane A-172 ซึ่งปกติแล้วเส้นใยใหม่ลอกขาวที่ย้อมด้วยสีย้อมครั้งมีระดับความคงทนของสีต่อแสงอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง [19] ดังนั้นการต่อกิ่งเส้นใยใหม่จึงไม่ได้ทำให้มีความคงทนของสีต่อแสงเพิ่มขึ้น แต่เส้นใยใหม่ใหม่ลอกขาวและเส้นใยใหม่ต่อกิ่งด้วย HEMA และ Silane A-172 ที่ย้อมสีด้วยสีย้อมขมึ้นมีระดับความคงทนของสีต่อแสงต่ำเนื่องจากสีที่ได้จากขมึ้นเป็นสีที่มีความไวต่อแสงมาก [26]

4.9.2 การทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อ

เนื่องจากเหงื่อมีทั้งที่เป็นกรดและด่าง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกการทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อทั้งในสภาวะกรดและด่างของเส้นใยใหม่ทำการย้อมสีด้วยสีย้อมธรรมชาติ ซึ่งสามารถจัดระดับความคงทนของสีต่อการเหงื่อได้ 5 ระดับ โดยระดับ 1 แสดงถึงความคงทนของสีต่อเหงื่อต่ำที่สุด และ ระดับ 5 แสดงถึงความคงทนของสีต่อเหงื่อสูงที่สุด ส่วนค่าการเปลี่ยนสีบนผ้าขาวมาตรฐานสามารถจัดระดับได้ 5 ระดับเช่นกัน โดยระดับ 1 แสดงการเปลี่ยนสีบนผ้าขาวมาตรฐานที่มาก และระดับ 5 แสดง การเปลี่ยนสีบนผ้าขาวมาตรฐานที่น้อย โดยการรายงานค่าแสดงเป็นตัวเลขจาก 1- 5 ดังนี้

- ระดับ 5 ดีมาก (Excellent)
- ระดับ 4 ดี (Good)
- ระดับ 3 ปานกลาง (Fair)
- ระดับ 2 คุณภาพต่ำ (Poor)
- ระดับ 1 คุณภาพต่ำมาก (Very Poor)

ตารางที่ 4.22 ค่าความคงทนของสีต่อเหงื่อในสภาวะที่เป็นกรดของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมตอ กิ่งที่ย้อมสีด้วยสีย้อมธรรมชาติ คือ ขมิ้น และ ครั่ง

ชนิดของตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังจากการตอ กิ่ง	ระดับความคงทนของสี	
		สีขมิ้น	สีครั่ง
ไหมลอกกาว	-	4-5	4-5
0.2 M. HEMA 15 นาที	24.88 ± 2.53	4-5	4-5
0.4 M. HEMA 15 นาที	38.26 ± 5.66	4-5	4-5
0.4 M. Silane A-172 30 นาที	8.34 ± 1.47	4-5	4
0.6 M. Silane A-172 30 นาที	15.03 ± 2.19	4-5	4

ตารางที่ 4.23 ค่าการเปื้อนสีบนผ้าขาวมาตรฐานเนื่องจากเหงื่อในสภาวะที่เป็นกรดของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมตอ กิ่งที่ย้อมสีด้วยสีย้อมธรรมชาติ คือ ขมิ้น และ ครั่ง

ชนิดของตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังจากการตอ กิ่ง	ระดับความคงทนของสี			
		สีขมิ้น		สีครั่ง	
		ผ้าไหม	ผ้าฝ้าย	ผ้าไหม	ผ้าฝ้าย
ไหมลอกกาว	-	1-2	1	4	4
0.2 M. HEMA 15 นาที	24.88 ± 2.53	1-2	1	4	4
0.4 M. HEMA 15 นาที	38.26 ± 5.66	2	1	4	4
0.4 M. Silane A-172 30 นาที	8.34 ± 1.47	1	1	4	4
0.6 M. Silane A-172 30 นาที	15.03 ± 2.19	1	1	4	4

ตารางที่ 4.24 ค่าความคงทนของสีต่อเหงื่อในสภาวะที่เป็นต่างของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมตอกลงที่ข้อมสีด้วยสีย้อมธรรมชาติ คือ ขมิ้น และครั่ง

ชนิดของตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังจากการตอกลง	ระดับความคงทนของสีย้อม	
		สีขมิ้น	สีครั่ง
ไหมลอกกาว	-	4-5	4-5
0.2 M. HEMA 15 นาที	24.88 ± 2.53	4-5	4-5
0.4 M. HEMA 15 นาที	38.26 ± 5.66	4-5	4-5
0.4 M. Silane A-172 30 นาที	8.34 ± 1.47	4-5	4
0.6 M. Silane A-172 30 นาที	15.03 ± 2.19	4-5	4

ตารางที่ 4.25 ค่าการเปื้อนสีบนผ้าขาวมาตรฐานเนื่องจากเหงื่อในสภาวะที่เป็นต่างของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมตอกลงที่ข้อมสีด้วยสีย้อมธรรมชาติ คือ ขมิ้น และครั่ง

ชนิดของตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังจากการตอกลง	ระดับความคงทนของสีย้อม			
		สีขมิ้น		สีครั่ง	
		ผ้าไหม	ผ้าฝ้าย	ผ้าไหม	ผ้าฝ้าย
ไหมลอกกาว	-	1-2	1	3-4	3-4
0.2 M. HEMA 15 นาที	24.88 ± 2.53	1-2	1	3-4	3-4
0.4 M. HEMA 15 นาที	38.26 ± 5.66	2	1	3-4	3-4
0.4 M. Silane A-172 30 นาที	8.34 ± 1.47	1	1	3	3
0.6 M. Silane A-172 30 นาที	15.03 ± 2.19	1	1	3	3

จากการทดสอบความคงทนของสีต่อการเหงื่อทั้งในสภาวะเป็นกรดและด่างโดยการประเมินการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นตัวอย่างกับการเปื้อนของสีบนผ้าขาวมาตรฐานที่นำมาใช้ในการประกบชิ้นงานตัวอย่างซึ่งประกอบด้วยผ้าฝ้ายและผ้าไหมมาตรฐานของเส้นใยไหมที่ข้อมสีด้วยสีย้อมขมิ้นในตารางที่ 4.22 - 4.25 พบว่าเส้นใยไหมที่ตอกลงด้วย HEMA และ Silane A-172 ทั้งสองความเข้มข้นมีระดับความคงทนของสีต่อเหงื่อทั้งในสภาวะที่เป็นกรดและด่างอยู่ในระดับเดียวกับเส้นใยไหมลอกกาวและค่าการเปื้อนของสีบนผ้าขาวมาตรฐานทั้งในสภาวะที่เป็นกรดและด่างของเส้นใยที่ตอกลงด้วย HEMA ความเข้มข้น 0.2 M. อยู่ในระดับเดียวกับเส้นใยไหมลอกกาวแต่ที่ความเข้มข้น 0.4 M. ค่าการเปื้อนของสีบนผ้าขาวมาตรฐานอยู่ในระดับสูงกว่าเส้นใยไหมลอกกาว

ส่วนเส้นใยที่ตอ่กึ่งด้วย Silane A-172 ทั้งสองความเข้มข้นมีค่าการเปื้อนของสึบนผ้าขาวมาตรฐานทั้งในสภาวะที่เป็นกรดและด่างอยู่ในระดับด่ำกว่าเส้นใยไหมลอกกาวเล็กน้อย

เมื่อเปรียบเทียบชนิดของมอนอเมอร์ พบว่าเส้นใยไหมที่ตอ่กึ่งด้วย HEMA และ Silane A-172 ที่ย้อมด้วยสีย้อมขมึ้นมีระดับความคงทนของสีตอ่เหงื่อทั้งในสภาวะที่เป็นกรดและด่างอยู่ในระดับเดียวกัน และค่าการเปื้อนของสึบนผ้าขาวมาตรฐานทั้งในสภาวะที่เป็นกรดและด่างของเส้นใยไหมที่ตอ่กึ่งด้วย HEMA อยู่ในระดับที่สูงกว่าเส้นใยไหมที่ตอ่กึ่งด้วย Silane A-172

จากตารางที่ 4.22 - 4.25 และเมื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงสีของซึ้นตัวอย่างกับการเปื้อนของสึบนผ้าขาวมาตรฐานของเส้นใยไหมที่ย้อมด้วยสีย้อมครั้ง พบว่าเส้นใยไหมที่ตอ่กึ่งด้วย HEMA มีความคงทนของสีตอ่เหงื่อและค่าการเปื้อนของสึบนผ้าขาวมาตรฐานในสภาวะที่เป็นกรดและด่างอยู่ในระดับเดียวกับเส้นใยไหมลอกกาว ส่วนเส้นใยไหมที่ตอ่กึ่งด้วย Silane A-172 มีความคงทนของสีตอ่เหงื่อในสภาวะที่เป็นกรดและด่างอยู่ในระดับด่ำกว่าเส้นใยไหมลอกกาวเล็กน้อย และค่าการเปื้อนของสึบนผ้าขาวมาตรฐานในสภาวะที่เป็นกรดมีค่าการเปื้อนของสึบนผ้าขาวมาตรฐานอยู่ในระดับเดียวกับเส้นใยไหมลอกกาว แต่ในสภาวะที่เป็นด่างอยู่ในระดับด่ำกว่าเส้นใยไหมลอกกาว

เมื่อเปรียบเทียบชนิดของมอนอเมอร์ พบว่าเส้นใยไหมที่ตอ่กึ่งด้วย HEMA ที่ย้อมด้วยสีย้อมครั้งมีความคงทนของสีตอ่เหงื่อในสภาวะที่เป็นกรดและด่างอยู่ในระดับสูงกว่าเส้นใยไหมที่ตอ่กึ่งด้วย Silane A-172 และค่าการเปื้อนของสึบนผ้าขาวมาตรฐานในสภาวะที่เป็นด่างอยู่ในระดับสูงกว่าเส้นใยไหมที่ตอ่กึ่งด้วย Silane A-172 แต่ในสภาวะที่เป็นกรดมีค่าการเปื้อนของสึบนผ้าขาวมาตรฐานอยู่ในระดับเดียวกัน

และเมื่อเปรียบเทียบชนิดของสีย้อม พบว่าเส้นใยที่ย้อมสีด้วยสีย้อมขมึ้นและครั้งมีความคงทนของสีตอ่เหงื่อในสภาวะที่เป็นกรดและด่างอยู่ในระดับเดียวกัน และเมื่อพิจารณาค่าการเปื้อนของสึบนผ้าขาวมาตรฐานในสภาวะที่เป็นกรดและด่าง พบว่าเส้นใยที่ย้อมสีด้วยสีย้อมครั้งมีค่าการเปื้อนของสึบนผ้าขาวมาตรฐานอยู่ในระดับที่สูงกว่าเส้นใยที่ย้อมสีด้วยสีย้อมขมึ้น

จากการประเมินผลการทดสอบที่ได้สามารถสรุปได้ว่าการตอ่กึ่งเส้นใยไหมด้วย HEMA และ Silane A-172 ที่ย้อมสีด้วยสีย้อมขมึ้นกับเส้นใยไหมที่ตอ่กึ่งด้วย HEMA ที่ย้อมด้วยสีย้อมครั้งมีความคงทนของสีตอ่เหงื่อทั้งในสภาวะที่เป็นกรดและด่างอยู่ในระดับเดียวกัน อาจเนื่องมาจากไหมลอกกาวมีความคงทนของสีตอ่เหงื่อในสภาวะที่เป็นกรดและด่างอยู่ในระดับดี - ดีมากอยู่แล้ว ยกเว้นเส้นใยไหม ที่ตอ่กึ่งด้วย Silane A-172 ที่ย้อมสีด้วยสีย้อมครั้งมีความคงทนของสีตอ่เหงื่อทั้งในสภาวะที่เป็นกรดและด่างด่ำกว่าไหมลอกกาว อาจเนื่องมาจากไหมที่ตอ่กึ่งด้วย Silane A-172 มีความเป็นซั้วที่น้อยกว่าไหมลอกกาว ทำให้การเกิดอันตรกิริยาระหว่างสีย้อมครั้งซึ่งมีความเป็นซั้วกับไหมที่ตอ่กึ่งด้วย Silane A-172 เกิดได้ไม่ดีเท่ากับการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสีย้อมครั้งกับไหมลอกกาว ประกอบกับโครงสร้างของสีย้อมครั้งมีหมู่แทนที่ที่เป็นหมู่เอไมด์ที่สามารถ

เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในสภาวะกรดและด่างได้เกิดการเปลี่ยนแปลงหมู่แทนที่บนโครงสร้าง
 สีย้อมทำให้โครงสร้างของสีย้อมดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่เปลี่ยนไป สีย้อมจึงเปลี่ยนแปลงไป
 เล็กน้อย

4.9.3 การทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก

ปัจจัยที่คำนึงถึงในการทดสอบความคงทนของสีต่อการซักมี 2 ประเภท คือ การประเมิน
 การเปื้อนของสีย้อมผ้าขาวมาตรฐานที่นำมาใช้ในการประกบชิ้นงานตัวอย่างซึ่งประกอบด้วยผ้าฝ้าย
 และผ้าไหมมาตรฐานกับการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นตัวอย่าง โดยเป็นการเปรียบเทียบสี
 ที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างก่อนและหลังการทดสอบ ซึ่งผลที่ได้จะถูกประเมินออกมาเป็นตัวเลข
 โดยการใช้เกรย์สเกล ซึ่งความคงทนของสีต่อการซักของเส้นใยไหมที่ทำการย้อมสีด้วย
 สีย้อมธรรมชาติ แสดงดังตารางที่ 4.26 และตารางที่ 4.27

ตารางที่ 4.26 ค่าความคงทนของสีต่อการซักของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมตอถึงที่ย้อมสี
 ด้วย สีย้อมธรรมชาติ คือ ขมิ้น และครั่ง

ชนิดของตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่ เพิ่มขึ้นหลังจากการตอถึง	ระดับความคงทนของสี	
		สีขมิ้น	สีครั่ง
ไหมลอกกาว	-	4	1
0.2 M. HEMA 15 นาที	24.88 ± 2.53	4-5	1-2
0.4 M. HEMA 15 นาที	38.26 ± 5.66	4-5	1-2
0.4 M. Silane A-172 30 นาที	8.34 ± 1.47	4-5	2
0.6 M. Silane A-172 30 นาที	15.03 ± 2.19	4-5	2

ตารางที่ 4.27 ค่าการเปื้อนของสีย้อมสีบนผ้าขาวมาตรฐานเนื่องจากการซักของเส้นใยไหมลอกกาและเส้นใยไหมตอที่ข้อมสีด้วยสีย้อมธรรมชาติคือ ขมิ้น และครั่ง

ชนิดของตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังจากการตอ	ระดับความคงทนของสีข้อม			
		สีขมิ้น		สีครั่ง	
		ผ้าไหม	ผ้าฝ้าย	ผ้าไหม	ผ้าฝ้าย
ไหมลอกกา	-	2	1	4	4
0.2 M. HEMA 15 นาที	24.88 ± 2.53	2	1	4	4
0.4 M. HEMA 15 นาที	38.26 ± 5.66	2	1	4	4
0.4 M. Silane A-172 30 นาที	8.34 ± 1.47	1	1	4	4
0.6 M. Silane A-172 30 นาที	15.03 ± 2.19	1	1	4	4

จากตารางที่ 4.26 และตารางที่ 4.27 เป็นการทดสอบความคงทนของสีต่อการซักโดยการประเมินการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นตัวอย่างกับการเปื้อนของสีย้อมสีบนผ้าขาวมาตรฐานที่นำมาใช้ในการประกบชิ้นงานตัวอย่างซึ่งประกอบด้วยผ้าฝ้ายและผ้าไหมมาตรฐานของเส้นใยไหมที่ข้อมสีด้วยสีย้อมขมิ้น พบว่าเส้นใยไหมที่ตอด้วย HEMA และ Silane A-172 มีระดับความคงทนของสีต่อการซักสูงกว่าเส้นใยไหมลอกกาเนื่องจากโครงสร้างของเส้นใยไหมที่ตอสามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างสีข้อมกับเส้นใยได้มากขึ้นเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสีข้อมกับมอนอเมอร์ที่ใช้ในการตอและเมอร์แดนซ์ที่ใช้เป็นสารยึดติดทำให้เส้นใยมีความคงทนของสีต่อการซักดีขึ้นและค่าการเปื้อนของสีย้อมสีบนผ้าขาวมาตรฐานของเส้นใยที่ตอด้วย HEMA ที่ข้อมด้วยสีย้อมขมิ้นอยู่ในระดับเดียวกับเส้นใยไหมลอกกา ส่วนเส้นใยไหมที่ตอด้วย Silane A-172 มีค่าการเปื้อนของสีย้อมสีบนผ้าขาวมาตรฐานอยู่ในระดับต่ำกว่าเส้นใยไหมลอกกา

เมื่อเปรียบเทียบชนิดของมอนอเมอร์ พบว่าเส้นใยไหมที่ตอด้วย HEMA ที่ข้อมด้วยสีย้อมขมิ้นมีความคงทนของสีต่อการซักอยู่ในระดับเดียวกับเส้นใยไหมที่ตอด้วย Silane A-172 แต่มีค่าการเปื้อนของสีย้อมสีบนผ้าขาวมาตรฐานอยู่ในระดับสูงกว่าเส้นใยไหมที่ตอด้วย Silane A-172

ส่วนเส้นใยไหมที่ข้อมสีด้วยสีย้อมครั่ง พบว่าเส้นใยไหมที่ตอด้วย HEMA และ Silane A-172 มีระดับความคงทนของสีต่อการซักสูงกว่าเส้นใยไหมลอกกาเช่นกัน และค่าการเปื้อนของสีย้อมสีบนผ้าขาวมาตรฐานอยู่ในระดับเดียวกับเส้นใยไหมลอกกา

และเมื่อเปรียบเทียบชนิดของมอนอเมอร์ พบว่าเส้นใยไหมที่ตอด้วย HEMA ที่ข้อมด้วยสีย้อมครั่งมีความคงทนของสีต่อการซักอยู่ในระดับต่ำกว่าเส้นใยไหมที่ตอด้วย Silane A-172 เล็กน้อยเนื่องจากเส้นใยไหมที่ตอด้วย Silane A-172 มีสมบัติไม่ชอบน้ำอยู่แล้วซึ่งเมื่อสีข้อมเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับเส้นใย อาจทำให้น้ำแทรกซึมเข้าไปในเส้นใยได้น้อยกว่าเส้นใยไหม

ที่ตอ่กึ่งด้วย HEMA โมเลกุลของสีจึงหลุดออกมาได้น้อยกว่า ทำให้ความคงทนของสีต่อการซักของเส้นใยไหมที่ตอ่กึ่งด้วย Silane A-172 สูงกว่าเล็กน้อย แต่มีค่าการเปื้อนของสีบนผ้าขาวมาตรฐานอยู่ในระดับเดียวกัน

เมื่อพิจารณาชนิดของสีย้อม พบว่าเส้นใยที่ย้อมด้วยสีย้อมครั้งมีระดับความคงทนของสีต่อการซักต่ำกว่าเส้นใยไหมที่ย้อมสีด้วยสีย้อมขมึ้น อาจเนื่องจากสีย้อมครั้งสามารถละลายในน้ำได้ดีกว่าสีย้อมขมึ้น ดังนั้นเมื่อทำการทดสอบความคงทนของสีต่อการซักทำให้โมเลกุลของสีย้อมครั้งหลุดออกมาได้มากกว่าแต่มีค่าการเปื้อนของสีบนผ้าขาวมาตรฐานอยู่ในระดับที่สูงกว่า

จากการประเมินผลการทดสอบที่ได้สามารถสรุปได้ว่าเส้นใยไหมที่ตอ่กึ่งด้วย HEMA และ Silane A-172 ที่ย้อมสีด้วยสีย้อมขมึ้นและครั้งมีระดับความคงทนของสีต่อการซักสูงกว่าเส้นใยไหมลอกขาว แต่เส้นใยไหมที่ย้อมสีด้วยสีย้อมครั้งมีระดับความคงทนของสีต่อการซักอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำกว่าเส้นใยไหมที่ย้อมสีด้วยสีย้อมขมึ้น ซึ่งปกติแล้วเส้นใยไหมลอกขาวที่ย้อมด้วยสีย้อมครั้งมีระดับความคงทนของสีต่อการซักอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำอยู่แล้ว [19]