บทที่ 2
ภูมิหลัง

ยางคอมโพสิทที่เสริมแรงด้วยสารตัวเติมเซลลูโลส (lignocellulosic filler)ได้รับความสนใจมากขึ้น เนื่องจากเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีน้ำหนักเฉพาะ (specific weight) ที่ต่ำ และมีราคาถูก ข้อดีของสารตัวเติมเซลลูโลสได้แก่ ราคาถูก ไม่อันตรายต่อเครื่องจักร มีความแข็งแรงเฉพาะที่รับได้ สามารถย่อยสลายได้ในระบบชีวภาพ และสามารถปลูกทดแทนได้ แต่อย่างไรก็ตาม ปัญหาที่สำคัญในการเสริมแรงยางธรรมชาติด้วยสารตัวเติมเซลลูโลส คือความไม่เข้ากันของยางธรรมชาติและสารตัวเติมเซลลูโลส เนื่องจากสารตัวเติมเซลลูโลสมีความเป็นขั้วที่เด่น ส่วนยางธรรมชาติมีความเป็นขั้วที่ต่ำ ส่งผลต่อความไม่เข้ากันของเมทริกซ์และสารตัวเติมเซลลูโลส ทำให้การยึดติดที่อินเทอร์เฟสระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลสและเมทริกซ์ต่ำ ซึ่งทำให้สมบัติทางกลของคอมโพสิทต่ำ การปรับปรุงการยึดติดระหว่างเมทริกซ์และสารตัวเติมเซลลูโลส สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การดัดแปรพื้นผิวของสารตัวเติมเซลลูโลส การดัดแปรเมทริกซ์ และการใส่สารช่วยให้เข้ากันได้ นอกจากนี้การใส่สารตัวเติมเซลลูโลสชนิดที่สองหรือมากกว่าสองชนิด จะสามารถช่วยปรับสมบัติทางกลของคอมโพสิทได้เนื่องจากสารตัวเติมเซลลูโลสแต่ละชนิดมีสมบัติทางกลที่ต่างกัน

2.1 การปรับปรุงการยึดติดระหว่างเส้นใยธรรมชาติและยางธรรมชาติ

2.1.1 การดัดแปรพื้นผิวของเส้นใย (fiber treatment)

การดัดแปรพื้นผิวของเส้นใยสามารถแบ่งออกได้เป็น การดัดแปรทางเคมี และการดัดแปรทางกายภาพ โดยแต่ละวิธีให้ประสิทธิภาพในการปรับปรุงการยึดติดระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ที่ต่างกันออกไป

2.1.1.1 การดัดแปรทางเคมี (chemical method)

2.1.1.1.1 การทำอัลคาไลน์เซชัน (alkalization)

การดัดแปรพื้นผิวของเส้นใยด้วยการทำอัลคาไลน์เซชัน เป็นวิธีที่ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา การทำอัลคาไลน์เซชันเป็นวิธีที่สามารถทำความสะอาดพื้นผิวของเส้นใย และดัดแปรพื้นผิวของเส้นใยให้มีการยึดติดระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์เพิ่มขึ้นได้ Bisanda [Bisanda, 2000] ได้ทำการศึกษาผลของการทำอัลคาไลน์เซชันต่อการยึดติดของคอมโพสิทระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์กับอิพอกซี พบว่าการทำอัลคาไลน์เซชันของเส้นใยป่านศรนารายณ์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก สามารถปรับปรุงการยึดติดระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ได้ เนื่องมาจากการเพิ่มความขรุขระของพื้นผิวของเส้นใยและการเพิ่มแรงตึงผิวของเส้นใย นอกจากนี้ การทำอัลคาไลน์เซชันยังเป็นการกำจัดลิกนิน

(lignin) และสารพวกขี้ผึ้ง (wax) ออกจากพื้นผิวของเส้นใยด้วย ทำให้เป็นการเพิ่มโอกาสในการเกิดกลไกแบบการเชื่อมต่อกันทางกล (mechanical interlocking) ระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ ส่งผลให้คอมโพสิทมีค่าความทนทานต่อแรงกด (compressive strength) ดีขึ้น

Ray และคณะ [Ray et al., 2002] ดัดแปรพื้นผิวของเส้นใยปอกระเจาด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 5 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 2 4 6 และ 8 ชั่วโมง โดยผลจากการวิเคราะห์ทางความร้อนพบว่าเฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) มีเปอร์เซ็นต์การสลายตัวที่ลดลงเมื่อเวลาการทำอัลคาไลน์เซชันของเส้นใยเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าเฮมิเซลลูโลสสามารถถูกกำจัดได้ด้วยการทำอัลคาไลน์เซชัน

Sydenstricker และคณะ [Sydenstricker et al., 2003] ทำการทดสอบสมบัติทางความร้อนของเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน พบว่าการทำอัลคาไลน์เซชันส่งผลให้ความหนาแน่นของเส้นใยป่านศรนารายณ์และปริมาณของลิกนินลดลง จากผลการทดสอบทางความร้อนยังพบอีกว่าเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันมีความสามารถในการทนต่อความร้อนดีกว่าเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ไม่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน

Lopattananon และคณะ [Lopattananon et al., 2006] ทำการดัดแปรเส้นใยจากใบสับปะรดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 1 3 5 และ 7 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จากการทดสอบด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (infrared spectroscopy) พบว่าหลังจากการทำอัลคาไลน์เซชันพีคของลิกนินที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1436 cm^{-1} ลดลง ส่วนพีคของเฮมิเซลลูโลสที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1254 cm^{-1} ได้หายไป เนื่องมาจากการทำอัลคาไลน์เซชันเป็นการกำจัดเฮมิเซลลูโลสออกจากเส้นใยได้หมด และยังกำจัดลิกนินบางส่วนออกไปจากเส้นใย จากการทดสอบทางสัณฐานวิทยา พบว่าเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันมีการแยกตัวของเส้นใย เนื่องมาจากการที่ลิกนินบางส่วน และเฮมิเซลลูโลสถูกกำจัดออกไปซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลการทดสอบอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี ดังนั้นประสิทธิภาพของพื้นที่ผิวของเส้นใยที่สามารถยึดติดกับเมทริกซ์จึงมีเพิ่มมากขึ้น

Mwaikambo และ Ansell [Mwaikambo and Ansell, 2006] ได้ศึกษาลักษณะของเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.03 0.08 0.16 และ 0.32 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากการทดสอบทางสัณฐานวิทยาพบว่าเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันมีพื้นผิวที่ขรุขระ และมีช่องว่างระหว่างเซลของเส้นใย พื้นผิวที่ขรุขระนี้สามารถเพิ่มและปรับปรุงการจัดเรียงตัวของส่วนที่สามารถเกิดผลึกได้ และจากการทดสอบสมบัติการทนทานต่อแรงดึง (tensile properties) พบว่าค่ามอดุลัสของยังค์ (Young's modulus) และค่าความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ของเส้นใยขึ้นกับลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างภายในเส้นใย เช่น ปริมาณเซลลูโลส มุมการจัดเรียงตัวของ

เส้นใย และปริมาณการเกิดผลึก ในการศึกษานี้พบว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอก-ไซด์ที่ให้ค่ามอดุลัสของยังค์ และค่าความทนทานต่อแรงดึงที่เหมาะสมคือ 0.16 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก

Mohd Edeerozey และคณะ [Mohd Edeerozey et al., 2007] นำเส้นใยปอคิวบามาทำการดัดแปรด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3 6 และ 9 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ผลการทดสอบทางสัณฐานวิทยาพบว่าเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3 เปอร์เซนต์ ให้ประสิทธิภาพที่ไม่ดีในการกำจัดสิ่งเจือปนที่พื้นผิวของเส้นใย พื้นผิวของเส้นใยสะอาดที่สุดเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 9 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก แต่อย่างไรก็ตามเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันที่ความเข้มข้น 9 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักไม่ได้ให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงที่ดีที่สุด เนื่องมาจากตัวเส้นใยเกิดความเสียหาย โดยความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงของเส้นใยสูงที่สุดคือ 6 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก

Mathew และ Joseph [Mathew and Joseph, 2007] ทำการดัดแปรเส้นใยปอบิด (isora fiber) ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักเป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากการทดสอบทางสัณฐานวิทยาพบว่าลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของเส้นใยเกิดการเปลี่ยนแปลงหลังจากการทำอัลคาไลน์เซชัน โดยพบว่าช่องว่างระหว่างเส้นใยกว้างขึ้นเนื่องมาจากการกำจัดกรดไขมันและลิกนินออกจากพื้นผิวของเส้นใย ซึ่งเป็นการเพิ่มโอกาสในการเกิดกลไกแบบการเชื่อมต่อกันทางกลส่งผลให้แรงยึดติดระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ และสมบัติทางกลของคอมโพสิทมีค่าเพิ่มขึ้น

2.1.1.1.2 การทำไซลาไนเซชัน (silanization)

ตัวเชื่อมประสานไซเลน (silane coupling agent) เป็นสารประกอบมีขั้วที่มีหมู่ซิลิกอนในโครงสร้าง ด้านหนึ่งของตัวเชื่อมประสานไซเลนจะสามารถเกิดปฏิกิริยากับเมทริกซ์ และอีกด้านหนึ่งจะเกิดปฏิกิริยากับเส้นใยธรรมชาติ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้จะช่วยให้เส้นใยและเมทริกซ์สามารถเข้ากันได้ดีขึ้น Gonzalez และคณะ [Gonzalez et al., 1999] ทำการดัดแปรเส้นใยว่านหางจระเข้ (agave fourcroydes) ด้วยไซเลนชนิดไวนิลติส (2-เมทอกซี-เอทอกซี) (vinyltris (2-methoxy-ethoxy)) 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ (dicumyl peroxide) 0.5 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก เส้นใยถูกแช่ในสารละลายไซเลนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากผลการทดสอบอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีพบว่าเส้นใยที่ผ่านการดัดแปรด้วยตัวเชื่อมประสานไซเลนแสดงพีคใหม่ที่ตำแหน่งของเลขคลื่นที่ 700 1030 1145 และ 1187 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของพันธะ -Si-O-C- ส่วนพีคที่เลขคลื่น 965 และ 1200 cm^{-1} เป็นพีคของพันธะ -Si-O-C- ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างตัวเชื่อมประสานไซเลนกับตัวเส้นใย จากผลการทดสอบความทนทานต่อแรงดึงพบว่าคอมโพสิทของเส้นใย

ที่ผ่านการดัดแปรด้วยตัวเชื่อมประสานไซเลนให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงที่สูงกว่าคอมโพสิทของเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปรด้วยตัวเชื่อมประสานไซเลน

Ismail และคณะ [Ismail et al., 2002] นำเส้นใยไผ่มาทำการดัดแปรด้วยตัวเชื่อมประสานไซเลนชนิดบิส(ไตเอทอกซีไซลิลโพรพิล)เตตระซัลไฟด์ (bis(triethoxysilyl propyl) tetra sulphide) ปริมาณ 3 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของยางธรรมชาติ จากผลการทดสอบทางสัณฐานวิทยาพบว่าคอมโพสิทของเส้นใยที่ไม่ผ่านการดัดแปรด้วยตัวเชื่อมประสานไซเลนมีช่องว่างที่เกิดขึ้นจากการหลุดของเส้นใยจากเมทริกซ์ ในขณะที่คอมโพสิทของเส้นใยที่ผ่านการดัดแปรด้วยตัวเชื่อมประสานไซเลนมีช่องว่างที่เกิดขึ้นจากการหลุดของเส้นใยจากเมทริกซ์ที่น้อยกว่า และมีเมทริกซ์บางส่วนติดกับเส้นใย แสดงให้เห็นถึงแรงยึดติดที่ดีขึ้นระหว่างพื้นผิวของเส้นใยและเมทริกซ์ส่งผลให้ความแข็งแรงของคอมโพสิทมีค่าเพิ่มขึ้น

Pothan และคณะ [Pothan et al., 2006] ทำการปรับปรุงการยึดติดโดยการดัดแปรทางเคมีของคอมโพสิทระหว่างเส้นใยกล้วยและพอลิเอสเทอร์ โดยใช้ตัวเชื่อมประสานไซเลนชนิดอัลฟา-เมทราไครอกซีโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน (γ-methacryloxypropyl trimethoxy silane) ปริมาณ 0.6 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก จากผลการทดสอบสมบัติเชิงพลวัต (dynamic properties) พบว่าค่าไดนามิกส์มอดูลัสของคอมโพสิทที่ผ่านการดัดแปรด้วยตัวเชื่อมประสานไซเลนมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากแรงยึดติดระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นด้วยตัวเชื่อมประสานไซเลน

Abdelmouleh และคณะ [Abdelmouleh et al., 2007] ศึกษาผลของชนิดตัวเชื่อมประสานไซเลนต่อสมบัติทางกลและความสามารถในการดูดซับน้ำของคอมโพสิทระหว่างเส้นใยไม้สน และยางธรรมชาติ โดยใช้ตัวเชื่อมประสานไซเลน 3 ชนิด ได้แก่อัลฟา-เมทราไครอกซีโพรพิลไตรเมทอกซี (γ-methacryloxypropyltrimethoxy, MPS) อัลฟา-เมอแคปโทโพรพิลไตรเมทอกซี (γ-mercaptoproyltrimethoxy, MRPS) และเฮกซะดีคิลไตรเมทอกซี-ไซเลน(hexadecyltrimethoxy-silanes, HDS) ปริมาณ 3 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก พบว่าคอมโพสิทที่ใช้ตัวเชื่อมประสานไซเลน MPS และคอมโพสิทที่ใช้ตัวเชื่อมประสานไซเลนชนิด MRPS ให้สมบัติทางกลที่ดีเนื่องมาจากมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถทำให้เกิดพันธะโควาเลนต์ระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ได้ จากผลการทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำของคอมโพสิท พบว่าชนิดของตัวเชื่อมประสานไซเลนไม่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับน้ำของคอมโพสิท

2.1.1.2 การดัดแปรทางกายภาพ (physical method)

2.1.1.2.1 การดัดแปรด้วยความร้อน (heat treatment)

การให้ความร้อนแก่เส้นใยธรรมชาติในระดับที่สูงกว่าอุณหภูมิการอบแห้งปกติสามารถลดปริมาณการดูดความชื้น และทำให้เส้นใยหดตัวลงไปจากเดิม การดัดแปร

ด้วยความร้อนทำให้ลิกนิน เฮมิเซลลูโลส และการดูดความชื้นของเส้นใยไม้ลดลง ในขณะที่การเกิดผลึกของเส้นใยเพิ่มขึ้น Rusche [Rusche, 1973] ศึกษาสมบัติความแข็งแรง (strength properties) ของเส้นใยไม้หลังจากทำการดัดแปรด้วยความร้อน โดยเส้นใยไม้ถูกนำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 ถึง 200 องศาเซลเซียส จากการศึกษาพบว่าความแข็งแรง (strength) ของเส้นใยจะมีความสัมพันธ์กับอัตราการสลายตัวทางความร้อน ส่วนค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น (elastic modulus) ของเส้นใยมีการลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องมาจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสหลังจากเส้นใยผ่านการดัดแปรด้วยความร้อน

Hakkou และคณะ [Hakkou et al., 2005] ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความสามารถในการเวท (wettability) ของเส้นใยไม้ระหว่างการดัดแปรด้วยความร้อน โดยเส้นใยถูกนำไปอบที่อุณหภูมิต่างกันระหว่าง 20 ถึง 240 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากผลการทดสอบด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี พบว่าการดัดแปรด้วยความร้อนทำให้พีคคาร์บอนิล (carbonyl peak) ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1730 cm^{-1} มีการลดลง ซึ่งบ่งบอกถึงการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส และพบว่าเส้นใยไม้มีความไม่ชอบน้ำ (hydrophobicity) หลังจากทำการดัดแปรโดยใช้ความร้อนในช่วง 130 ถึง 160 องศาเซลเซียส

Saikia [Saikia, 2008] รายงานผลของการดัดแปรโดยใช้ความร้อนต่อลักษณะโครงสร้างของเส้นใยป่านศรนารายณ์ จากการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (x-ray diffraction) และอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี พบว่าเส้นใยป่านศรนารายณ์ประกอบไปด้วยโครงสร้างของเซลลูโลส โครงสร้างของเซลลูโลสนี้จะไม่เปลี่ยนแปลงจนกระทั่งให้ความร้อนถึง 177 องศาเซลเซียส จากผลการวิเคราะห์ทางความร้อนพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงอยู่ 3 ช่วงเมื่อให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 37 ถึง 487 องศาเซลเซียส ช่วงแรกอยู่ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 37 ถึง 107 องศาเซลเซียส เป็นช่วงที่น้ำถูกกำจัดออกไป ช่วงที่สองเป็นช่วงที่องค์ประกอบภายในเส้นใยเริ่มมีการสลายตัวเมื่อให้อุณหภูมิเกิน 227 องศาเซลเซียสขึ้นไป และช่วงสุดท้ายเป็นช่วงที่องค์ประกอบคาร์บอนภายในโครงสร้างของเส้นใยถูกเผาไหม้

2.1.1.2.2 การดัดแปรโดยใช้โคโรนา (corona treatment)

การดัดแปรเส้นใยธรรมชาติโดยใช้พลังงานโคโรนาสามารถเพิ่มพลังงานพื้นผิวอิสระขององค์ประกอบที่มีขั้วที่อยู่ภายในเส้นใยได้ โดยจะเป็นการเพิ่มปริมาณของหมู่คาร์บอนิล (carbonyl group) และหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) Gassan และ Gutowski [Gassan and Gutowski, 2000] ปรับปรุงสมบัติของคอมโพสิทระหว่างเส้นใยปอกระเจาและอิพอกซี โดยการดัดแปรเส้นใยปอกระเจาด้วยโคโรนา จากผลการทดสอบพบว่าพื้นผิวอิสระขององค์ประกอบมีขั้วสูงขึ้นเมื่อทำการเพิ่มพลังงานจากแหล่งกำเนิด โดยที่สภาวะการดัดแปรที่เหมาะสมจะทำให้ค่าความต้านทานต่อการดัดโค้ง (flexural strength) ของคอมโพสิทเพิ่มขึ้น 30 เปอร์เซนต์

Gassan และคณะ [Gassan et al., 2000] ศึกษาลักษณะของพื้นผิวของเส้นใยปอกระเจาที่ผ่านการดัดแปรโดยใช้พลังงานโคโรนา โดยพบว่าการใช้พลังงานโคโรนาจะเพิ่มความเป็นขั้วให้กับเส้นใยปอกระเจาในขณะที่องค์ประกอบที่ไม่มีขั้วยังคงมีเท่าเดิม นอกจากนั้นแรงยึดติดระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการเพิ่มของหมู่คาร์บอนิล และหมู่ไฮดรอกซิล โดยสามารถยืนยันได้จากการเพิ่มขึ้นของความเป็นขั้วที่พื้นผิวของเส้นใย ความแข็งแรงของคอมโพสิทระหว่างเส้นใยปอกระเจาและอิพอกซีจะลดลงเมื่อทำการดัดแปรเส้นใยโดยใช้พลังงานโคโรนาที่มากเกินไป

2.1.2 การดัดแปรเมทริกซ์ (matrix modification)

ยางธรรมชาติอิพ็อกซิไดซ์ (epoxidized natural rubber, ENR) เป็นยางที่ถูกดัดแปรมาจากยางธรรมชาติ เมื่อยางธรรมชาติถูกอิพ็อกซิไดซ์ สมบัติทางเคมีและทางกายภาพจะเปลี่ยนไปโดยจะขึ้นกับปริมาณโมเลกุลที่ถูกดัดแปร เมื่อระดับของการดัดแปรเพิ่มขึ้นจะทำให้ยางมีความเป็นขั้วเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ยางธรรมชาติอิพ็อกซิไดซ์สามารถเข้ากับเส้นใยธรรมชาติได้ดีกว่ายางธรรมชาติที่ไม่ได้ถูกดัดแปร Ismail และคณะ [Ismail et al., 1997] ทดสอบสมบัติทางกลของคอมโพสิทระหว่างเส้นใยปาล์มและยางธรรมชาติอิพ็อกซิไดซ์ พบว่าเมื่อปริมาณของเส้นใยปาล์มเพิ่มขึ้น ค่าความทนทานต่อแรงดึง ค่าความทนทานต่อการฉีกขาด (tear strength) และค่าความแข็ง (hardness) ของคอมโพสิทมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องมาจากการกระจายตัว และการยึดติดที่ดีระหว่างเส้นใยปาล์มและยางธรรมชาติอิพ็อกซิไดซ์

Ismail และคณะ [Ismail et al., 2006] ศึกษาผลของ ยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติอิพ็อกซิไดซ์ต่อสมบัติการคงรูป และสมบัติความทนทานต่อแรงดึงของคอมโพสิทระหว่างเยื่อกระดาษ (paper sludge) และยางธรรมชาติ พบว่าคอมโพสิทของยางธรรมชาติอิพ็อกซิไดซ์ให้ค่าทอร์กสูงสุด ค่ามอดูลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (modulus at 100% strain) ค่ามอดูลัสที่ 300 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (modulus at 300% strain) และค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงกว่าคอมโพสิทของยางธรรมชาติ เนื่องมาจากการยึดติดที่ดีระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) ของเยื่อกระดาษกับหมู่อิพ็อกซีของยางธรรมชาติอิพ็อกซิไดซ์

2.1.3 การใส่สารช่วยให้เข้ากัน (addition of compatibilizer)

การใส่สารช่วยให้เข้ากันลงในคอมโพสิทที่ไม่เข้ากัน สามารถช่วยให้คอมโพสิทมีความเข้ากันได้เพิ่มขึ้น โดยสารช่วยให้เข้ากันจะเข้าไปอยู่บริเวณอินเทอร์เฟสระหว่างการผสมและช่วยลดแรงตึงผิว ส่งผลให้สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของคอมโพสิทดีขึ้น Ismail และคณะ [Ismail et al., 2005] ใช้ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (natural rubber grafted with maleic anhydride) เป็นสารช่วยให้เข้ากันในคอมโพสิทระหว่างเยื่อกระดาษและยางธรรมชาติ ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ถูกเตรียมในเครื่องบดผสมภายในโดยใช้อุณหภูมิ 135

องศาเซลเซียส และความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จากผลการศึกษาปฏิกิริยาระหว่างเยื่อกระดาษและยางธรรมชาติพบว่าเมื่อใส่ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เข้าไปในคอมโพสิททำให้การยึดติดระหว่างเยื่อกระดาษและยางธรรมชาติดีขึ้น โดยจากการทดสอบสัณฐานวิทยาพบว่าการใส่ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เข้าไปในคอมโพสิทส่งผลให้การเกาะกลุ่มของเยื่อกระดาษ และการหลุดของเยื่อกระดาษจากยางธรรมชาติลดลง

Ismail และ Haw [Ismail and Haw, 2008] ศึกษาผลของปริมาณยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ใช้เป็นสารช่วยให้เข้ากันในคอมโพสิทระหว่างเส้นใยปาล์มและยางธรรมชาติ โดยปริมาณของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ใช้เตรียมยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์มีปริมาณ 6 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของยางธรรมชาติ ปริมาณยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ใช้คือ 5 10 15 และ 20 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของยางธรรมชาติ จากการทดสอบสัณฐานวิทยาพบว่าเส้นใยปาล์มจะหลุดออกจากเมทริกซ์ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของแรงยึดติดระหว่างเส้นใยปาล์มและยางธรรมชาติ

Zeng และคณะ [Zeng et al., 2010] ใช้ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารช่วยให้เข้ากันในคอมโพสิทระหว่างเส้นใยฝ้ายและยางธรรมชาติ ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ถูกเตรียมในเครื่องบดผสมภายในโดยใช้อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จากผลการทดสอบด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี พบว่ายางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์มีพีคใหม่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1784 และ 1860 cm^{-1} ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่ามาเลอิกแอนไฮไดรด์ได้กราฟท์บนยางธรรมชาติ และเมื่อทดสอบกับคอมโพสิทที่ใส่ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ พบว่าพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1784 และ 1860 cm^{-1} มีการเปลี่ยนไปเป็นพีคที่เลขคลื่น 1780 และ 1856 cm^{-1} เนื่องมาจากผลของการเกิดพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bonding) ระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์

2.2 สมบัติของคอมโพสิทระหว่างเส้นใยธรรมชาติและยางธรรมชาติ

2.2.1 ผลของการทำอัลคาไลน์เซชันต่อสมบัติการคงรูปและสมบัติทางกลของคอมโพสิทระหว่างเส้นใยธรรมชาติและยางธรรมชาติ

De และคณะ [De et al., 2006] ศึกษาผลของการทำอัลคาไลน์เซชันต่อสมบัติการคงรูป สมบัติทางกล และสัณฐานวิทยาของคอมโพสิทระหว่างเส้นใยหญ้าและยางธรรมชาติ โดยเส้นใยหญ้าได้ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นเวลา 15 นาที ก่อนนำมาผสมกับยางธรรมชาติ คอมโพสิทที่ใส่เส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันให้ค่าทอร์กสูงสุด (maximum torque) มากกว่าคอมโพสิทที่ใส่เส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน เนื่องมาจากแรงยึดติดที่ดีกว่าระหว่างเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันและยางธรรมชาติ เวลาการคงรูป (cure time)

ของคอมโพสิทที่ใส่เส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันมีค่าลดลงเมื่อทำการเพิ่มปริมาณเส้นใย เนื่องมาจากอิทธิพลของค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ของเส้นใยหลังจากผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน โดยกระบวนการคงรูปของคอมโพสิทจะเกิดเร็วขึ้นเมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นด่าง ที่ปริมาณเส้นใยเท่ากัน คอมโพสิทที่ใส่เส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันมีสมบัติทางกลที่สูงกว่าคอมโพสิทที่ใส่เส้นใยที่ไม่ได้ทำอัลคาไลน์เซชัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทำอัลคาไลน์เซชันสามารถปรับปรุงแรงยึดติดระหว่างเส้นใยและยางธรรมชาติได้ จากการทดสอบสัณฐานวิทยา พบว่าคอมโพสิทที่ใส่เส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันมีเส้นใยที่หักติดอยู่กับเมทริกซ์ที่เป็นยางธรรมชาติ เนื่องมากจากการยึดติดที่ดีระหว่างเส้นใยและยางธรรมชาติ

Lopattananon และคณะ [Lopattananon et al., 2006] เตรียมคอมโพสิทระหว่างเส้นใยสับปะรดและยางธรรมชาติ โดยเส้นใยสับปะรดถูกดัดแปรด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างกันคือ 1 3 5 และ 7 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 18 ชั่วโมง พบว่าการทำอัลคาไลน์เซชันสามารถเพิ่มแรงยึดติดระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ และสมบัติความทนทานต่อแรงดึงได้ โดยที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ให้เปอร์เซนต์การปรับปรุงความแข็งแรงของคอมโพสิทสูงที่สุดคือ 28 เปอร์เซนต์ เมื่อเทียบกับคอมโพสิทที่ใส่เส้นใยที่ไม่ได้ทำอัลคาไลน์เซชัน การทำอัลคาไลน์เซชันสามารถกำจัดลิกนินและสารประกอบพวกขี้ผึ้งออกไปจากเส้นใยได้ ดังนั้นจึงเป็นการเพิ่มโอกาสให้เส้นใยและยางธรรมชาติเกิดกลไกแบบการเชื่อมต่อกันทางกลและส่งผลให้สมบัติทางกลของคอมโพสิทมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย จากการลักษณะทางสัณฐานวิทยาของคอมโพสิท พบว่าคอมโพสิทที่ใส่เส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันมีการยึดติดระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ที่ดีซึ่งสังเกตุได้จากมีส่วนของยางติดอยู่บนพื้นผิวของเส้นใย

Mathew และ Joseph [Mathew and Joseph, 2007] ศึกษาสมบัติการคงรูป สมบัติทางกล และสัณฐานวิทยาของคอมโพสิทระหว่างเส้นใยปอบิดและยางธรรมชาติ เส้นใยปอบิดผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 5 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 4 ชั่วโมง การทำอัลคาไลน์เซชันส่งผลให้ค่าทอร์กสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากพื้นผิวของเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันมีลักษณะที่เหมาะสมในการเสริมแรง และเมื่อเทียบที่ปริมาณเส้นใยเท่ากัน สมบัติทางกลของคอมโพสิทที่ใส่เส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันให้ค่าสูงกว่าคอมโพสิทที่ใส่เส้นใยที่ไม่ได้ทำอัลคาไลน์เซชัน จากลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวเส้นใย พบว่าเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันมีขนาดเล็กลง เนื่องมาจากการหลุดไปของลิกนิน และส่วนที่เป็นกรดไขมันส่งผลให้พื้นผิวของเส้นใยมีความขรุขระและเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดกลไกแบบการเชื่อมต่อกันทางกล

2.2.2 ผลของการทำไซลาไนเซชันต่อสมบัติการคงรูป และสมบัติทางกลของคอมโพสิทระหว่างเส้นใยธรรมชาติและยางธรรมชาติ

Ismail และคณะ [Ismail et al., 2002] ทดสอบผลของตัวเชื่อมประสานไซเลนชนิดบิส(ไตเอทอกซีไซลิลโพรพิล)เตตระซัลไฟด์ (bis(triethoxysilyl propyl) tetra sulphide) ต่อสมบัติการคงรูป สมบัติทางกล และสัณฐานวิทยาของคอมโพสิทระหว่างเส้นใยไผ่และยางธรรมชาติ โดยใช้ตัวเชื่อมประสานไซเลนปริมาณ 3 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของยางธรรมชาติ พบว่าคอมโพสิทที่ใส่ตัวเชื่อมประสานไซเลนมีเวลาการสกอร์ช และเวลาการคงรูปสั้นกว่าคอมโพสิทที่ไม่ได้ใส่ตัวเชื่อมประสานไซเลน โดยการลดลงนี้เป็นผลจากการกระจายตัวที่ดีของสารเสริมแรงในยางธรรมชาติเมื่อใส่ตัวเชื่อมประสานไซเลนเข้าไปในคอมโพสิท ค่าความทนทานต่อแรงดึง และค่าความทนทานต่อการฉีกขาดของคอมโพสิทที่ใส่ตัวเชื่อมประสานไซเลนมีค่าสูงกว่าคอมโพสิทที่ไม่ได้ใส่ตัวเชื่อมประสานไซเลน เนื่องมาจากตัวเชื่อมประสานไซเลนเข้าไปช่วยดัดแปรพื้นผิวของตัวเส้นใย และช่วยทำให้เกิดพันธะทางเคมีระหว่างเส้นใยและยางธรรมชาติ จากการทดสอบสัณฐานวิทยาของคอมโพสิทพบว่าการใส่ตัวเชื่อมประสานไซเลนส่งผลให้ช่องว่างที่เกิดจากการหลุดของเส้นใยจากเมทริกซ์ลดลง และทำให้เนื้อเมทริกซ์ยึดติดกับเส้นใยเพิ่มขึ้น

2.2.3 ผลของสารเชื่อม (bonding agent) ต่อสมบัติการคงรูป และสมบัติทางกลของคอมโพสิทระหว่างเส้นใยธรรมชาติและยางธรรมชาติ

Ismail และคณะ [Ismail et al., 2002] รายงานผลของสารเชื่อมต่อสมบัติการคงรูป สมบัติทางกล และสัณฐานวิทยาของคอมโพสิทระหว่างเส้นใยไผ่และยางธรรมชาติ โดยสารเชื่อมประกอบไปด้วยสาร 3 ชนิด คือ ฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์ (phenol formaldehyde) เฮกซะเมททิลลีนไตรเอมีน (hexamethylene tetramine) และซิลิกา (silica) ค่าเวลาการสกอร์ช (scorch time) และเวลาการคงรูปของคอมโพสิทที่ใส่สารเชื่อมมีค่าสั้นกว่าคอมโพสิทที่ไม่ได้ใส่สารเชื่อม ทั้งนี้เนื่องมาจากแรงยึดติดระหว่างเส้นใยและยางธรรมชาติที่เพิ่มขึ้น และการเพิ่มขึ้นของความหนืดของคอมโพสิท ค่ามอดูลัสและค่าความแข็งของคอมโพสิทมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใส่สารเชื่อม เนื่องมาจากแรงยึดติดระหว่างเส้นใยและยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น จากการทดสอบสัณฐานวิทยาพบว่าคอมโพสิทที่ใส่สารเชื่อมมีการหลุดของเส้นใยออกจากเมทริกซ์น้อยมาก เนื่องมาจากแรงยึดติดที่ดีระหว่างเส้นใยและยางธรรมชาติ

De และคณะ [De et al., 2006] ศึกษาผลของการใช้รีโซซินอลฟอร์มาลดีไฮด์ลาเท็กซ์ (resorcinol formaldehyde latex) เป็นสารเชื่อมต่อสมบัติการคงรูป สมบัติทางกล และสัณฐานวิทยาของคอมโพสิทระหว่างเส้นใยหญ้าและยางธรรมชาติ พบว่าคอมโพสิทที่ใส่สารเชื่อมให้ค่าทอร์กสูงกว่าคอมโพสิทที่ไม่ใส่สารเชื่อม เพราะแรงยึดติดที่ดีบริเวณอินเทอร์เฟสระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ นอกจากนั้น คอมโพสิทที่ใส่สารเชื่อมให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงที่สูงกว่าคอมโพสิทที่ไม่ใส่สารเชื่อมในทุกปริมาณเส้นใย เนื่องจากมีการถ่ายเทความเค้น (stress transfer) ได้อย่างมี

ห้องสมุดงานวิจัย

ประสิทธิภาพ จากผลการทดสอบสัณฐานวิทยาพบว่าคอมโพสิทที่ใส่สารเชื่อมมีเส้นใยที่หักคาอยู่ที่เมทริกซ์ เนื่องมาจากแรงยึดติดที่ดีระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์

Mathew และ Joseph [Mathew and Joseph, 2007] ศึกษาผลของสารเชื่อมต่อสมบัติทางกล และสัณฐานวิทยาของคอมโพสิทระหว่างเส้นใยปอบิดและยางธรรมชาติโดยสารเชื่อมประกอบไปด้วยสาร 3 ชนิด คือ รีโซซินอลฟอร์มาลดีไฮด์เรซิน (resorcinol formaldehyde resin) เฮกซะเมททิลลีนไตรเอมีน (hexamethylene tetramine) และพรีซิพิเทรทซิลิกา (precipitated silica) พบว่าการใส่สารเชื่อมเข้าไปในคอมโพสิทสามารถปรับปรุงค่ามอดูลัส ค่าความทนทานต่อแรงดึง ค่าความทนทานต่อการฉีกขาด และค่าความแข็งได้ เนื่องมาจากแรงยึดติดที่ดีระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ และจากสัณฐานวิทยาของคอมโพสิทพบว่าสารเชื่อมช่วยปรับปรุงแรงยึดติดระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ให้ดีขึ้น

2.2.4 ผลของการดัดแปรด้วยความร้อนต่อลักษณะการบวมตัวและสมบัติทางกลของคอมโพสิทระหว่างเส้นใยธรรมชาติและยางธรรมชาติ

Jacob และคณะ [Jacob et al., 2006] รายงานผลของการดัดแปรด้วยความร้อนต่อสมบัติความทนทานต่อแรงดึง และลักษณะการบวมตัวของคอมโพสิทระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์และยางธรรมชาติ เส้นใยป่านศรนารายณ์ถูกนำมาถักเป็นผืน แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ค่าความทนทานต่อแรงดึง ค่าความทนทานต่อการฉีกขาด และค่าความแข็งของคอมโพสิทที่มีการดัดแปรโดยใช้ความร้อนมีค่าสูงกว่าคอมโพสิทที่ไม่มีการดัดแปรด้วยความร้อน เนื่องมาจากการให้ความร้อนแก่เส้นใยจนถึงอุณหภูมิที่พอเหมาะสามารถเพิ่มความสามารถในการเกิดผลึกของเส้นใยได้ การดัดแปรด้วยความร้อนส่งผลให้ความชื้นของเส้นใยลดลงและสามารถเพิ่มแรงยึดติดระหว่างเส้นใยและยางธรรมชาติได้ จากการทดสอบสัณฐานวิทยาของคอมโพสิทแสดงให้เห็นว่าการดัดแปรด้วยความร้อนสามารถช่วยให้เส้นใยและยางธรรมชาติเข้ากันได้ดีขึ้น

2.2.5 ผลของการดัดแปรเมทริกซ์ต่อสมบัติการคงรูป และสมบัติทางกลของคอมโพสิทระหว่างเส้นใยธรรมชาติและยางธรรมชาติ

Ismail และคณะ [Ismail et al., 1997] ศึกษาผลของนำยางธรรมชาติอิพ็อกซิไดซ์มาเสริมแรงด้วยผงไม้จากปาล์มน้ำมัน (oil palm wood flour) โดยยางธรรมชาติอิพ็อกซิไดซ์ที่ใช้มีปริมาณของหมู่อิพ็อกไซด์ 50 เปอร์เซนต์ (ENR50) พบว่าเวลาการสกอร์ชและเวลาการคงรูปลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของผงไม้จากปาล์มน้ำมัน โดยการลดลงของเวลาการสกอร์ชและเวลาการคงรูปนี้ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่างเช่น พื้นที่ผิวของสารเสริมแรง ขนาดของสารเสริมแรง และความชื้นภายในสารเสริมแรง นอกจากนี้ ค่าความทนทานต่อแรงดึง และค่าการยืดตัวก่อนขาด (elongation at break) มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณผงไม้จากปาล์มน้ำมัน เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณผงไม้จากปาล์ม

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
รับที่ 13 พ.ย. 2555
เลขทะเบียน 249782
เลขเรียกหนังสือ

น้ำมัน เป็นการเพิ่มโอกาสในการเกาะกลุ่มกันของเส้นใยด้วย ดังนั้นหากผงไม้จากปาล์มน้ำมันเกิดการเกาะกลุ่มกันจะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของคอมโพสิทมีค่าลดลง

Ismail และคณะ [Ismail et al., 2006] ศึกษาผลของปริมาณเยื่อกระดาษและชนิดของยางธรรมชาติต่อสมบัติการคงรูป สมบัติเชิงพลวัต (dynamic properties) และสมบัติความทนทานต่อแรงดึง โดยปริมาณเยื่อกระดาษที่ใช้คือ 10 20 30 และ 40 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของยางธรรมชาติ พบว่าเวลาการสกอร์ชของคอมโพสิทของยางธรรมชาติ และคอมโพสิทของยางธรรมชาติอิพ็อกซิไดซ์มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเยื่อกระดาษ เวลาการคงรูปของคอมโพสิทของยางธรรมชาติมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของเยื่อกระดาษ ในขณะที่เวลาการคงรูปของคอมโพสิทของยางธรรมชาติอิพ็อกซิไดซ์ไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณของเยื่อกระดาษ ค่าทอร์กยืดหยุ่นสูงสุด (maximum elastic torque) และค่าทอร์กหนืด (viscous torque) ของคอมโพสิททั้งสองชนิดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของเยื่อกระดาษ อย่างไรก็ตามที่ปริมาณเยื่อกระดาษเท่ากัน คอมโพสิทของยางธรรมชาติอิพ็อกซิไดซ์มีค่าทอร์กสูงสุด ค่ามอดูลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (modulus at 100% strain) ค่ามอดูลัสที่ 300 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (modulus at 300% strain) และค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงกว่าคอมโพสิทของยางธรรมชาติ ในขณะที่ค่าการยืดตัวก่อนขาดมีค่าน้อยกว่าคอมโพสิทของยางธรรมชาติ เนื่องมาจากการยึดติดที่ดีกว่าระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของเยื่อกระดาษ และหมู่อิพ็อกไซด์ของยางธรรมชาติอิพ็อกซิไดซ์

Pattamaprom และคณะ [Pattamaprom et al., 2008] ศึกษาผลของการดัดแปรยางธรรมชาติต่อสมบัติทางกายภาพของคอมโพสิทระหว่างยางธรรมชาติและผงเถ้าแกลบ (rice husk ash) ยางธรรมชาติที่ดัดแปร ได้แก่ ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์และยางธรรมชาติอิพ็อกซิไดซ์ จากการศึกษาพบว่า คอมโพสิทระหว่างยางธรรมชาติอิพ็อกซิไดซ์และผงเถ้าแกลบแสดงค่าความหนาแน่นของโครงสร้างร่างแห (crosslink density) ที่สูงสุดและเวลาสกอร์สสั้นที่สุด ตามด้วยคอมโพสิทระหว่างยางธรรมชาติและผงเถ้าแกลบ และคอมโพสิทระหว่างยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์และผงเถ้าแกลบ เนื่องจากหมู่อีพอกซี่ในยางธรรมชาติอิพ็อกซิไดซ์ไปกระตุ้นพันธะคู่ในโมเลกุลของยางเกิดเป็นแรดิคอล ซึ่งแรดิคอลนี้สามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วและสร้างโครงสร้างร่างแหกับกำมะถัน การที่คอมโพสิทระหว่างยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์และผงเถ้าแกลบมีค่าเวลาสกอร์สที่ช้า อาจเนื่องมาจากความเป็นกรดของกรดมาเลอิกและอันตรกิริยาระหว่างมาเลอิกแอนไฮไดรด์และสารตัวเร่ง ค่ามอดูสัสของคอมโพสิทระหว่างยางธรรมชาติอิพ็อกซิไดซ์และผงเถ้าแกลบและคอมโพสิทระหว่างยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์และผงเถ้าแกลบมีค่าสูงกว่าของคอมโพสิทระหว่างยางธรรมชาติและผงเถ้าแกลบ

2.2.6 ผลของการใส่สารช่วยให้เข้ากันต่อสมบัติการคงรูป และสมบัติทางกลของคอมโพสิทระหว่างเส้นใยธรรมชาติและยางธรรมชาติ

Ismail และคณะ [Ismail et al., 2005] ศึกษาอิทธิพลของการใช้ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดร์เป็นสารช่วยให้เข้ากันต่อสมบัติการคงรูป สมบัติทางกล และสัณฐานวิทยาของคอมโพสิทระหว่างเยื่อกระดาษและยางธรรมชาติ พบว่าเวลาการสกอร์ชและเวลาการคงรูปของคอมโพสิทที่ใส่สารช่วยให้เข้ากันมีเวลานานกว่าคอมโพสิทที่ไม่ได้ใส่สารช่วยให้เข้ากัน ค่ามอดูลัสและค่าความทนทานต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใส่สารช่วยให้เข้ากันเนื่องมาจากสารช่วยให้เข้ากันสามารถปรับปรุงแรงยึดติดระหว่างเยื่อกระดาษและยางธรรมชาติ โดยส่วนของยางธรรมชาติในยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์จะเกิดการผสมแบบเข้ากันได้กับเมทริกซ์ที่เป็นยางธรรมชาติ และส่วนที่มีขั้วของยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์จะสร้างพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของเยื่อกระดาษที่บริเวณอินเทอร์เฟส จากการทดสอบทางสัณฐานวิทยาพบว่าการใส่สารช่วยให้เข้ากันสามารถลดการเกาะกลุ่มกันของเยื่อกระดาษ และการหลุดของเยื่อกระดาษจากเมทริกซ์ลงได้

Ismail และ Haw [Ismail and Haw, 2008] ศึกษาผลของการใช้ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นเป็นสารช่วยให้เข้ากันต่อสมบัติการคงรูป และสมบัติทางกลของคอมโพสิทระหว่างผงปาล์ม (plam ash) และยางธรรมชาติ พบว่าการใส่ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ส่งผลให้เวลาการสกอร์ช และเวลาการคงรูปลดลง เนื่องจากการยึดติดที่ดีระหว่างผงปาล์มและเมทริกซ์ นอกจากนั้น การใส่ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ช่วยเพิ่มค่าทอร์กสูงสุด และค่าทอร์กต่ำสุดของคอมโพสิท ซึ่งสามารถบอกได้ว่าการใช้ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์จะลดลักษณะการกระจายพลังงาน (damping characteristics) ของคอมโพสิทได้ ค่ามอดูลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ค่ามอดูลัสที่ 300 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ค่าความทนทานต่อแรงดึง ค่าการยืดตัวก่อนขาด มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ เนื่องจากการปรับปรุงแรงยึดติดระหว่างผงปาล์มและเมทริกซ์โดยยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ จากการทดสอบทางสัณฐานวิทยาพบว่าคอมโพสิทที่ใส่ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์มีช่องว่างที่เกิดจากผงปาล์มที่หลุดออกจากเมทริกซ์ลดลง เนื่องจากแรงยึดติดที่แข็งแรงระหว่างผงปาล์มและยางธรรมชาติ

Zeng และคณะ [Zeng et al., 2010] ศึกษาผลของปริมาณยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ต่อสมบัติทางพลวัต สมบัติทางกล และสมบัติทางสัณฐานวิทยาของคอมโพสิทระหว่างเส้นใยฝ้ายและยางธรรมชาติ พบว่าค่ามอดูลัสสะสม (storage modulus) ค่ามอดูลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ค่ามอดูลัสที่ 300 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ค่าความทนทานต่อแรงดึง ค่าการยืดตัวก่อนขาด และค่าความแข็งของคอมโพสิทมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ เนื่องมาจากแรงยึดติดที่ดีระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ จากการทดสอบทางสัณฐาน

วิทยาพบว่าเส้นใยที่ถูกดึงออกจากเมทริกซ์มีความหยาบที่ผิวของเส้นใย ซึ่งสามารถบอกได้ว่ามีการยึดติดที่ดีระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์เมื่อมีการใส่ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์

2.3 การใส่เส้นใยสองชนิดต่อสมบัติการคงรูปและสมบัติทางกลทางกลของยางคอมโพสิท

คอมโพสิทไฮบริด (hybrid composites) คือคอมโพสิทที่มีการใส่เส้นใยสองชนิดหรือมากกว่าสองชนิดลงในเมทริกซ์เดียว ข้อดีของเส้นใยชนิดหนึ่งจะใช้ทดแทนข้อด้อยของเส้นใยอีกชนิดหนึ่ง ดังนั้นเป็นการสมดุลของราคาและประสิทธิภาพของคอมโพสิท สมบัติของคอมโพสิทไฮบริดขึ้นกับ ปริมาณเส้นใย ความยาวของแต่ละเส้นใย การจัดเรียงตัวของเส้นใย การยึดติดระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์

Jacob และคณะ [Jacob et al., 2004] ศึกษาผลของปริมาณเส้นใย และอัตราส่วนระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์ และเส้นใยปาล์มต่อสมบัติการคงรูป และสมบัติการทนทานต่อแรงดึงของคอมโพสิท ระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์ เส้นใยปาล์ม และยางธรรมชาติ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของเส้นใยทั้งสองชนิด ส่งผลให้ค่าทอร์กของคอมโพสิทมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณของเส้นใยในยางธรรมชาติทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของยางธรรมชาติลดลง จึงทำให้คอมโพสิทมีความแข็ง (rigid) เพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบว่า ปริมาณของเส้นใยไม่ส่งผลต่อเวลาการคงรูปของคอมโพสิท เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์ และเส้นใยปาล์ม พบว่าที่อัตราส่วนเส้นใยป่านศรนารายณ์ 21 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของยางธรรมชาติ และเส้นใยปาล์ม 9 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของยางธรรมชาติให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงที่สุด และยังพบว่าค่าความทนทานต่อแรงดึงขึ้นกับอัตราส่วนของปริมาณเส้นใยป่านศรนารายณ์มากกว่าเส้นในปาล์ม เนื่องมาจากเส้นใยป่านศรนารายณ์มีค่าความทนทานต่อแรงดึงที่สูงกว่าเส้นใยปาล์ม

Jacob และคณะ [Jacob et al., 2005] ศึกษาสมบัติทางกลเชิงพลวัต (dynamic mechanical properties) ของคอมโพสิทระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์ความยาว 10 มิลลิเมตร เส้นใยปาล์มความยาว 6 มิลลิเมตร และยางธรรมชาติ พบว่ามอดูลัสสะสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของเส้นใยทั้ง 2 ชนิด เนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณเส้นใยส่งผลให้คอมโพสิทมีความแข็งเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ ยังพบแนวโน้มที่คล้ายกันกับค่ามอดูลัสสูญเสีย (loss modulus) เมื่อเพิ่มปริมาณของเส้นใยในคอมโพสิท การใส่เส้นใยลงในคอมโพสิททำให้สมบัติการกระจายพลังงาน (damping properties) ลดลง เพราะเส้นใยจะเข้าไปลดความสามารถในการเคลื่อนที่อย่างอิสระของโมเลกุลยางธรรมชาติ นอกจากนี้พบว่าการทำอัลคาไลน์เซชันส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของมอดูลัสสะสม เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของโครงสร้างร่างแหและการยึดติดระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ สมบัติการกระจายพลังงานลดลงเมื่อมีการทำทำอัลคาไลน์เซชัน

Jacob และคณะ [Jacob et al., 2008] ศึกษาผลของการใส่เส้นใยป่านศรนารายณ์ และเส้นใยปาล์มที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันต่อสมบัติการคงรูป สมบัติทางกล และสมบัติทางสัณฐานวิทยาของยางคอมโพสิท พบว่าคอมโพสิทที่ใส่เส้นใย 2 ชนิดที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันมีค่าทอร์กสูงสุด ค่ามอดูลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ค่าความทนทานต่อแรงดึง ค่าการยืดตัวก่อนขาด ค่าความทนทานต่อการฉีกขาด และค่าความแข็งมากกว่าคอมโพสิทที่ใส่เส้นใย 2 ชนิดแต่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร เนื่องมาจากการยึดติดที่ดีระหว่างเส้นใยและยางธรรมชาติ จากการทดสอบทางสัณฐานวิทยาของคอมโพสิท พบว่าคอมโพสิทที่ใส่เส้นใย 2 ชนิดที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปรมีช่องว่างที่เกิดขึ้นจากการหลุดของเส้นใยจากเมทริกซ์ ในขณะที่คอมโพสิทที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันมีเส้นใยที่หักและติดอยู่กับเมทริกซ์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทำอัลคาไลน์เซชันส่งผลให้แรงยึดติดระหว่างเส้นใยทั้ง 2 ชนิดและยางธรรมชาติดีขึ้น