



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของ
ยางธรรมชาติในรูปน้ำยางโดยการเติม
สารตัวเติมจากธรรมชาติ

โดย ดร.จรีรัตน์ สำราญและคณะ

เดือนสิงหาคม ปี พ.ศ.2549

บทสรุปรายงานสำหรับผู้บริหาร

ชื่อโครงการ การปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติในรูปแบบน้ำยางโดยการเติมสารตัวเติมจากธรรมชาติ

Physical Properties Enhancement of Natural Rubber latex by Adding Natural Filler

ปัญหาที่ท้าวิจัยและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยเป็นประเทศที่ผลิตยางพาราได้มากเป็นอันดับหนึ่งของโลกต่อเนื่องมาหลายปี อย่างไรก็ตามยางพาราที่ผลิตได้ถูกส่งออกในรูปยางดิบและน้ำยางข้น ส่วนที่นำมาใช้ในการผลิตกันที่มีเพียง 10% ของปริมาณทั้งหมด ผลิตภัณฑ์จากน้ำยางธรรมชาติที่ใช้งานในปัจจุบันมีอยู่มากมายหลายชนิดเช่นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการชุบ ได้แก่ถุงมือยาง ผลิตภัณฑ์ที่เป็นฟองน้ำได้แก่ที่นอน หมอน เบาะนั่ง หรือส่วนประกอบของเฟอร์นิเจอร์ แต่ในปัจจุบันน้ำยางมีแนวโน้มที่มีราคาเพิ่มสูงขึ้นจึงควรมีการลดต้นทุนโดยการเติมสารตัวเติมราคาถูกและได้จากธรรมชาติ เช่นแคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกา เป็นต้น นอกจากนี้ผลของการเติมสารตัวเติมยังช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลและความเสถียรต่อความร้อนของยางธรรมชาติ และทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติบางประการเด่นเป็นแนวทางหนึ่งของการขยายขอบเขตการประยุกต์ใช้ยางธรรมชาติในอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ และเพิ่มมูลค่าของยางพารา ในปัจจุบันเทคโนโลยีที่มีการนำมาใช้กับการปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติในรูปแบบน้ำยางคือ การเตรียมวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนของยางธรรมชาติโดยการเติมเคลย์ชนิดต่าง ๆ เช่นออร์แกนโน-มอนท์โมริลโลไนท์ (Arroyo *et al.*, 2003) ซึ่งทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติการทนต่อความร้อน และความต้านทานต่อแรงดึงที่เปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงขึ้น

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาลักษณะสารตัวเติม
2. การเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางธรรมชาติในรูปแบบน้ำยางกับสารตัวเติมที่ได้จากธรรมชาติ
3. ศึกษาผลของการเติมยางอิพอกซีไคซ์เป็นสารช่วยผสมระหว่างยางธรรมชาติในรูปแบบน้ำยางกับสารตัวเติม
4. เพื่อศึกษาสมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่ได้

ผลการดำเนินงาน

การเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางธรรมชาติและสารตัวเติมในสถานะน้ำยาง ซึ่งสารตัวเติมที่ใช้มี 3 ชนิดคือ เกล็ดดินไนท์ เบนโทไนท์ทั้งก่อนและหลังดัดแปรโครงสร้างโดยใช้เทคนิคการแลกเปลี่ยนไอออนด้วยสารอินทรีย์ออกตะโคเดซิลเอมีน และแคลเซียมคาร์บอเนตทั้งที่ได้จากการเผาลิกไนต์และทางการค้า การวิเคราะห์องค์ประกอบเคมี โครงสร้างเคมี การกระจายตัวและขนาดอนุภาคของสารตัวเติม

ก่อนและหลังตัดแปรรูปโครงสร้างโดยใช้เทคนิคการกระเจิงแสงของรังสีเอกซ์ (XRF) อินฟราเรดสเปกโทสโกปี (FTIR) และกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเคมีด้วย FTIR ปรากฏสัญญาณการดูดกลืนแสงของออกไซด์เคอซิลเอมีน เมื่อศึกษาลักษณะและขนาดของอนุภาคของสารตัวเติมด้วย พบว่าเกลินไนท์และเบนโทไนท์ทั้งก่อนและหลังตัดแปรรูปโครงสร้างมีลักษณะแตกต่างกัน โดยที่หลังตัดแปรรูปโครงสร้างพบว่ามีความอนุภาคเล็กลงและมีการกระจายขนาดอนุภาคสม่ำเสมอมากขึ้น โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ปรากฏหลักฐานระยะห่างชั้นซิลิเกตของเกลินไนท์และเบนโทไนท์หลังจากตัดแปรรูปโครงสร้างด้วยออกไซด์เคอซิลเอมีนเพิ่มขึ้น

เตรียมน้ำยางธรรมชาติคอมปาวด์โดยเติมสารเคมีสำหรับผสมยาง หลังจากนั้นเติมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ โดยแปรปริมาณสัดส่วนของเกลินไนท์และเบนโทไนท์ทั้งก่อนและหลังตัดแปรรูปโครงสร้างในช่วง 0.5 - 8 ส่วนเมื่อเทียบกับเนื้อยางแห้ง 100 ส่วน ในกรณีของแคลเซียมคาร์บอเนตแปรปริมาณสัดส่วน 5 - 20 ส่วนเมื่อเทียบกับเนื้อยางแห้ง 100 ส่วน สามารถขึ้นรูปในเข้ากระจุยวงทิ้งไว้ให้แห้งในอากาศ หลังจากนั้นนำเข้าตู้อบเพื่อทำการวัลคาไนซ์ยางที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

ผลการทดสอบการต้านทานต่อแรงดึงยึดของวัสดุเชิงประกอบที่เติมดินขาวเกลินและเบนโทไนท์ทั้งก่อนและหลังการตัดแปรรูปโครงสร้าง พบว่าค่ามอดูลัสที่ร้อยละยึด 100 300 และ 500% และค่าความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารตัวเติมทั้งในกรณีของดินขาวเกลินและเบนโทไนท์ทั้งก่อนและหลังตัดแปรรูปโครงสร้าง โดยปริมาณที่เหมาะสมในการเติมเพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติการทนต่อแรงดึงคือ 5 phr การปรับปรุงของสมบัติเชิงกลสามารถอธิบายได้จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างของสารตัวเติม ผลการทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติกับดินขาวเกลิน ทั้งก่อนและหลังตัดแปรรูปโครงสร้างเมื่อใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นสารช่วยผสม พบว่าค่ามอดูลัส และค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงที่สุด เมื่อเติมยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีร้อยละของอีพอกไซด์ขึ้นเท่ากับ 20 ในปริมาณ 2 phr และเมื่อเติมในปริมาณ 5 และ 10 phr พบว่าค่ามอดูลัส และค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดลงตามลำดับ ส่วนผลของการใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นสารช่วยผสมในวัสดุคอมโพสิตที่เติมเบนโทไนท์ก่อนและหลังตัดแปรรูป พบว่าปริมาณที่เหมาะสมคือ 10 phr ในส่วนผลของการศึกษาการนำแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากเปลือกหอยมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติพบว่าสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงใกล้เคียงกับยางธรรมชาติที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้า แต่เมื่อแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากเปลือกหอยเติมปริมาณสูงขึ้นค่ามอดูลัสมีแนวโน้มลดลง เมื่อศึกษาการปริมาณการบวมพองของวัสดุเชิงประกอบที่เติมเกลินและเบนโทไนท์ทั้งก่อนและหลังการตัดแปรรูปโครงสร้าง พบว่าปริมาณการบวมพองลดลงตามปริมาณสารตัวเติม แสดงว่าการเติมสารตัวเติมไม่ได้รับการขัดขวางการเกิดเชื่อมโยงสายโซ่ของที่ตำแหน่งพันธะคู่ของยางธรรมชาติ ในทางตรงกันข้ามแสดงให้เห็นว่าการเติมสารตัวเติมจากธรรมชาติช่วยให้วัสดุเชิงประกอบที่ได้ทนต่อตัวทำละลายมากขึ้น สำหรับวัสดุเชิงประกอบที่ใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมการบวมพองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

สรุปผลการวิจัย

การเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางธรรมชาติและสารตัวเติมในสถานะน้ำยาง ซึ่งสารตัวเติมที่ใช้มี 3 ชนิดคือ ดินขาวเกาลิน เบนโทไนท์ทั้งก่อนและหลังคัดแปร โครงสร้างโดยใช้เทคนิคการแลกเปลี่ยนไอออนด้วยสารออกตะโคเดซิลเอมีน สามารถนำไปใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติเพื่อเตรียมคอมพอสิตทั้ง 2 แบบ โดยให้ค่าสมบัติการทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นโดยปริมาณที่เหมาะสม 5 phr ผลการทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นของวัสดุคอมพอสิต เมื่อใช้ยางธรรมชาติอพอกไซค์เป็นสารช่วยผสม ปริมาณที่เหมาะสม คือ 2 และ 5 phr ในกรณีที่ใช้เกาลินและเบนโทไนท์ ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะที่คาดว่าจะควรวิจัยเพิ่มเติม และวิธีการที่ควรพัฒนาต่อยอดสู่ภาคปฏิบัติจริง

พิจารณาเลือกใช้สารอินทรีย์แลกเปลี่ยนไอออนชนิดอื่น ที่มีจำนวนไฮโดรคาร์บอนเพิ่มขึ้น เพื่อศึกษาลักษณะการแลกเปลี่ยนไอออนภายในชั้นซิลิเกตของดินขาวเกาลินและศึกษาผลที่ช่วยเสริมแรงในยางธรรมชาติ

การใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติม ควรมีการร่อนแยกขนาดเพื่อให้ได้ขนาดที่เหมาะสมในการนำไปใช้งาน

ผลงานทางวิชาการที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

งานวิจัยนี้คาดว่าจะนำเสนอเผยแพร่โดยนำเสนอในงานวิชาการระดับนานาชาติ

บทคัดย่อ

การเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางธรรมชาติและสารตัวเติม ซึ่งสารตัวเติมที่ใช้มี 3 ชนิดคือ ดินขาวเกาลิน เบนโทไนท์ทั้งก่อนและหลังดัดแปรโครงสร้าง และแคลเซียมคาร์บอเนตทั้งที่ได้จากการเผาเปลือกหอยและทางการค้า การดัดแปรโครงสร้างของดินขาวเกาลินและเบนโทไนท์ โดยใช้เทคนิคการแลกเปลี่ยนไอออนด้วยออกตะโคเดซิลเอมีน ผลจากการตรวจวิเคราะห์โครงสร้างเคมีของสารตัวเติมด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทสโกปี ปรากฏสัญญาณการดูดกลืนแสงของออกตะโคเดซิลเอมีนหลังการดัดแปรโครงสร้าง แคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการเผาเปลือกหอยมีลักษณะโครงสร้างเคมีคล้ายคลึงกับแคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้า ลักษณะและขนาดของอนุภาคของสารตัวเติมสังเกตได้จากด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าดินขาวเกาลินและเบนโทไนท์หลังดัดแปรโครงสร้างพบว่าอนุภาคมีลักษณะเป็นแผ่นบางและมีการกระจายของอนุภาคสม่ำเสมอ ส่วนแคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้ามีขนาดที่เล็กกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการเผาเปลือกหอย ผลการทดสอบการทนต่อแรงดึงยืด พบว่าค่ามอดูลัสและความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบที่เติมเกาลินมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบที่เติมเกาลินค่าความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น เมื่อใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 2 phr เป็นสารช่วยผสม พบว่า สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติการทนต่อแรงดึงได้ ในส่วนของสมบัติการทนต่อแรงดึงของคอมพอสิตที่เติมเบนโทไนท์ทั้งก่อนและหลังการดัดแปรโครงสร้าง พบว่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารตัวเติมและปริมาณยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่เหมาะสม คือ 10 phr สำหรับวัสดุเชิงประกอบที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการเผาเปลือกหอยมีค่าสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกับที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้า เมื่อเติมปริมาณสูงขึ้นค่ามอดูลัสมีแนวโน้มลดลง เมื่อศึกษาการปริมาณการบวมพองของวัสดุเชิงประกอบที่เติมเกาลินและเบนโทไนท์ทั้งก่อนและหลังการดัดแปรโครงสร้าง พบว่าปริมาณการบวมพองลดลงตามปริมาณสารตัวเติม สำหรับวัสดุเชิงประกอบที่ใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมการบวมพองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

Abstract

The preparation of composite between natural rubber and three fillers: kaolin clay bentonite (natural and modified forms) and calcium carbonate. Both kaolin and bentonite were modified by octadodecylamine as ion exchange and calcium carbonate was prepared from the calcined shell and commercial grade. FTIR spectra of modified kaolin and bentonite give the evidence of octadodecylamine signal. The calcium carbonate from the calcined shell gives the similar characteristic to the commercial one. The size and distribution of filler particle were investigated using SEM. It was found that the modified clays present the plate shape and the size distribution of clay is consistency. The particle size of commercial calcium carbonate is smaller than that of calcium carbonate from calcined shell. The moduli and tensile strength of unmodified kaolin clay composite tend to decrease whereas those of modified clay composite are improved. The epoxidized natural rubber introduced as the compatibilizer. It shows that ENR of 2 phr help improvement of tensile properties. Tensile properties of bentonite (both unmodified and modified forms) composites increase with the clay content. ENR of 10 phr is found to be the suitable for bentonite clay composite. Tensile properties of composite filled calcium carbonate from calcined shell showed no significant as compare to the commercial one, while the values of mechanical properties of composite filled calcined shell slightly decreased with addition of fillers. The result of gel content revealed that the gel content of composite filled 5.0 phr of kaolin and modified kaolin clay was higher than those of amount of fillers. It was found that in the case of composite filled calcium carbonate gel content tend to decrease with amount of fillers.

1. ความสำคัญและความเป็นมาของการวิจัย

ประเทศไทยเป็นประเทศที่ผลิตยางพาราได้มากเป็นอันดับหนึ่งของโลกต่อเนื่องมาหลายปี อย่างไรก็ตามยางพาราที่ผลิตได้ถูกส่งออกในรูปยางดิบและน้ำยางข้นส่วนที่นำมาใช้ในภาคผลิตภัณฑ์มีเพียง 10% ของปริมาณทั้งหมดผลิตภัณฑ์จากน้ำยางธรรมชาติที่ใช้งาน ในปัจจุบันมีอยู่มากมายหลายชนิด เช่น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการชุบ ได้แก่ถุงมือยาง ผลิตภัณฑ์ที่เป็นฟองน้ำได้แก่ที่นอน หมอน เบาะนั่ง หรือ ส่วนประกอบของเฟอร์นิเจอร์ แต่ในปัจจุบันน้ำยางมีแนวโน้มที่มีราคาเพิ่มสูงขึ้น จึงควรมีการลด ต้นทุน โดยการเติมสารตัวเติมราคาถูกและได้จากธรรมชาติ เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต, ซิลิกา นอกจากนั้นผลของการเติมสารตัวเติมยังช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลและความเสถียรต่อความร้อนของยางธรรมชาติ และทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติบางประการเด่น เป็นแนวทางหนึ่งของการขยายขอบเขต การประยุกต์ใช้ยางธรรมชาติในอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ และเพิ่มมูลค่าของยางพารา ในปัจจุบันเทคโนโลยีที่มีการนำมาใช้กับการปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติ

ในสภาวะน้ำยาง คือ การเตรียมวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนของยางธรรมชาติโดยการเติมเคลย์ ชนิดต่าง ๆ เช่น ออร์แกนโน-มอนท์โมริลโลไนท์ (organo-montmorillonite) (Arroyo *et al.*, 2003) ซึ่งทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติการทนต่อความร้อน และความต้านทานต่อแรงดึงที่เปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงขึ้น

สารตัวเติมเป็นสารที่ใช้ผสมกับยางเพื่อช่วยเสริมแรงให้กับผลิตภัณฑ์ยาง ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น หรือเพื่อช่วยลดต้นทุนการผลิต สารตัวเติมที่ช่วยเสริมแรงถูกเรียกว่า สารเสริมแรง เป็นสารที่มีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก (มีพื้นที่ผิวสูง) ได้แก่ ผงเขม่าดำ และผงเขม่าขาวหรือซิลิกา เป็นต้น ส่วนสารตัวเติมที่ไม่ช่วยเสริมแรง หรือมีการเสริมแรงได้น้อยแต่ถ้าเติมในปริมาณที่เหมาะสมก็มีผลในการเสริมแรงกับผลิตภัณฑ์ยางได้ ซึ่งนิยมใช้กันมากในการลดต้นทุนการผลิต ได้แก่ ดินขาว แป้ง และแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางธรรมชาติในรูปน้ำยางผสมกับสารตัวเติม 3 ชนิด ดังนี้ ดินขาวเกลิน เบนโทไนท์ก่อนและหลังดัดแปรโครงสร้าง และแคลเซียมคาร์บอเนต โดยใช้ยางธรรมชาติอโฟกซิไซค์เป็นสารช่วยผสมเพื่อเพิ่มการผสมเข้ากันได้มากขึ้นระหว่างยางธรรมชาติกับดินขาวเกลิน เบนโทไนท์ก่อนและหลังดัดแปรโครงสร้าง ทั้งนี้ในการศึกษาใช้ยางธรรมชาติชนิดที่มีแอมโมเนียสูง และยางอโฟกซิไซค์ซึ่งได้จากปฏิกิริยาอโฟกซิเคชันของยางธรรมชาติ เพื่อเตรียมวัสดุเชิงประกอบของยางธรรมชาติกับสารตัวเติม

2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาลักษณะสารตัวเติม
2. การเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางธรรมชาติในรูปน้ำยางกับสารตัวเติมที่ได้จากธรรมชาติ
3. ศึกษาผลของการเติมยางอโฟกซิไซค์เป็นสารช่วยผสมระหว่างยางธรรมชาติในรูปน้ำยางกับสารตัวเติม
4. เพื่อศึกษาสมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่ได้

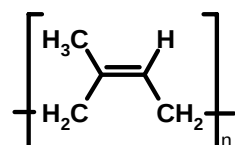
3. ทฤษฎี แนวคิดในการวิจัย และผลงานที่เกี่ยวข้อง

3.1 ทฤษฎี

3.1.1 ยางธรรมชาติ

สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติมีโครงสร้างเคมี คือ ซิส-1,4 พอลิไอโซพรีน (*cis*-1,4-polyisoprene) ดังรูปที่ 1 สูงถึง 99 % และมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยตามความหนืด ($\overline{M}_V$) ประมาณ 10^6 จัดเป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก ส่งผลให้ยางธรรมชาติมีสมบัติเด่นหลายประการที่พอลิเมอร์ชนิดอื่นไม่สามารถเทียบเคียงได้



รูปที่ 1 โครงสร้างเคมีของยางธรรมชาติ

สมบัติของยางธรรมชาติที่สำคัญมีอยู่หลายประการ ดังนี้ สมบัติการต้านทานต่อแรงดึง เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่ยาวและมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ทำให้สามารถทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นที่เปอร์เซ็นต์การยืดมากขึ้น และสามารถตกผลึกได้ (strain induced crystallization) ผลึกที่เกิดขึ้นนี้เป็นตัวเสริมความแข็งแรงของยางทำให้ยางธรรมชาติแข็งแรงขึ้น ความต้านทานต่อการฉีกขาดผลของการตกผลึกของยางธรรมชาตินั้นส่งผลทำให้ยางธรรมชาติมีความสามารถต้านทานต่อแรงฉีกขาดได้สูงมากโดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง ความทนทานต่อการขัดสี ความเป็นฉนวนไฟฟ้ายางธรรมชาติ จึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าได้ดี มีความทนทานต่อสารเคมีที่มีสภาพขี้ เช่น อะซิโตน และแอลกอฮอล์ได้ดี และทนกรดและด่างเจือจางได้ดี แต่ไม่ทนต่อกรดในตริกและกรดกำมะถันเข้มข้น ยางธรรมชาติมีความกระด้างตัวสูง มีความร้อนสะสมต่ำ ทำให้ยางธรรมชาติถูกนำมาใช้ทำยางรถบรรทุก ซึ่งต้องรับน้ำหนักสูง สมบัติการเหนียวติดของยางธรรมชาติทำให้สามารถทำผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่มีหลายชิ้นส่วนประกอบกัน เช่น ยางรถยนต์ เป็นต้น

3.1.2 สารตัวเติม (filler)

โดยทั่วไปการใส่สารตัวเติมในยางจะเพิ่มความแข็งแรงของยางเพิ่มขึ้นและมอดูลัสสูงขึ้นด้วย ส่วนสมบัติอื่นๆ เช่น ความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการสึกหรอ อาจเพิ่มขึ้นหรือลดลง ขึ้นกับชนิดของยางและชนิดของสารตัวเติมได้แก่ผงเขม่าดำ และผงเขม่าขาวหรือ ซิลิกา เป็นต้น สารตัวเติมเหล่านี้ช่วยเสริมแรงให้กับยางจึงเรียกว่า สารเสริมแรง เป็นสารที่มีขนาดอนุภาคเล็กมาก (มีพื้นที่ผิวสูง) เพื่อช่วยลดต้นทุนการผลิต โดยทั่วไปสารตัวเติมบางชนิดมีราคาถูกกว่ายาง เมื่อเติมลงในยางจะช่วยลดปริมาณการใช้ยาง สารตัวเติมชนิดนี้ไม่ช่วยเสริมแรง หรือมีการเสริมแรงได้น้อยแต่ถ้าเติมในปริมาณที่เหมาะสม สามารถใช้เป็นสารเสริมแรงกับผลิตภัณฑ์ยางได้ นิยมใช้กันมากในการลดต้นทุนการผลิต ได้แก่ ดินขาว แป้ง และแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น สารตัวเติมบางชนิดสามารถลดปริมาณการบวมพองของยางในน้ำมัน โดยปกติยางสามารถบวมพองได้ดีในน้ำมันแต่เมื่อใส่สารตัวเติมเข้าไปในยางจะทำให้การ

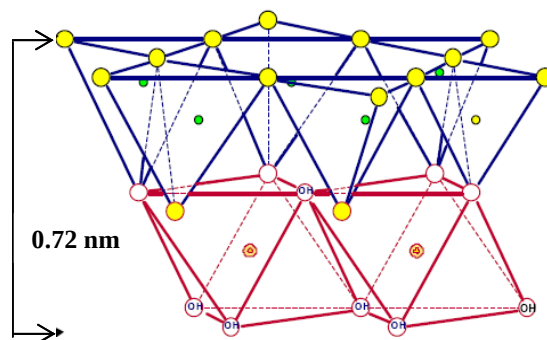
บวมพองในน้ำมันลดลง บางบางชนิดเป็นฉนวนไฟฟ้าได้ดี โดยปกติสามารถแบ่งชนิดของสารตัวเติมตามลักษณะได้เป็น 2 ชนิดคือ

(1) สารตัวเติมที่ใช้ในการเสริมแรง ซึ่งมีลักษณะทั้งเป็นเส้นใย และเป็นอนุภาคมีลักษณะเป็นแผ่น ทรงกระบอก ส่วนใหญ่อนุภาคจะมีขนาดเล็กประมาณ 180 - 600 Å เช่น ดินเหนียว เหมาดำ สารตัวเติมเหล่านี้เมื่อใส่ในพอลิเมอร์แล้วช่วยให้พอลิเมอร์มีสมบัติเชิงกลสูงขึ้นด้วย

(2) สารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง สารตัวเติมชนิดนี้มีราคาถูก มีอนุภาคขนาดใหญ่กว่า 10,000 Å ขึ้นไป เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต แป้งทาลัม เป็นต้น แต่ในกรณีที่สารตัวเติมบางชนิดมีอนุภาคขนาดปานกลาง เช่น อลูมิเนียมซิลิเกต และ แคลเซียมซิลิเกต จัดอยู่ในพวกกึ่งเสริมแรง

(ก) ดินขาวเกาลิน (kaolin)

ดินขาวเกาลิน เป็นดินที่มีสีขาวหรือสีซีดจาง ดินขาวเกาลินมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นแร่ดินกลุ่มเกาลินไนท์ และมีอาจมี โควาท์ ไมกา อิลไลต์ กอชชต์ และมอนต์มอริลโลไนท์ ผสมปนอยู่ด้วยกัน โดยทั่วไปดินขาวเกาลินมีสูตรโมเลกุลดังนี้ $Al_2[Si_2O_5](OH)_4$ โดยมีอัตราส่วนของ $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ คิดเป็นร้อยละ 39.5 46.5 และ 14.0 และดินขาวเกาลินอาจมีธาตุและสารประกอบอื่นปะปนอยู่ เช่น เหล็ก แคลเซียม แมกนีเซียม โพแทสเซียม และโซเดียม ลักษณะโครงสร้างผลึกโดยทั่วไปของดินขาวเกาลินแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 โครงสร้างผลึกของดินขาวเกาลิน

สมบัติทางกายภาพของดินขาวเกาลินที่สำคัญดังนี้

(1) ขนาดของอนุภาคของดินขาวเกาลินมีผลต่อความเหนียว และการหดตัวของเนื้อดินเมื่อแห้ง ดินเม็ดละเอียดจะให้ความเหนียว และการหดตัวเมื่อแห้ง มากกว่าเม็ดหยาบ ดินที่มีเม็ดหยาบจะมีความเหนียวน้อย

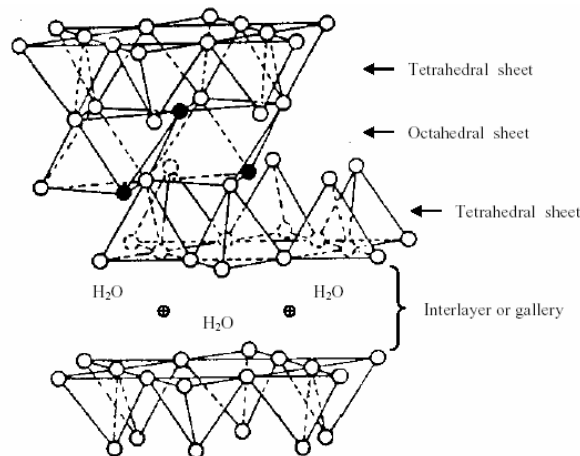
(2) รูปร่างของอนุภาค มีลักษณะเป็นแผ่นหกเหลี่ยม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ตั้งแต่ 0.05-10.0 ไมครอน

(3) การแลกเปลี่ยนอนุโมล ปกติดินขาวที่บริสุทธิ์ไม่มีการแลกเปลี่ยนอนุโมล หรือดูดซับอนุภาค และโมเลกุลอื่นๆ แต่ถ้าไม่บริสุทธิ์ จะเกิดการแลกเปลี่ยนอนุโมล หรือดูดซับเอาผลึกของแร่ที่มีขนาดเล็กไว้

ที่ผิวผลึก เกล็ดในดินที่บริสุทธิ์ มีโครงสร้างผลึกที่แข็งแรง แร่ธาตุ และอินทรีย์สาร แทรกเข้าไปในโครงสร้างผลึกไม่ได้ จึงคงความบริสุทธิ์ได้ดี

(ข) เบนโทไนท์

เบนโทไนท์ เป็นดินซึ่งประกอบด้วย แร่สมกไทต์ (smectite) เป็นส่วนใหญ่ แร่สมกไทต์เป็นชื่อของแร่ธรรมชาติ กลุ่มฟิโลซิลิเกต (phyllosilicate) ในโครงสร้างมีอะลูมิเนียมซิลิเกต เป็นองค์ประกอบสำคัญซึ่งแร่ในกลุ่มสมกไทต์ ได้แก่ มอนต์โมริลโลไนท์ แซฟโฟไนท์ และเฮคโทรไรต์แร่แต่ละชนิดเป็นสัดส่วนทางเคมีที่แตกต่างกัน โดยสัดส่วนที่แตกต่างกันพิจารณาได้จากอัตราส่วนของ Al^{3+} ที่แทนที่ Si^{4+} ในชั้นเตตระฮีดรอล (tetrahedral) เบนโทไนท์ซึ่งมีองค์ประกอบหลัก คือ มอนต์โมริลโลไนท์ โดยโครงสร้างย่อยลักษณะเป็นหน่วย แบบ 3 ชั้น โดยมีชั้นออกเตฮีดรอลของยิปซัม ($Al(OH)_3$) อยู่ตรงกลางประกบด้วยเตตระฮีดรอลของซิลิกา (SiO_2) 2 ชั้น เรียกว่า เรียงแบบ T-O-T ดังรูปที่ 3 โดยมีสูตรโมเลกุล ดังนี้ $Si_8Al_4O_{20}(OH)_4$ ลักษณะโครงสร้างของแร่สมกไทต์ด้านนอกเป็นชั้นของซิลิกา ไม่มีหมู่ไฮดรอกซิลที่ผิว แต่ละหน่วยของสมกไทต์ดึงดูดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ เพียงอย่างเดียว ไม่ปรากฏพันธะไฮโดรเจน และมีประจุรวมเป็นลบ เพื่อที่จะให้ประจุรวมเป็นกลาง จึงมีไอออนบวกจากภายนอกมาเกาะทั้งบริเวณขอบรอบนอก และภายในหน่วยย่อยของแต่ละหน่วย ไอออนบวกเหล่านี้สามารถแลกเปลี่ยนหรือแทนที่ได้ เรียกว่า exchangeable cation ที่พบบ่อยคือ Na^+ Ca^{2+} Mg^{2+} และ H^+ ไอออนบวกเหล่านี้เมื่อสัมผัสน้ำจะทำให้เกิดการบวมพอง (swelling) ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะอย่างหนึ่งของแร่สมกไทต์



รูปที่ 3 โครงสร้างผลึกของมอนต์โมริลโลไนท์

(ค) แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$)

แคลเซียมคาร์บอเนตที่มีในธรรมชาติอยู่ในรูปของซอสต์และหินปูน หรืออาจอยู่ในรูปของ โดโลไมท์ (dolomite; $CaMg(CO_3)_2$) และแอคเอร์ไรท์ (ankerite; $Ca(MgFe)(CO_3)_2$) แคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติอาจมาจากธรรมชาติหรือสังเคราะห์โดยกระบวนการตกตะกอน แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดที่ใช้ในยางมีดังนี้ หินปูน มีลักษณะเป็นผงขนาดเล็ก อนุภาคต่ำกว่า 100 เมช มีสีขาวหม่น

โดยปกติราคา บาท/กิโลกรัม ใช้ผสมในกรณีที่ต้องการให้ยางมีราคาถูกลงมาก การใส่ปริมาณมากทำให้ความแข็งแรงของยางเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น รูปชอล์ค เป็นผงสีขาว มีการกระจายขนาดอนุภาคกว้างเฉลี่ยประมาณ 1,000-10,000 Å แต่มีขนาดเล็กกว่าหินปูน ดังนั้นทำให้ยางมีความแข็งแรงสูงกว่ายางที่ใช้หินปูน และแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการตกตะกอน สามารถเตรียมแคลเซียมคาร์บอเนตของชนิดนี้ได้หลายวิธี วิธีหนึ่งเตรียมได้จากการใช้โซเดียมคาร์บอเนต โดยนำแคลเซียมคาร์บอเนตมาเผาให้แคลเซียมออกไซด์ นำแคลเซียมออกไซด์ละลายน้ำจะได้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ หลังจากนั้นนำมาตกตะกอนกับโซเดียมคาร์บอเนต ได้แคลเซียมคาร์บอเนต โดยทั่วไปอนุภาคมีขนาดใหญ่ ดังนั้นความต้านทานต่อแรงดึงของยางที่ผสมกับแคลเซียมคาร์บอเนตจึงไม่ดีเท่ากับสารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพชนิดอื่น เช่น เหมะดำ และเมื่อเปรียบเทียบขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนต พบว่าขนาดอนุภาคเล็ก จะทำให้ยางมีความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่ายางที่ใช้แคลเซียมคาร์บอเนตที่มีขนาดอนุภาคปานกลาง

3.2 แนวคิดในงานวิจัย

เนื่องจากยางธรรมชาติมีสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงน้อย ดังนั้นจึงคิดว่าการนำสารตัวเติมจากธรรมชาติมาผสม จะช่วยปรับปรุงสมบัติดังกล่าว โดยใช้ต้นทุนการผลิตต่ำ โดยปกติสารตัวเติมพวกแร่ธรรมชาติสามารถกระจายตัวในพอลิเมอร์ที่มีขี้ผึ้งได้ดีกว่าพอลิเมอร์ที่ไม่มีขี้ผึ้ง อย่างเช่นยางธรรมชาติ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้พยายามการปรับปรุงการเข้ากันได้ระหว่างสารตัวเติมกับยางธรรมชาติโดยการใช้สารช่วยผสมในที่นี้เลือกใช้อยางธรรมชาติโอพอกไซด์ เนื่องจากมีวงแหวนโอพอกไซด์ซึ่งทำให้มีสภาพขี้ผึ้งมากกว่ายางธรรมชาติ ในขณะเดียวกันยางธรรมชาติโอพอกไซด์มีสมบัติโคเคนหลายประการ ทนต่อน้ำมัน ลดการซึมผ่านแก๊ส สามารถกระเด็นตัวได้ดี

3.3 ผลงานที่เกี่ยวข้อง

Huang (1999) รายงานผลการดัดแปรพื้นผิวของดินขาวโดยใช้กรด และหมู่ไฮดรอกซิล เพื่อนำมาเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางและดินขาว จากผลการศึกษาเซลล์ที่ดัดแปรพื้นผิวโดยใช้กรดพบว่าที่พื้นผิวของอนุภาคมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาและเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล ได้เพิ่มขึ้น

Arroyo *et al.*, (2003) รายงานผลการนำออร์แกนโน-มอนท์โมริลโลไนท์ (organo-montmorillonite) มาใช้แทนเหมะดำเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ พบว่าความต้านทานต่อแรงดึงของยางธรรมชาติที่เติมดินเหนียว 10 phr เพิ่มขึ้นถึง 350% เมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ และยังพบว่าสมบัติเชิงกลของยางที่เติมออร์แกนโน-มอนท์โมริลโลไนท์ 10 phr มีค่าใกล้เคียงกับยางที่เติมเหมะดำ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าออร์แกนโน-มอนท์โมริลโลไนท์ สามารถใช้เป็นสารตัวเติมในยางได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Xu *et al.*, (2004) ศึกษาชนิดของเซลล์ต่อสมบัติการทนความร้อนของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเมทิลเมทาคริเลตกับเซลล์ โดยใช้เทคนิคการจับตัวแบบก้อน ในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ

Sharif *et al.*, (2005) ได้ศึกษาการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางธรรมชาติที่เชื่อมโยงสายโซ่โดยการฉายรังสีและเซลล์ โดยเตรียมได้จากการบวกรวมการผสมโดยการหลอม เซลล์ที่ใช้มี 3 ชนิด คือ โซเดียมมอนท์โมริลโลไนท์ (Na-MMT) Na-MMT ที่ได้ดัดแปรโครงสร้าง โดยใช้สารลดแรงดึงผิวชนิดไอออนบวก คือ dodecyl ammoniumchloride (DDA) และ octadecylamine

(ODA) วัสดุเชิงประกอบที่ได้ คือ NR/Na-MMT, NR/DDA-MMT และ NR/ODA-MMT ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบทั้ง 3 ชนิด พบว่าความต้านทานการทนต่อแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางธรรมชาติกับเคลย์ ที่ได้ดัดแปรโครงสร้างมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับ Na-MMT เนื่องจากการแทรกสายโซ่โมเลกุลยางเข้าไปในชั้นซิลิเกต (intercalation) ของ clay ที่ใช้เป็นสารตัวเติมในวัสดุเชิงประกอบ เมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติความร้อน พบว่าความเสถียรต่อความร้อนของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นหลังจากเติมเคลย์ ชนิดดัดแปรโครงสร้าง

Varghese and Karger-Kocsis (2003) ได้เตรียมวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนของยางธรรมชาติ ในรูปน้ำยางกับดินเหนียว โดยใช้เบนโทไนท์และฟลูออโรเฮกโตรไรต์ (fluorohectorite) ที่มีชั้นของซิลิเกตเทียบกับแร่ที่ไม่มีชั้นซิลิเกต ผลการวิเคราะห์พบวัสดุเชิงประกอบที่เติมฟลูออโรเฮกโตรไรต์ มีสมบัติการทนต่อแรงดึงมากที่สุด ในขณะที่เดียวกันพบว่าการเติมเคลย์ ไม่ได้มีผลกระทบต่อการตกผลึกของสายโซ่การยืดสูง ๆ ส่วนของสมบัติการทนต่อความร้อน พบว่ายางที่เติมฟลูออโรเฮกโตรไรต์ มีความเสถียรต่อความร้อนสูงที่สุด เนื่องจากการกระจายตัวของออร์แกนโนเคลย์ ดีในยางธรรมชาติ

Teh *et al.*, (2004) ศึกษาผลของการเติมยางอีพอกซีไดซ์ (ENR25 และ ENR50) เป็นสารช่วยผสมระหว่างยางธรรมชาติกับออร์แกนโนเคลย์ ใช้กระบวนการผสมโดยการหลอมในเครื่องผสมระบบปิด พบว่าเมื่อเติม ENR50 ปริมาณ 2 phr มีการกระจายตัวของ ออร์แกนโนเคลย์ ดีที่สุด ซึ่งส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบที่ได้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

ในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติในรูปน้ำยางโดยการเติมสารตัวเติมจากธรรมชาติ โดยสามารถเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางธรรมชาติในรูปน้ำยางผสมกับสารตัวเติม 3 ชนิด คือ เกลินไนท์ เบนโทไนท์ ทั้งก่อนและหลังดัดแปรโครงสร้าง และแคลเซียมคาร์บอเนต โดยใช้ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์เป็นสารช่วยเพิ่มผสมให้เข้ากันได้ดีขึ้นระหว่างยางธรรมชาติกับสารตัวเติม

4. วิธีการ

4.1 การเตรียมสารตัวเติม

(ก) สารตัวเติมในธรรมชาติ

สารตัวเติมธรรมชาติ 3 ชนิด ได้แก่ ดินขาวเกลินจากจังหวัดระนอง เบนโทไนท์ จากจังหวัดลพบุรี และปูนขาวได้จากการนำเปลือกหอยมาเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ละลายน้ำตกตะกอนด้วยโซเดียมคาร์บอเนต ได้แคลเซียมคาร์บอเนต (ต้นทุนในการผลิตประมาณ 2 บาท/กิโลกรัม) นำสารตัวเติมบดด้วยลูกกลิ้งบดผสมเพื่อทำให้มีขนาดอนุภาคเล็กลง หลังจากนั้นนำปูนขาวและเกลินไนท์กระจายตัวในน้ำเป็นสัดส่วนร้อยละ 50 โดยมวล ส่วนเบนโทไนท์กระจายตัวในน้ำเป็นสัดส่วนร้อยละ 20 โดยมวล

(ข) ดัดแปรโครงสร้างของสารตัวเติม

นำดินขาวเกลินและเบนโทไนท์ ประมาณ 20 g เติมน้ำ 800 ml ปั่นกวนให้เข้ากันที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำมาผสมกับออกตะเดซิลเอมีน 50 mmol และกรดไฮโดรคลอริก 50 mmol ในน้ำกลั่น 200 ml ปั่นกวนให้เข้ากัน ตกผลึก กรองและล้างด้วยน้ำกลั่นร้อนหลาย ๆ ครั้ง นำดินขาว เกลิน และเบนโทไนท์ที่ตัดแปร โครงสร้างแล้ว อบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

(ค) ตรวจพิสูจน์ลักษณะของสารตัวเดิมก่อนและหลังตัดแปรโครงสร้าง โดยใช้เทคนิคการกระเจิงแสงของรังสีเอกซ์ (XRF) อินฟราเรดสเปกโทสโกปี (FTIR) กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)

4.2 เตรียมน้ำยางธรรมชาติอพอกซิไคซ์

นำน้ำยางข้น (60% ของเนื้อยางแห้ง) เจือจางด้วยน้ำกลั่นให้ได้ยางธรรมชาติโดยมีเนื้อยางแห้ง ร้อยละ 30 เติมสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุประมาณ 2 ส่วนเมื่อเทียบกับเนื้อยางแห้ง 100 ส่วน ปั่นกวนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำน้ำยางธรรมชาติเจือจาง บรรจุในขวดกันกลมที่ต่อติดกับคอนเดนเซอร์และชุด ปั่นกวน ควบคุมที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เติมกรดฟอร์มิก 1 mol เทียบกับหน่วยไอโซพรีน 1 mol และเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 2 mol เทียบกับหน่วยไอโซพรีน ปั่นกวนเป็นเวลา 18 ชั่วโมง นำน้ำยาง ธรรมชาติอพอกซิไคซ์บางส่วนมาจับตัวด้วยเมทานอล หลังจากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศา เซลเซียส นำยางอพอกซิไคซ์ตรวจพิสูจน์โครงสร้างเคมี และคำนวณหาเปอร์เซ็นต์อพอกซิเคชัน โดยใช้ เทคนิค FT-IR และ NMR นำน้ำยางธรรมชาติอพอกซิไคซ์ที่มีเนื้อยางแห้งร้อยละ 25 ซึ่งทำให้เสถียรด้วย สารลดแรงตึงผิวชนิดไอออนลบ (polyethylene oxide, terric 16A16) ใช้เป็นสารช่วยผสมในการเตรียม วัสดุเชิงประกอบระหว่างน้ำยางธรรมชาติกับสารตัวเดิม (ได้ประเมินราคาในการเตรียมน้ำ

4.3 เตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางธรรมชาติกับสารตัวเดิม

(ก) การเตรียมสารเคมีสำหรับยาง

ขั้นตอนในการเตรียมสารเคมีสำหรับยาง (กำมะถัน ZDC และ ZnO) เตรียมในลักษณะเดียวกัน เตรียมคิสเพิร์สชันของสารเคมียางแต่ละชนิดในน้ำ โดยนำสารเคมีมาประมาณ 50.0 g ผสมกับน้ำกลั่น 50.0 g และ เติมสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ ประมาณ 0.5 g ผสมโดยใช้ ball-mill ให้เข้ากัน

(ข) การเตรียมน้ำยางคอมปาวด์

เตรียมน้ำยางธรรมชาติให้มีเนื้อยางแห้งร้อยละ 30 นำน้ำยางธรรมชาติ เติมสารตัวเดิมและสารเคมี (ตารางที่ 1) ผสมเข้าด้วยกันด้วยวิธีการปั่นกวนด้วยความเร็วรอบ 250 rpm เป็นเวลา 2 ชั่วโมง วางทิ้งไว้ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง กรองด้วยผ้าขาวบาง 2 ครั้ง เทใส่เบ้ากระจกสี่เหลี่ยมขนาด 150 x 150 x 1.5 mm วางทิ้ง ไว้ให้แห้งในอากาศ หลังจากนั้นนำเข้าตู้อบเพื่อทำการวัลคาไนซ์ยาง ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็น เวลา 6 ชั่วโมง

หมายเหตุ น้ำยางคอมปาวด์ที่เตรียมได้มีอายุการใช้งานประมาณ 2 วัน

ตารางที่ 1 สูตรของการเตรียมน้ำยางคอมปาวด์

Ingredients	Wet (parts by weight)	Dry (parts by weight)
30% Natural rubber latex	334	100
50% Kaolin dispersion	2 4 10 12 และ 16	1 2 5 6 และ 8
20% Bentonite dispersion	5 10 25 30 และ 40	1 2 5 6 และ 8
50% CaCO ₃ dispersion	10 20 และ 40	5 10 และ 20
50% Sulphur dispersion	3.0	1.5
50% Zinc diethyl dithiocarbamate dispersion	2.0	1.0
50% Zinc oxide	3.6	1.8

(ค) ศึกษาชนิดและปริมาณของสารตัวเติม

เตรียมน้ำยางธรรมชาติคอมปาวด์โดยเติมสารเคมีสำหรับผสมยาง หลังจากนั้นเติมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ โดยแปรปริมาณสัดส่วนของดินขาวเกาลินและเบนโทไนท์ทั้งก่อนและหลังคัดแปรโครงสร้างในช่วง 12 5 6 และ 8 ส่วนเมื่อเทียบกับเนื้อยางแห้ง 100 ส่วน (phr) ในกรณีของแคลเซียมคาร์บอเนตแปรปริมาณสัดส่วน 5 10 และ 20 phr

4.4 เตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างน้ำยางธรรมชาติกับสารตัวเติมโดยใช้น้ำยางธรรมชาติอิพอกไซค์เป็นสารช่วยผสม

เตรียมผสมน้ำยางธรรมชาติและน้ำยางธรรมชาติอิพอกไซค์ไซค์ มีปริมาณเปอร์เซ็นต์อิพอกไซค์เดชันเท่ากับ 20 ปั่นกวนเป็นเวลา 30 นาที เติมสารเคมีสำหรับผสมยางตามตารางที่ 1 โดยแปรปริมาณของน้ำยางอิพอกไซค์ไซค์ในปริมาณ 2 5 และ 10 phr หลังจากนั้นเติมสารตัวเติมก่อนและหลังคัดแปรโครงสร้าง 5 ส่วนเมื่อเทียบกับเนื้อยางแห้ง 100 ส่วน ปั่นกวนด้วยความเร็วรอบ 250 rpm เป็นเวลา 2 ชั่วโมง วางทิ้งไว้เป็นเวลา 4 ชั่วโมง กรองด้วยผ้าขาวบาง 2 ครั้ง เทใส่เบ้ากระຈักสี่เหลี่ยมขนาด 150 x 150 x 1.5 mm วางทิ้งไว้ให้แห้งในอากาศ หลังจากนั้นนำเข้าตู้อบเพื่อทำการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

4.5 ทดสอบสมบัติสมบัติการทนต่อแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ

เตรียมตัวอย่างโดยการนำแผ่นชิ้นงานที่ผ่านการวัลคาไนซ์ คัดเป็นรูปดัมเบล เพื่อทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึงยึดตามมาตรฐาน ASTM D412 โดยใช้เครื่องทดสอบการทนต่อแรงดึง รุ่น HTE S-Series-10 kN ความเร็วในการดึงเท่ากับ 500 มิลลิเมตรต่อนาที ผลของการทดสอบรายงานเป็นค่าแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นทดสอบที่ระยะยึดต่าง ๆ นำผลที่ได้ไปคำนวณมอดูลัสที่ระยะยึด 100 300 และ 500% และความแข็งแรงสูงสุดต่อการดึงยึด

4.6 ทดสอบการบวมพองของวัสดุเชิงประกอบ

นำตัวอย่างมาตัดเป็นชิ้นขนาด 0.5×0.5 cm ซึ่งน้ำหนักที่แน่นอน นำมาแช่ในตัวทำละลาย 4 ชนิด คือ โทลูอิน เฮกเซน เบนซีน และ ไดคลอโรมีเทน เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างไปชั่งเพื่อเอาตัวทำละลายออกและชั่งน้ำหนัก เพื่อนำไปคำนวณหาปริมาณการบวมพอง

$$\text{ปริมาณการบวมพอง (\%)} = \frac{(W_t - W_0)}{W_0} \times 100$$

เมื่อ W_0 คือ น้ำหนักของตัวอย่างก่อนแช่ (g)

W_t คือ น้ำหนักของตัวอย่างหลังแช่ (g)

5. ผลการวิจัย

ศึกษาการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางธรรมชาติและสารตัวเติมในสถานะน้ำยาง โดยเลือกใช้สารตัวเติม 3 ชนิด คือ ดินขาวเกาลิน เบนโทไนท์ทั้งก่อนและหลังดัดแปรโครงสร้างเป็นสารตัวเติมประเภทเสริมแรง และแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการเผาเปลือกหอย เปรียบเทียบกับการแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ในทางการค้า ผลการศึกษาโครงสร้างเคมี องค์ประกอบและลักษณะเฉพาะของสารตัวเติมก่อนและหลังดัดแปรโครงสร้าง และผลของสมบัติการทนต่อแรงดึงยืดของวัสดุเชิงประกอบ

5.1 การวิเคราะห์โครงสร้างและลักษณะเฉพาะของสารตัวเติม

การศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างและลักษณะเฉพาะของสารตัวเติม ได้ใช้เทคนิคการเรืองแสงของรังสีเอกซ์ การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(ก) วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเรืองแสงของรังสีเอกซ์

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุและสารประกอบที่มีอยู่ในดินขาวเกาลินและเบนโทไนท์ โดยใช้เทคนิคการเรืองแสงของรังสีเอกซ์ พบองค์ประกอบของธาตุและสารประกอบต่าง ๆ พบว่าในดินขาวเกาลินมี SiO_2 เป็นองค์ประกอบในปริมาณมากที่สุดสูงถึง 61.8 % และปริมาณรองลงมา คือ Al_2O_3 มีอยู่ 21.5 % องค์ประกอบหลักทั้ง 2 ชนิด มีผลต่อการเสริมแรงให้กับยางธรรมชาติ เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของ SiO_2 ต่อ Al_2O_3 เท่ากับ 2.3 หรือ อัตราส่วนของ Al และ Si เท่ากับ 1 ทำให้สามารถแสดงสูตรเคมีของดินขาวเกาลินได้ดังนี้ $\text{Al}_2[\text{Si}_2\text{O}_5](\text{OH})_4$ ในขณะที่ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุและปริมาณธาตุที่มีอยู่ในเบนโท พบ อัตราส่วนของ SiO_2 ต่อ Al_2O_3 เท่ากับ 5.2 ทำให้สามารถเขียนแสดงสูตรเคมีทั่วไปของเบนโทไนท์ได้ดังนี้ $\text{Al}_2[\text{Si}_5\text{O}_{15}](\text{OH})_4$

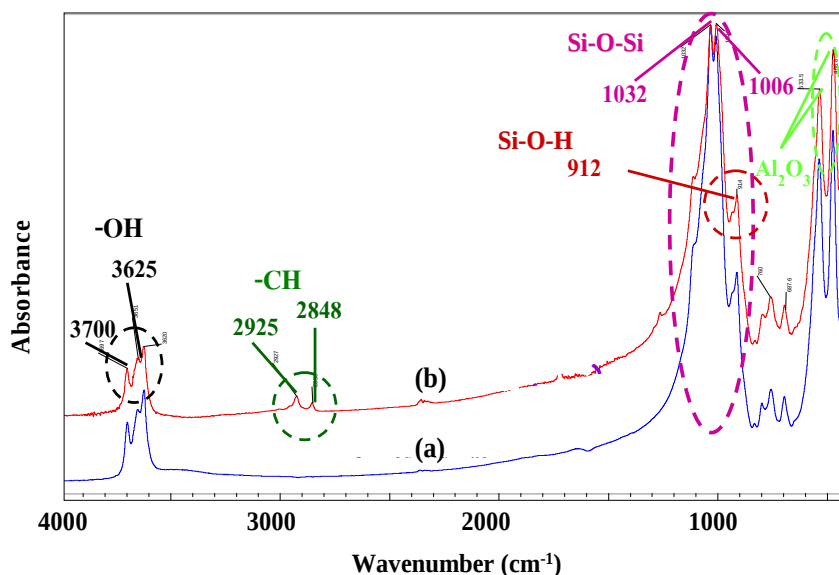
(ข) วิเคราะห์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

ผลของการวิเคราะห์ ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีสามารถสังเกตตำแหน่งของแถบการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่แตกต่างกันของดินขาวเกาลิน และเบนโทไนท์ก่อนและหลังดัดแปรโครงสร้าง

และในกรณีของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการเผาเปลือกหอยก่อนและหลังตกตะกอนร่วมกับโซเดียมคาร์บอเนต

เปรียบเทียบอินฟราเรดสเปกตรัมของดินขาวเกลือก่อนและหลังการดัดแปรโครงสร้าง ดังรูปที่

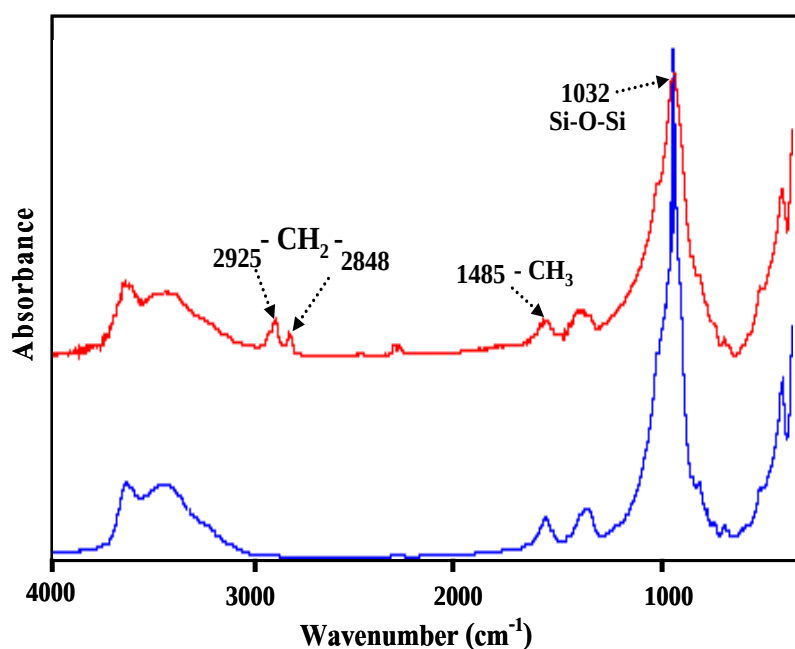
4



รูปที่ 4 อินฟราเรดสเปกตรัมของดินขาวเกลือก่อน (a) และเกลือกดัดแปรโครงสร้างด้วยออกตะโดเดซิลเอมีน (b)

จากรูปที่ 4 พบแถบการดูดกลืนแสงของดินขาวเกลือก่อนและหลังดัดแปรโครงสร้างมีลักษณะคล้ายคลึงกันปรากฏแถบการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งเลขคลื่นเหมือนกันที่ 1006 และ 1032 cm^{-1} เกิดจากการสั่นแบบยืดของ Si-O-Si ในโครงสร้างของชั้นซิลิเกต และเลขคลื่นที่ 912 cm^{-1} เป็นลักษณะเฉพาะของการสั่นแบบยืดของ Si-O-H ซึ่งเป็นอะตอมของซิลิกอนติดอยู่กับหมู่ไฮดรอกซี (และตำแหน่งการดูดกลืนแสงอินฟราเรดในช่วง 3700 และ 3625 cm^{-1} เกิดจากการสั่นแบบยืดของ -OH ในโครงสร้างของดินขาวเกลือก $\text{Al}_2[\text{Si}_2\text{O}_5](\text{OH})_4$ มีบางตำแหน่งเพิ่มขึ้นหลังจากดัดแปรโครงสร้างของดินขาวเกลือกด้วย octadecylamine ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 2925 และ 2848 cm^{-1} แสดงแถบการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของพันธะ -C-H เป็นการสั่นแบบยืดทั้งสมมาตรและอสมมาตรของหมู่เมทิลีน และเมทิล ของ octadecylamine

ในกรณีที่เปรียบเทียบอินฟราเรดสเปกตรัมของเบนโทไนท์ก่อนและหลังดัดแปรโครงสร้าง ดังรูปที่ 5 พบว่าปรากฏแถบการดูดกลืนในลักษณะเดียวกันกับดินขาวเกลือก ผลจากการดัดแปรโครงสร้างเบนโทไนท์ แสดงการดูดกลืนแสงที่เลขคลื่น 2925 cm^{-1} และ 1485 cm^{-1} เกิดจากการสั่นแบบยืดของ C-H ของเมทิลีน และเมทิล ที่กระจายแทรกอยู่ในชั้นซิลิเกตของเบนโทไนท์หลังดัดแปรโครงสร้าง

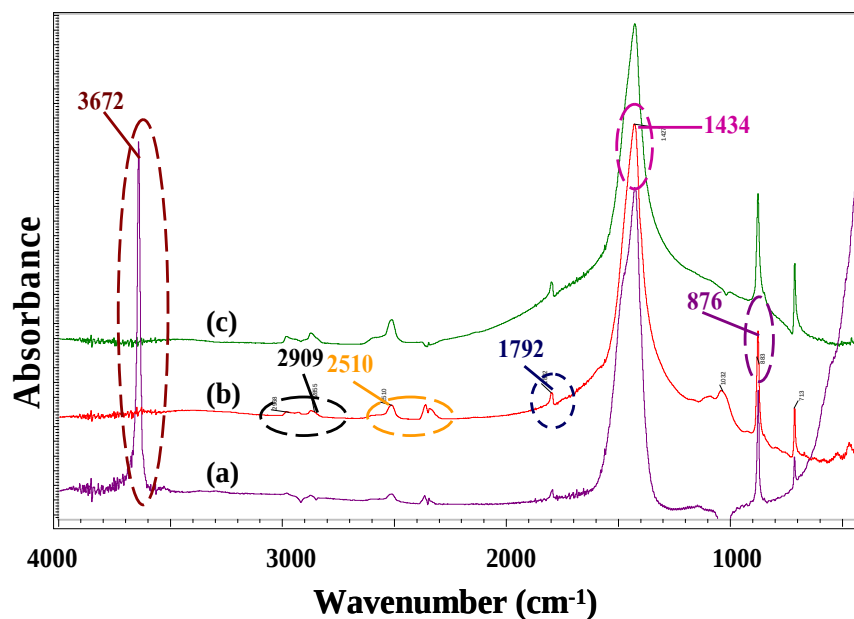


รูปที่ 5 อินฟราเรดสเปกตรัมของเบนโทไนท์ (a) และเบนโทไนท์ดัดแปรโครงสร้างด้วยออกตะโคเดซิลเอมีน (b)

สารตัวเติมชนิดแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ในการศึกษานี้ได้มาจากธรรมชาติและทางการค้า โดยเฉพาะแคลเซียมคาร์บอเนตจากธรรมชาติ ได้จากการนำเปลือกหอยมาเผาที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมออกไซด์ หลังจากนั้นนำมาตกตะกอนร่วมกับโซเดียมคาร์บอเนตจะได้แคลเซียมคาร์บอเนต

จากการศึกษาโครงสร้างเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนตปรากฏอินฟราเรดสเปกตรัมดังรูปที่ 6 จากสเปกตรัมที่ได้ปรากฏช่วงการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่เลขคลื่นประมาณ 876 และ 1434 cm^{-1} เกิดจากการสั่นแบบยืดของ -C-O ที่เลขคลื่นประมาณ 1792 cm^{-1} เกิดจากการสั่นแบบยืดของ -C=O เป็นลักษณะเฉพาะการดูดกลืนแสงของแคลเซียมคาร์บอเนต และสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนที่เลขคลื่นประมาณ 3672 cm^{-1} แสดงลักษณะเฉพาะของหมู่ไฮดรอกซี ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ผสมอยู่ร่วมกับแคลเซียมออกไซด์เป็นผลผลิตจากการเผาเปลือกหอย

จากผลการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค FT-IR พบว่าแคลเซียมออกไซด์จะมีเลขคลื่นที่แตกต่างจากแคลเซียมคาร์บอเนต ที่ประมาณ 3672 cm^{-1} หลังจากมีการตกตะกอนกับสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต ตำแหน่งเลขคลื่นนี้จะหายไป และปรากฏตำแหน่งฟีดที่ชัดเจนขึ้นที่เลขคลื่น 2909 2510 1792 1434 และ 876 cm^{-1} เป็นการยืนยันแถบการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของแคลเซียมคาร์บอเนต (Baker *et al.*, 1989) สอดคล้องกับลักษณะโครงสร้างของแคลเซียมคาร์บอเนต

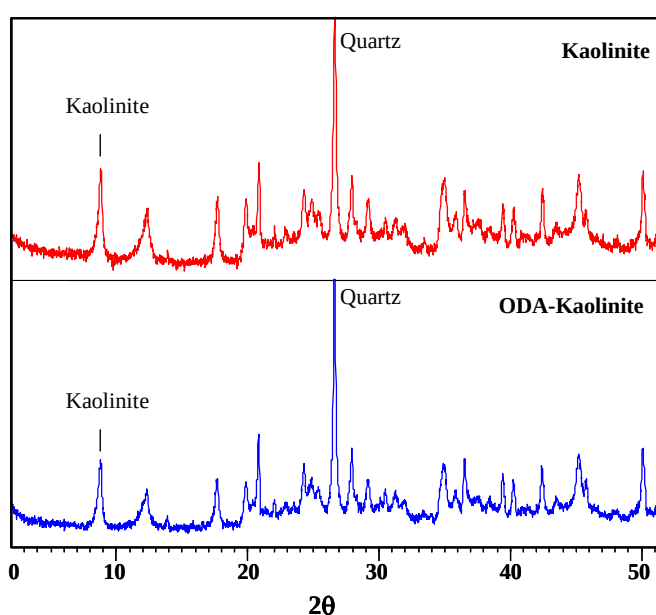


รูปที่ 6 อินฟราเรดสเปกตรัมของแคลเซียมออกไซด์ (a) แคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกกล้วย (b) และแคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้า (c)

(ค) วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

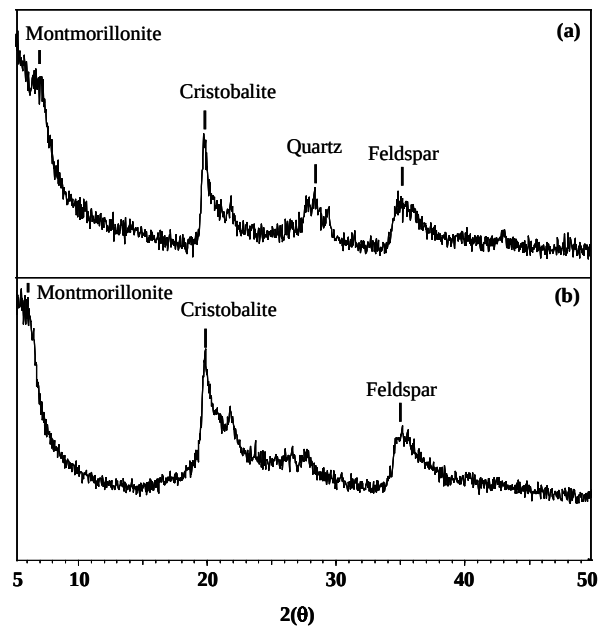
ผลของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เพื่อศึกษาการขยายของชั้นซิลิเกตในโครงสร้างของดินขาวเกลิน และเบนโทไนท์เมื่อตัดแปรโครงสร้างด้วยออกตะโดเดซิลเอมีนด้วยเทคนิคการแลกเปลี่ยนไอออนในชั้นของซิลิเกต

เปรียบเทียบสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของดินขาวเกลินก่อนและหลังการตัดแปรโครงสร้าง ดังรูปที่ 7 พบว่ามีแร่เกลินไนท์ และควอตซ์เป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อพิจารณา XRD สเปกตรัมของเกลินไนท์หลังตัดแปรโครงสร้างด้วยออกตะโดเดซิลเอมีน พบว่าไม่แตกต่างจากสเปกตรัมของเกลินไนท์ก่อนตัดแปร

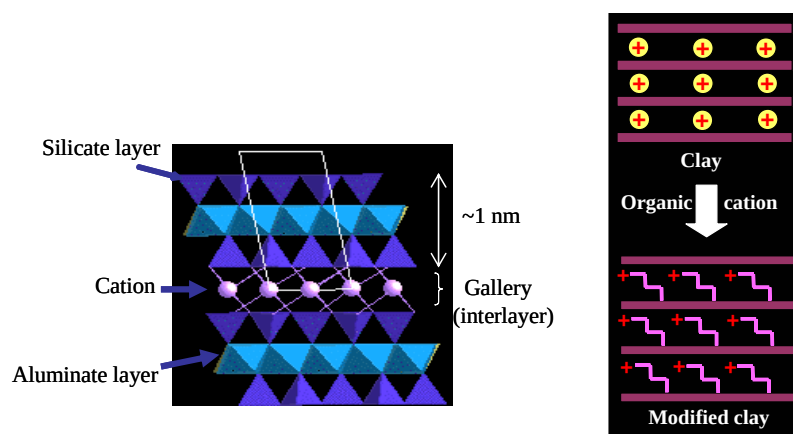


รูปที่ 7 XRD สเปกตรัมของเกลิน (a) และเกลินดัดแปร (b)

เมื่อเปรียบเทียบสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเบนโทไนท์ก่อนและหลังการดัดแปรโครงสร้าง ดังรูปที่ 8 จาก XRD สเปกตรัมของเบนโทไนท์ (รูปที่ 8(a)) พบว่ามีลักษณะพีคกว้าง อาจเนื่องจากมีความเป็นอสัณฐานมาก จาก XRD สเปกตรัมของเบนโทไนท์ก่อนและหลังการดัดแปรโครงสร้าง พบว่ามีแร่มอนต์มอริลโลไนท์ คริสโตบาไลต์ และเฟลด์สปาร์เป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อพิจารณาเบนโทไนท์หลังดัดแปรโครงสร้างด้วยออกตะโดเดซิลเอมีน พบว่าโครงสร้างมอนต์มอริลโลไนท์มากขึ้น และเมื่อนำเบนโทไนท์หลังการดัดแปรโครงสร้างหาค่าระยะห่างระนาบ (d-spacing) พบว่าค่าระยะห่างระนาบของมอนต์มอริลโลไนท์เพิ่มขึ้น ซึ่งลักษณะของการเกิดกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไอออน (exchangeable cation) ที่อยู่ในเบนโทไนท์กับออกตะโดเดซิลเอมีนดังรูปที่ 9



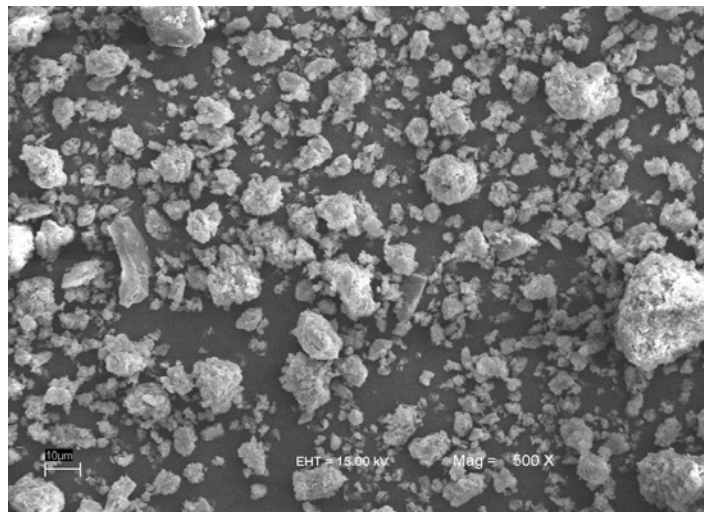
รูปที่ 8 XRD สเปกตรัมของเบนโทไนท์ (a) และเบนโทไนท์ดัดแปร (b)



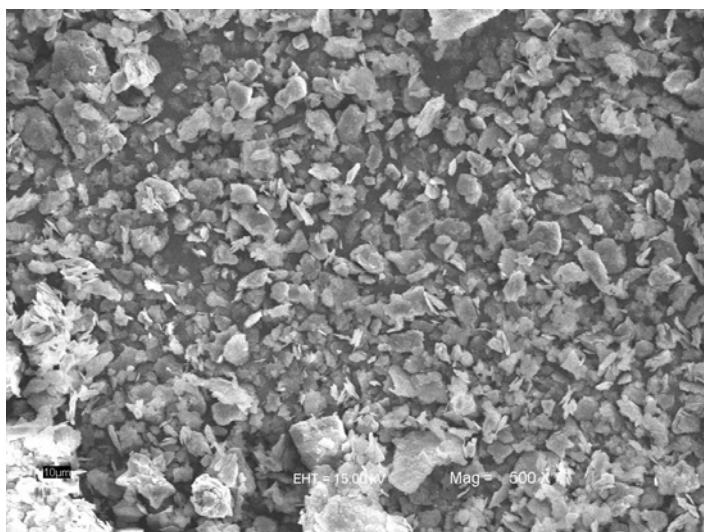
รูปที่ 9 กลไกของการแลกเปลี่ยนไอออนในโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนท์

(ง) การวิเคราะห์ลักษณะและขนาดของอนุภาค

ลักษณะภาพถ่ายขนาดและการกระจายตัวของเกล็ดดินทั้งก่อนและหลังตัดแปรโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 10 จากรูปที่ 10(a) เป็นลักษณะอนุภาคของเกล็ดดินก่อนตัดแปรโครงสร้าง มีลักษณะเป็นกลุ่มก้อน โดยมีขนาดประมาณ 10-50 ไมครอน ในขณะที่ดินขาวเกล็ดดินที่ได้ตัดแปรโครงสร้างดังรูปที่ 10(b) พบว่ามีลักษณะของอนุภาคแตกต่างจากเกล็ดดินที่ไม่ได้ตัดแปรโครงสร้าง นั่นคือลักษณะโครงสร้างของเกล็ดดินเป็นแผ่นแยกออกจากกันอย่างชัดเจน มีความหนาประมาณ 10-20 ไมครอน และการกระจายของขนาดของอนุภาคใกล้เคียงกัน ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากสารอินทรีย์ที่ใช้แลกเปลี่ยนไอออน คือออกตะโดเดซิลแอมโมเนียมไอออน เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับโซเดียมไอออน (Na^+) โพแทสเซียมไอออน (K^+) และแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ที่มีอยู่ในดินขาวเกล็ดดิน (พรพรรณ, 2528) จึงทำให้เกิดการขยายและแยกออกจากกันเป็นอนุภาคเล็ก ๆ มากขึ้น



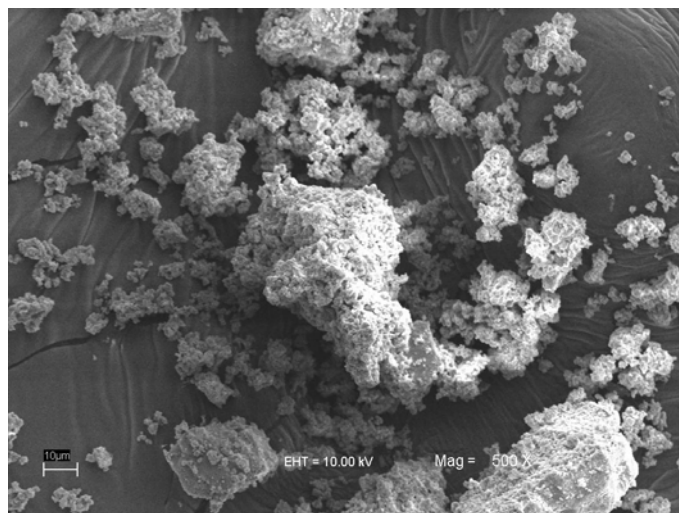
(a)



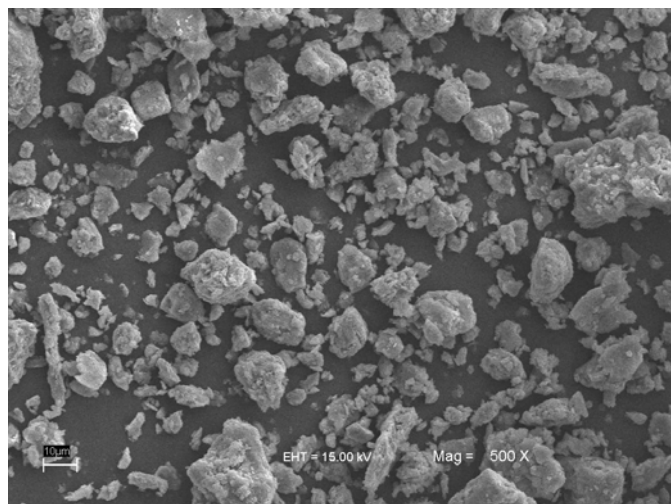
(b)

รูปที่ 10 ภาพถ่าย SEM ของเกล็ดดิน (a) และ เกล็ดดินตัดแปร (b)

จากรูปที่ 11 แสดงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคดินเหนียวเบนโทไนท์ ซึ่งมีการกระจายตัวที่กว้าง ตั้งแต่ประมาณ 5 -500 ไมครอน อนุภาคของดินเหนียวเบนโทไนท์มีการจับตัวเป็นกลุ่มก้อน เนื่องจากดินเหนียวเบนโทไนท์มีสมบัติดูดซับน้ำได้ดีมาก เนื่องจากโครงสร้างของเบนโทไนท์มีรูพรุนมาก และจากองค์ประกอบเคมีจะเห็นได้ว่า เบนโทไนท์เป็นวัสดุธรรมชาติที่มีหมู่ไฮดรอกซีเป็นจำนวนมากบนพื้นผิวของอนุภาค ส่งผลทำให้เป็นดินเหนียวชนิดที่สามารถดูดซับน้ำได้สูงมาก ทำให้เกิดการเกาะเป็นกลุ่มก้อน เมื่อตัดแปรโครงสร้างเบนโทไนท์ด้วยออกตะโดเดซิล จากรูป 11(b) พบว่าขนาดอนุภาคของเบนโทไนท์ที่ตัดแปรโครงสร้างเล็กน้อย จากรูปที่ 11(b) ดินเหนียวเบนโทไนท์ที่ตัดแปรโครงสร้างแล้ว มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้อยกว่าดินเหนียวเบนโทไนท์ที่ยังไม่ตัดแปรโครงสร้าง แต่ก็ยังมีการจับตัวเป็นก้อนของดินเหนียวอยู่ เนื่องจากเป็นสมบัติทางธรรมชาติของดินเหนียวเบนโทไนท์ที่ดูดความชื้นได้ดี



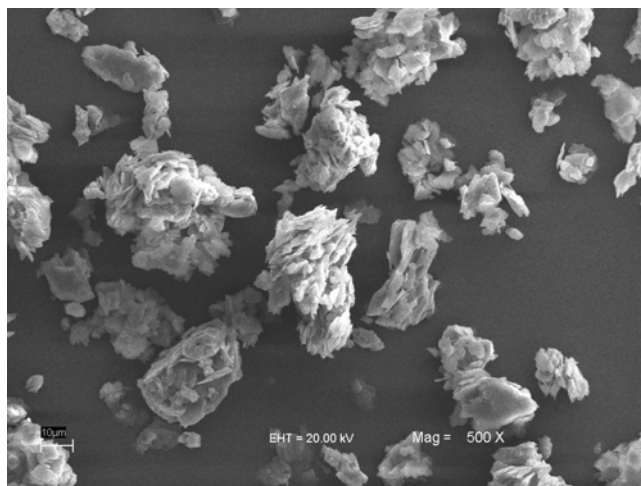
(a)



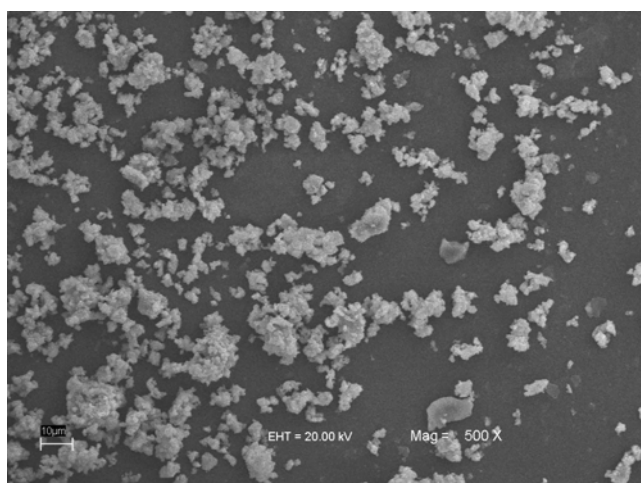
(b)

รูปที่ 11 ภาพถ่าย SEM ของเบนโทไนท์ (a) และ เบนโทไนท์ตัดแปร (b)

จากภาพถ่าย SEM ดังรูปที่ 12 แสดงลักษณะของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการเผาเปลือกหอยเปรียบเทียบกับทางการค้า ลักษณะของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการเผาเปลือกหอยซึ่งผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์แล้ว พบว่าการกระจายขนาดอนุภาคไม่สม่ำเสมอ ลักษณะเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ ผลเนื่องจากการมีสารประกอบแคลเซียมออกไซด์ รวมกับความชื้นในอากาศได้เป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้มีผลต่อลักษณะของแคลเซียมออกไซด์ ดังนั้นในการทดลองนี้ได้นำแคลเซียมออกไซด์ มาตกตะกอนใหม่ร่วมกับสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต เพื่อให้ได้แคลเซียมคาร์บอเนตที่บริสุทธิ์ เมื่อนำแคลเซียมคาร์บอเนตที่ผ่านการตกตะกอนมาศึกษาลักษณะและขนาดของอนุภาคแสดงดังรูป 12 (a) พบว่าผลึกมีขนาดเล็กและกระจายอนุภาคใกล้เคียงกันมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแคลเซียมออกไซด์ ในขณะเดียวกันพบว่าขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากเปลือกหอยมีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับทางการค้า ดังรูปที่ 12 (b) จากรูปนี้จะเห็นได้ว่าขนาดอนุภาคใกล้เคียงกันมากเนื่องมาจากได้ผ่านการร่อนแยกขนาดก่อนนำออกจำหน่าย เพื่อให้เหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นสารตัวเติมในอุตสาหกรรมยาง



(a)



(b)

รูปที่ 12 ภาพถ่าย SEM ของแคลเซียมคาร์บอเนตจากการเผาเปลือกหอย (a) และแคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้า (b)

5.2 วัสดุเชิงประกอบระหว่างยางธรรมชาติดินขาวเกลิน

5.2.1 สมบัติการต้านทานต่อแรงดึง

(ก) วัสดุเชิงประกอบระหว่างยางธรรมชาติกับดินขาวเกลินทั้งก่อนและหลังดัดแปรโครงสร้าง

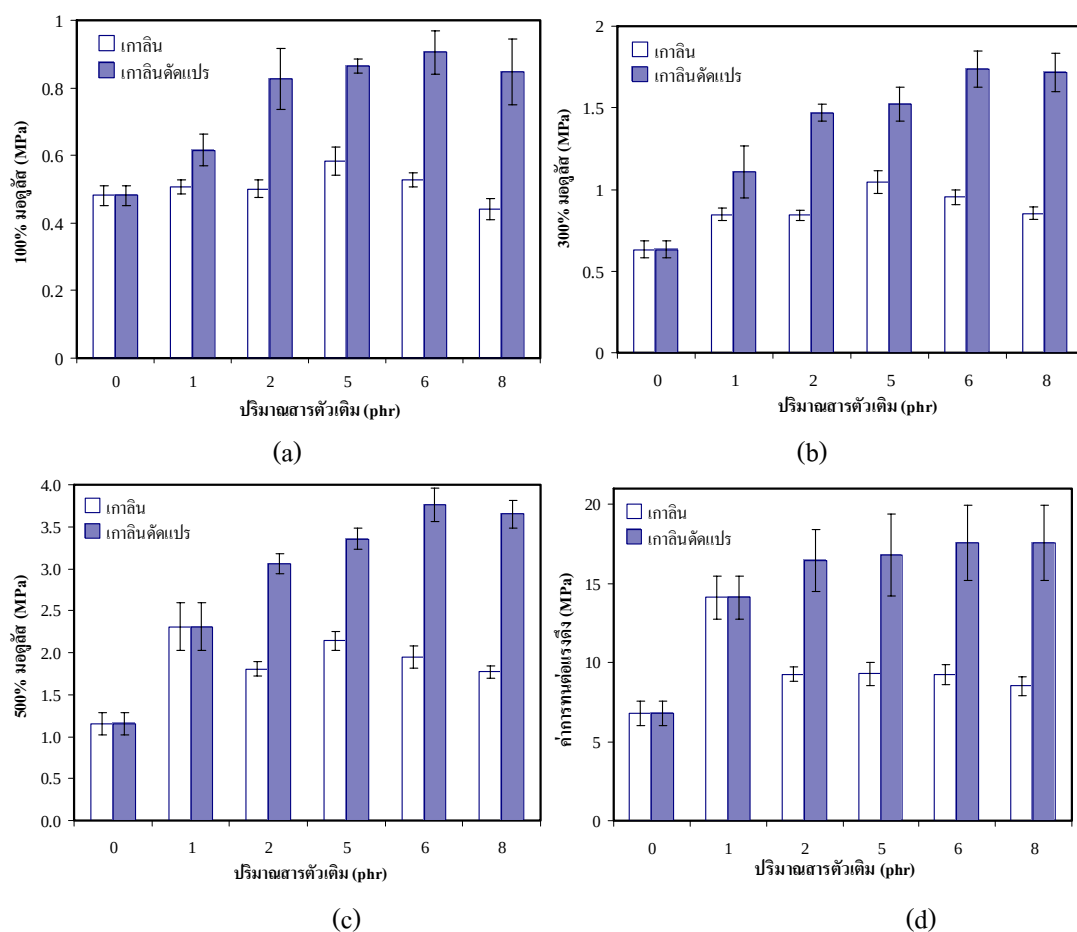
ผลจากการทดสอบการทนต่อแรงดึงยืดของยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่มีเกลินไนท์ โดยแปรปริมาณ 0 ถึง 8 ส่วนเมื่อเทียบกับเนื้อยางแห้ง 100 ส่วน ดังตารางที่ 2 และรูปที่ 13 เมื่อเติมเกลินในน้ำยางธรรมชาติพบว่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100 300 และ 500% และค่าความแข็งแรงของการยืดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย (ปริมาณของเกลิน 1- 5 ส่วนใน 100 ส่วนของยางแห้ง) แต่เมื่อเติมเกลิน มากขึ้นพบว่าค่าการทนต่อแรงดึงมีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่ได้เติมเกลิน จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเกลิน ไม่ได้เป็นสารตัวเติมที่ช่วยเสริมแรงของยางธรรมชาติ อันเนื่องมาจากขนาดอนุภาคของเกลินมีขนาดใหญ่และจับตัวเป็นกลุ่มก้อนดังแสดงในภาพถ่าย SEM (รูปที่ 10 (a)) และเมื่อเติมเกลินในปริมาณมากขึ้นทำให้การกระจายตัวของเกลิน ในยางธรรมชาติ เกิดขึ้นได้ไม่ดี ดังนั้นจึงได้นำเกลินมาดัดแปรโครงสร้างด้วยออกตะโคเดซิลเอมีน ใช้เป็นสารตัวเติมในน้ำยางธรรมชาติคาดว่าเกิดการขยายของชั้นซิลิเกตในโครงสร้างผลึกของชั้นซิลิเกตและอะลูมินา อาจเป็นเหตุผลที่ทำให้สามารถเสริมแรง ทำให้ยางธรรมชาติมีความแข็งแรงมากขึ้น จากผลการทดสอบความต้านทานการดึงยืดจากตารางที่ 3 และรูปที่ 13 พบว่าค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100 300 และ 500% และค่าความต้านทานการทนต่อแรงดึง เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติทั้งที่เติมเกลิน โดยเห็นได้ชัดเจนเมื่อเติมเกลินที่ดัดแปรโครงสร้างในปริมาณ 5- 8 ส่วนในเนื้อยาง 100 ส่วน ค่ามอดูลัสของระยะยืด 100 300 และ 500% เพิ่มขึ้นประมาณ 80 150 และ 200% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับยางธรรมชาติทั้งที่เติมเกลิน ค่าความเค้นเริ่มต้นที่สูงเป็นผลเนื่องจากการเสริมแรงของยางโดยชั้นซิลิเกตในดินเกลิน ในขณะที่เดียวกันค่าความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นประมาณ 155% เมื่อเติมเกลินดัดแปรโครงสร้าง 5 ถึง 8 phr อย่างไรก็ตามค่าระยะยืดที่จุดขาดลดลงตามปริมาณเกลินดัดแปรโครงสร้าง ดังนั้นจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าการต้านทานต่อแรงดึงยืดใกล้เคียงกันเมื่อเติมเกลินดัดแปรโครงสร้าง 5 ถึง 8 phr ในขณะที่ค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารตัวเติม โดยทั่วไป การเติมสารตัวเติมชนิดแข็งในวัสดุพอลิเมอร์ เป็นสาเหตุทำให้ค่าระยะยืดที่จุดขาดลดลงอย่างรวดเร็ว จากผลศึกษาปรากฏค่าระยะยืดที่จุดขาดลดลงประมาณ 50% เมื่อเติมปริมาณเกลิน 8 phr

ตารางที่ 2 สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางกับดินขาวเกลิน

ปริมาณดิน เกลิน (phr)	100% มอดูลัส (MPa)	300% มอดูลัส (MPa)	500% มอดูลัส (MPa)	ความต้านทานต่อ แรงดึง (MPa)
0	0.482	0.63	1.15	6.77
1	0.507	0.847	2.31	14.14
2	0.502	0.842	1.81	9.27
5	0.583	1.045	2.14	9.28
6	0.528	0.952	1.94	9.23
8	0.442	0.854	1.77	8.52

ตารางที่ 3 สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางกับดินขาวเกลินคัดแปร
โครงสร้าง

ปริมาณดินเกลิน คัดแปร (phr)	100% มอดูลัส (MPa)	300% มอดูลัส (MPa)	500%มอดูลัส (MPa)	ความต้านทานต่อ แรงดึง (MPa)
0	0.482	0.63	1.15	6.77
1	0.616	1.11	2.31	14.1
2	0.826	1.47	3.06	16.5
5	0.865	1.52	3.35	16.8
6	0.905	1.74	3.76	17.6
8	0.846	1.71	3.65	17.6



รูปที่ 13 สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางกับเกาลิน (□)ละเกาลินดัดแปร (■) (a) 100 % มอดูลัส (b) 300 % มอดูลัส (c) 500 % มอดูลัส และ (d) ค่าความต้านทานต่อแรงดึง

(ข) ผลของการเติมยางธรรมชาติโอพอกไซค์

การศึกษากครั้งนี้ได้พยายามการปรับปรุงการเข้ากันได้ระหว่างสารตัวเติมกับยางธรรมชาติโดยการใช้อยางธรรมชาติโอพอกไซค์เป็นสารช่วยผสม ผลการทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึงยึดของวัสดุเชิงประกอบที่มีการเติมสารช่วยผสมแสดงในตารางที่ 4 และรูปที่ 14

เมื่อเปรียบเทียบผลของสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเกาลินกับวัสดุคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเกาลินและมียางธรรมชาติโอพอกไซค์ (รูปที่ 14) พบว่าค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อมีการเติมยางธรรมชาติโอพอกไซค์ 2 phr โดยค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้นประมาณ 80% ในขณะที่ความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นถึง 200% แต่เมื่อเติมปริมาณน้ำยางธรรมชาติโอพอกไซค์เพิ่มขึ้น (5 และ 10 phr) พบว่าค่ามอดูลัส ค่าความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืดที่จุดขาดลดลงตามปริมาณที่เติม แสดงว่าการเติมยางธรรมชาติโอพอกไซค์ปริมาณ 2 phr เป็นปริมาณเหมาะสมในการเป็นสารช่วยผสมมีทำให้มีผลต่อการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติทั้งที่มีการเติมและไม่เติมเกาลิน เมื่อพิจารณาผลของสมบัติการต้านทานต่อการดึงยึดของวัสดุคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเกาลินดัดแปร

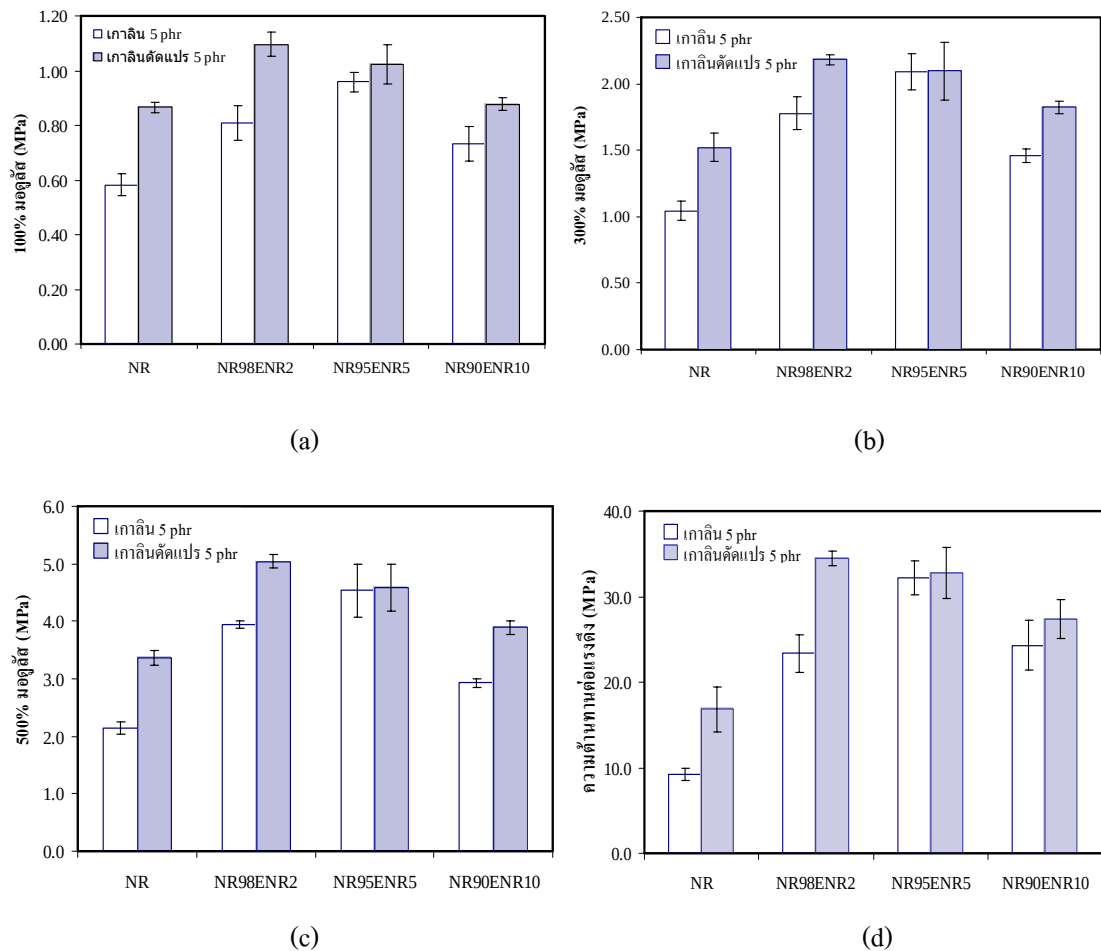
โครงสร้างเปรียบเทียบกับวัสดุคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เดิมกาลินตัดแปร โครงสร้างและมียางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นสารช่วยผสม จากตารางที่ 5 และรูปที่ 14 พบว่าค่ามอดูลัสของวัสดุคอมโพสิตที่เดิมยางธรรมชาติอีพอกไซด์เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดที่ปริมาณการเติมยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 2 phr จากผลของสมบัติการทนต่อแรงดึงที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนของวัสดุเชิงประกอบที่มีการเติมยางธรรมชาติอีพอกไซด์ เป็นสารช่วยผสม การปรับปรุงนี้อาจเกิดขึ้นเนื่องจากการกระจายตัวของสารตัวเติมในยางธรรมชาติ และมีอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมและยางธรรมชาติโดยมียางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นวัสดุเชื่อมระหว่างรอยต่อ

ตารางที่ 4 สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางกับดินขาวกาลิน (K) 5 phr โดยใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (ENR 20%) เป็นสารช่วยผสมในปริมาณ 2.5 และ 10 phr

ส่วนประกอบ	100% มอดูลัส (MPa)	300% มอดูลัส (MPa)	500% มอดูลัส (MPa)	ความต้านทานต่อ แรงดึง (MPa)
NR/K5	0.583	1.04	2.14	9.28
NR98/ENR2/K5	0.807	1.78	3.93	23.3
NR95/ENR5/K5	0.959	2.09	4.533	32.2
NR90/ENR10/K5	0.732	1.46	2.93	24.3

ตารางที่ 5 สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางกับดินขาวกาลินตัดแปร โครงสร้าง (MK) ปริมาณ 5 phr โดยใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (ENR 20%) เป็นสารช่วยผสมในปริมาณ 2.5 และ 10 phr

ส่วนประกอบ	100% มอดูลัส (MPa)	300% มอดูลัส (MPa)	500% มอดูลัส (MPa)	ความต้านทานต่อ แรงดึง (MPa)
NR/MK5	0.865	1.52	3.35	16.82
NR98/ENR2/MK5	1.095	2.18	5.05	34.5
NR95/ENR5/MK5	1.023	2.09	4.587	32.7
NR90/ENR10/MK5	0.876	1.82	3.89	27.4



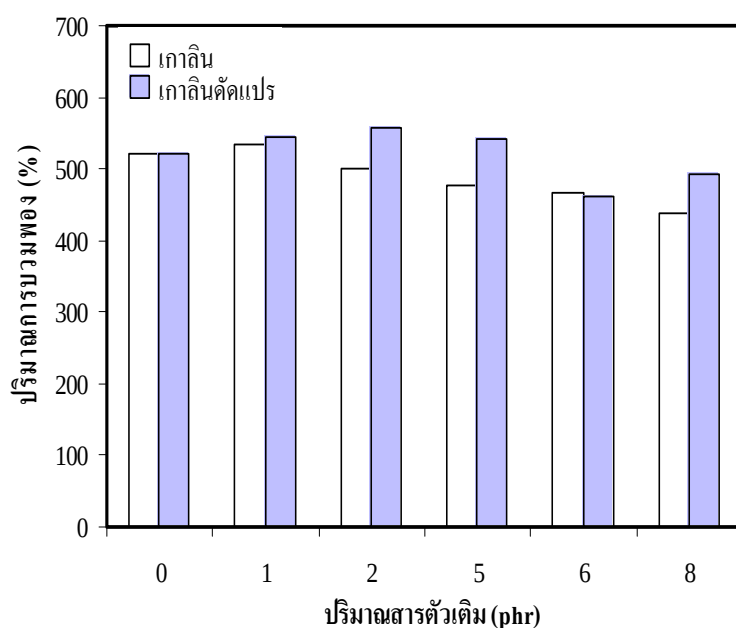
รูปที่ 14 สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางกับเกลิน (□) และเกลิน คัดแปรโครงสร้าง (■) ที่ปริมาณ 5 phr โดยใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (20% อีพอกไซด์) ปริมาณ 2.5 และ 10 phr เป็นสารช่วยผสม : (a) 100 % มอดูลัส (b) 300 % มอดูลัส (c) 500 % มอดูลัส และ (d) ค่าความต้านทานต่อแรงดึง

5.2.2 ทดสอบการบวมพอง

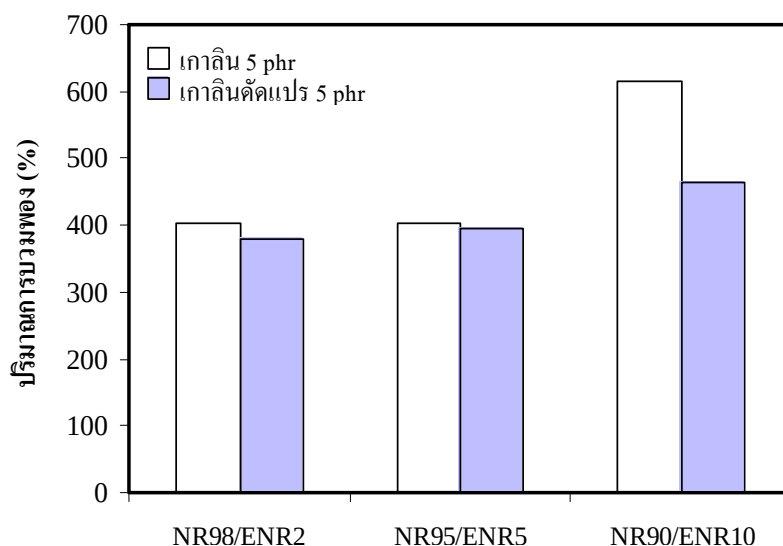
การบวมพองของวัสดุเชิงประกอบที่เติมสารตัวเติมในตัวทำละลาย ปริมาณการบวมพองสามารถบ่งบอกถึงลักษณะและปริมาณการเชื่อมโยงสายโซ่ได้ ถ้าระบบมีการเชื่อมโยงสายโซ่เกิดขึ้นได้ดี ส่งผลทำให้ปริมาณการบวมพองตัวทำละลายของยางลดลง นั่นคือ ตัวทำละลายแทรกเข้าไปในสายโซ่ได้จำกัด การบวมพองของวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางคอมพาวด์ที่เติมเกลินทั้งที่คัดแปรและไม่ได้คัดแปรโครงสร้าง ดังรูปที่ 15 จากผลการทดสอบการบวมพองในโทลูอีน พบว่ายางธรรมชาติมีการบวมพอง 520% ยางธรรมชาติที่เติมดินขาวเกลินแนวโน้มเปอร์เซ็นต์การบวมพองลดลงตามปริมาณดินขาวเกลิน โดยเฉพาะในวัสดุเชิงประกอบที่เติมเกลิน 8 phr พบว่าร้อยละการบวมพองลดลงเหลือ 480% เป็นผลเนื่องจากดินขาวเกลินเป็นแร่อนินทรีย์ซึ่งทนต่อตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วได้ดี ดังนั้นเมื่อเติมดินขาวเกลินในยางธรรมชาติซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนมีผลเหนี่ยวนำให้ทนต่อทำละลายได้เพิ่มขึ้น และจากผล

การทดลองแสดงว่าการเติมเกาลินไม่ได้มีผลกระทบต่อระบบการเชื่อมโยงสายโซ่ของยางธรรมชาติ เมื่อพิจารณาผลของการบวมพองของวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางคอมปาวด์ที่เติมเกาลินดัดแปร โครงสร้างด้วยออกตะโค-เดซิลเอมีน พบว่า ปริมาณการบวมพองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยตามปริมาณดินขาวเกาลิน ดัดแปร แต่เมื่อเติมมากกว่า 5 phr ปริมาณการบวมพองลดลงใกล้เคียงกับวัสดุเชิงประกอบที่เติมเกาลินที่ไม่ได้ดัดแปร โครงสร้าง (รูปที่ 15) ทั้งนี้เนื่องจากสารที่ใช้ดัดแปร โครงสร้าง คือออกตะโคเดซิลเอมีนเป็นสารอินทรีย์ซึ่งสามารถละลายในโพลูอินได้ซึ่งอาจส่งผลทำให้ตัวทำละลายแทรกซึมเข้าไปในชั้นของโครงผลึกและทำให้การบวมพองสูงกว่าในกรณีเติมเกาลินที่ไม่ได้ดัดแปร โครงสร้าง

เมื่อเปรียบเทียบผลของการบวมพองของวัสดุคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเกาลินทั้งก่อนและหลังดัดแปร โครงสร้าง โดยใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นสารช่วยผสมดังรูปที่ 16 พบว่าปริมาณการบวมพองใกล้เคียงกันเมื่อมียางธรรมชาติอีพอกไซด์ 2 และ 5 phr แต่เติมปริมาณยางธรรมชาติอีพอกไซด์เพิ่มขึ้นเป็น 10 phr พบว่าร้อยละปริมาณการบวมพองเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด (620%) เมื่อเทียบกับวัสดุเชิงประกอบที่เติมยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 2 และ 5 phr



รูปที่ 15 ปริมาณการบวมพองของวัสดุคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติกับเกาลินทั้งก่อนและหลังดัดแปร โครงสร้าง



รูปที่ 16 ปริมาณการบวมพองของวัสดุคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติกับเก่าลีนทั้งก่อน และ หลังดัดแปรโครงสร้างโดยใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (20% อีพอกซิเดชัน) เป็นสารช่วย ผสมโดยแปรปริมาณ 2 5 และ 10 phr

5.3 วัสดุเชิงประกอบระหว่างยางธรรมชาติกับเบนโทไนท์

5.3.1 สมบัติการต้านทานต่อแรงดึง

(ก) วัสดุเชิงประกอบระหว่างยางธรรมชาติกับเบนโทไนท์ทั้งก่อนและหลังดัดแปรโครงสร้าง

ผลจากการทดสอบการทนต่อแรงดึงยืดของยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่มีเบนโทไนท์ โดยแปร ปริมาณ 0 ถึง 8 ส่วนเมื่อเทียบกับเนื้อยางแห้ง 100 ส่วน แสดงดังตารางที่ 7 และ 8 และรูปที่ 17 เมื่อเติม เบนโทไนท์ ในยางธรรมชาติพบว่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100 300 และ 500% และค่าความแข็งแรงของการยืด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเบนโทไนท์ (1- 5 ส่วนใน 100 ส่วนของยางแห้ง) โดยค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100 300 และ 500 % เพิ่มขึ้นประมาณ 100 และ 400% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับยางวัลคาไนซ์ แต่เมื่อเติม เบนโทไนท์มากกว่า 5 phr พบว่าค่าการทนต่อแรงดึงมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ค่าความต้านทานต่อ แรงดึงของคอมโพสิตเมื่อเติมเบนโทไนท์ 5 phr เพิ่มขึ้นประมาณ 350% เมื่อเทียบกับยางวัลคาไนซ์ จาก ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเบนโทไนท์เป็นสารตัวเติมที่ช่วยเสริมแรงยางธรรมชาติ อันเนื่องมาจาก ขนาดอนุภาคของเบนโทไนท์มีรูพรุน ดังแสดงในภาพถ่าย SEM (รูปที่ 11) และพื้นผิวของอนุภาคเบนโท ไนท์มีความว่องไว ดังนั้นเมื่อเติมเบนโทไนท์ ในยางธรรมชาติจึงสามารถใช้วัสดุเสริมแรงได้ดี และเมื่อนำ เบนโทไนท์มาดัดแปร โครงสร้างด้วยออกตะโคเดซิลเอมีนใช้เป็นสารตัวเติมในน้ำยางธรรมชาติ ใน ระหว่างการผสมน้ำยางธรรมชาติกับเบนโทไนท์ ดัดแปร โครงสร้าง มีข้อจำกัดเมื่อเติมเบนโทไนท์ดัดแปร โครงสร้างมากกว่า 5 phr เกิดการจับตัวเป็นก้อนอาจเนื่องจากการเสถียรภาพของน้ำยางธรรมชาติ จาก ผลการทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึงจากรูปที่ 17 พบว่าค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100 300 และ 500% และค่า ความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติทั้งที่เติมและไม่เติมเบน

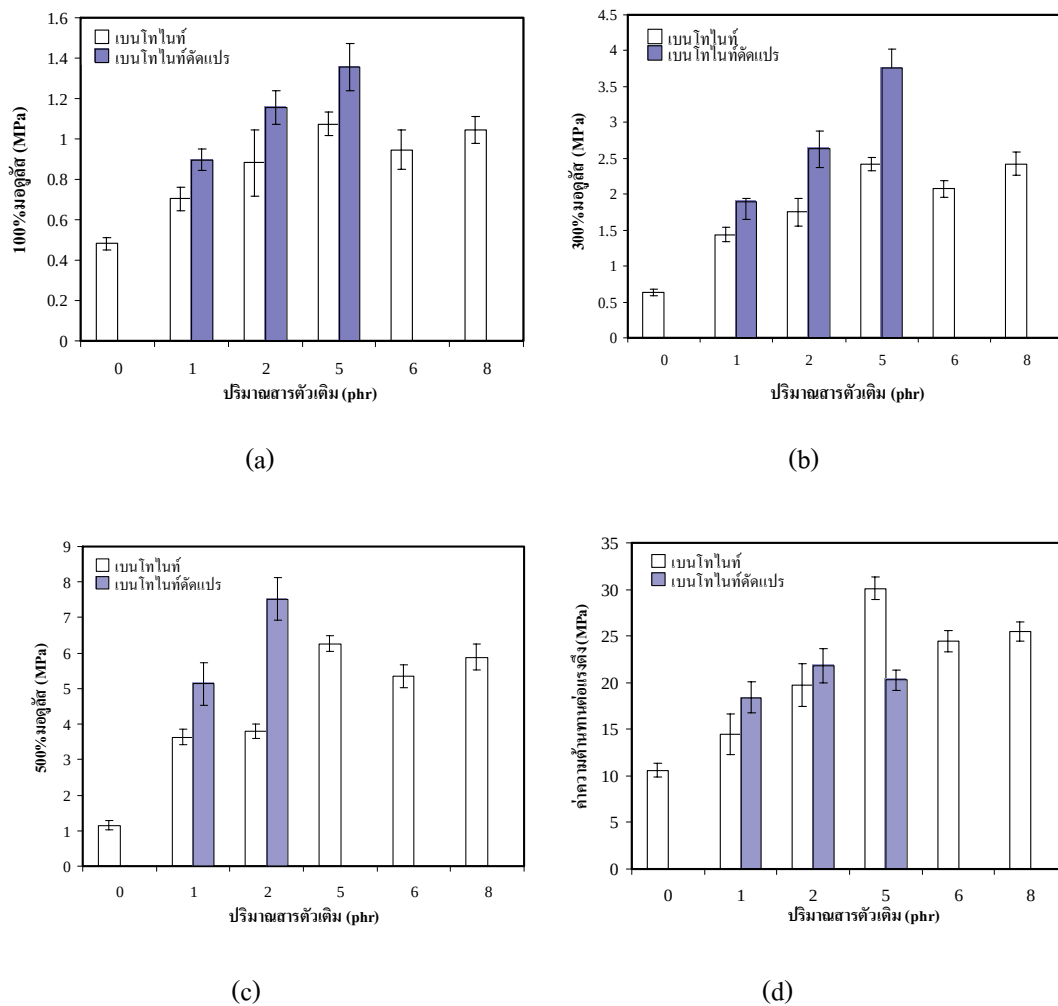
โทไนท์ โดยเห็นได้ชัดเจนเมื่อเติมที่เบนโทไนท์ คัดแปรโครงสร้างในปริมาณ 5 ส่วนในเนื้อยาง 100 ส่วน ค่ามอดูลัสของระยะยืด 100 300 และ 500% เพิ่มขึ้นประมาณ 30 และ 50% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับยางธรรมชาติที่เติมเบนโทไนท์ที่ไม่ได้คัดแปรโครงสร้าง การกระจายของชั้นซิลิเกตในยางบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของการเสริมแรงซึ่งนำไปสู่การเพิ่มความเหนียว ชั้นของซิลิเกตอาจจะทำให้เกิดขึ้นของวัฏภาคพอลิเมอร์ที่ไม่เคลื่อนที่หรือเคลื่อนที่บางส่วน ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่การเรียงตัวของชั้นซิลิเกตนั้นมีผลต่อการเสริมแรงที่ปรากฏ อย่างไรก็ตามพบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงและระยะยืดที่จุดขาดลดลงอย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับวัสดุเชิงประกอบที่เติมเบนโทไนท์ที่ไม่ได้คัดแปรโครงสร้าง ดังนั้นจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารตัวเติม โดยทั่วไปการเติมสารตัวเติมชนิดแข็งในวัสดุพอลิเมอร์ เป็นสาเหตุทำให้ค่าระยะยืดที่จุดขาดลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ในการศึกษาครั้งนี้ลดลงประมาณ 50% เมื่อเติมปริมาณเบนโทไนท์ 8 phr

ตารางที่ 7 สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางธรรมชาติกับเบนโทไนท์

ปริมาณเบนโทไนท์ (phr)	100% มอดูลัส (MPa)	300% มอดูลัส (MPa)	500% มอดูลัส (MPa)	ความต้านทานต่อแรงดึง (MPa)
0	0.482	0.632	1.150	6.77
1	0.703	1.440	3.631	14.4
2	0.883	1.750	3.789	19.8
5	1.075	2.415	6.267	30.1
6	0.946	2.075	5.356	24.5
8	1.045	2.426	5.883	25.5

ตารางที่ 8 สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางธรรมชาติกับเบนโทไนท์ที่คัดแปรโครงสร้าง

ปริมาณเบนโทไนท์ที่คัดแปร (phr)	100% มอดูลัส (MPa)	300% มอดูลัส (MPa)	500% มอดูลัส (MPa)	ความต้านทานต่อแรงดึง (MPa)
0	0.482	0.630	1.150	6.770
1	0.897	1.896	5.130	18.412
2	1.154	2.635	7.519	21.824
5	1.357	3.757	-	20.292



รูปที่ 17 สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางกับเบนโทไนท์ (□) และ เบนโทไนท์ที่ดัดแปร (■) (a) 100 % มอดูลัส (b) 300 % มอดูลัส (c) 500 % มอดูลัส และ (d) ค่าความต้านทานต่อแรงดึง

ผลของการเติมยางธรรมชาติพอกไซค์

การศึกษานี้ได้พยายามการปรับปรุงการเข้ากันได้ระหว่างยางธรรมชาติกับเบนโทไนท์ทั้งก่อนและหลังดัดแปรโครงสร้าง โดยการใช้ยางธรรมชาติพอกไซค์เป็นสารช่วยผสม ผลการทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึงยืดของวัสดุเชิงประกอบที่มีการเติมสารช่วยผสมแสดงในตารางที่ 9 และรูปที่ 18

เมื่อเปรียบเทียบผลของสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเบนโทไนท์ (5 phr) และใช้ยางธรรมชาติพอกไซค์เป็นสารช่วยผสมในปริมาณ 2 5 และ 10 phr (รูปที่ 18) พบว่าค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100 และ 300% เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเติมยางธรรมชาติพอกไซค์ 2 และ 5 phr แต่เมื่อเติมยางธรรมชาติพอกไซค์ 10 phr พบว่าค่ามอดูลัสลดลง เมื่อพิจารณาผลของสมบัติการทนต่อแรงดึงยืดของวัสดุคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเบนโทไนท์ที่ดัดแปรโครงสร้างและเติมยางธรรมชาติพอกไซค์เป็นสารช่วยผสม จากตารางที่ 10 แสดงให้เห็นว่าค่ามอดูลัสของวัสดุคอมโพสิตที่เติมยางธรรมชาติพอกไซค์

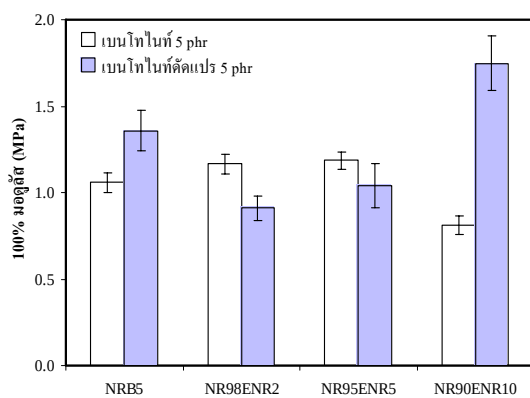
ลดลงอย่างเห็นได้ชัดที่ปริมาณการเติมยางธรรมชาติพอกไซค์ 2 และ 5 phr เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่เติมยางธรรมชาติพอกไซค์ แต่เมื่อเติมยางธรรมชาติพอกไซค์ 10 phr พบว่าค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด การปรับปรุงนี้อาจเกิดขึ้นเนื่องจากเมื่อเติมปริมาณยางธรรมชาติพอกไซค์มากขึ้น ทำให้มีปริมาณวงอิพอกไซค์เพิ่มมากขึ้น ส่งผลช่วยทำให้ปรับปรุงอันตรกิริยากายภาพ เนื่องจากยางธรรมชาติพอกไซค์มีวงอิพอกไซค์ซึ่งอาจเกิดพันธะไฮโดรเจนกับไฮดรอกซิลในชั้นซลิเกตของเบนโทไนท์ และในขณะที่วงอิพอกไซค์สามารถแทรกเข้าไปในชั้นซลิเกตเกิดในลักษณะ interlocking ระหว่างเบนโทไนท์กับยางธรรมชาติพอกไซค์ ส่งผลทำให้ยางธรรมชาติพอกไซค์ เป็นตัวช่วยประสานการเข้ากันได้ของเบนโทไนท์กับยางธรรมชาติ

ตารางที่ 9 สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางธรรมชาติ (NR) กับเบนโทไนท์ (B) 5 phr โดยใช้ยางธรรมชาติพอกไซค์ (ENR 20%) เป็นสารช่วยผสม

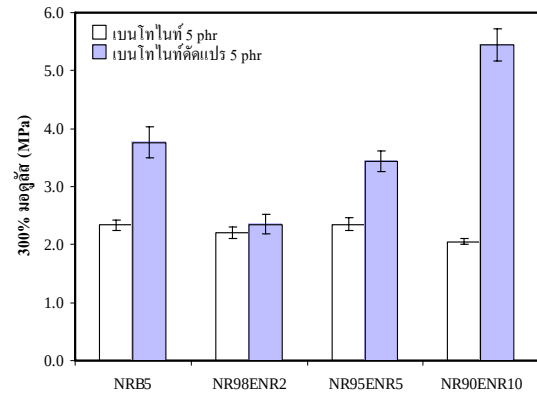
ส่วนประกอบ	100% มอดูลัส (MPa)	300% มอดูลัส (MPa)	500% มอดูลัส (MPa)	ความต้านทานต่อ แรงดึง (MPa)
NR/B5	1.058	2.335	5.65	30.1
NR98/ENR2/B5	1.165	2.206	5.03	27.6
NR95/ENR5/B5	1.185	2.352	5.46	33.3
NR90/ENR10/B5	0.812	2.054	5.68	23.1

ตารางที่ 10 สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางธรรมชาติ (NR) กับเบนโทไนท์ คัดแปรโครงสร้าง (MB) 5 phr โดยใช้ยางธรรมชาติพอกไซค์ (ENR 20%) เป็นสารช่วยผสม

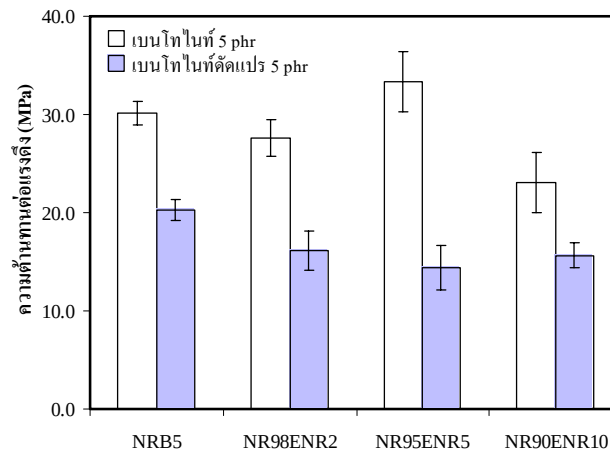
ส่วนประกอบ	100% มอดูลัส (MPa)	300% มอดูลัส (MPa)	500% มอดูลัส (MPa)	ความต้านทานต่อ แรงดึง (MPa)
NR/MB5	1.357	3.757	-	20.29
NR98/ENR2/MB5	0.911	2.351	-	16.13
NR95/ENR5/MB5	1.040	3.433	-	14.43
NR90/ENR10/MB5	1.748	5.443	-	15.65



(a)



(b)



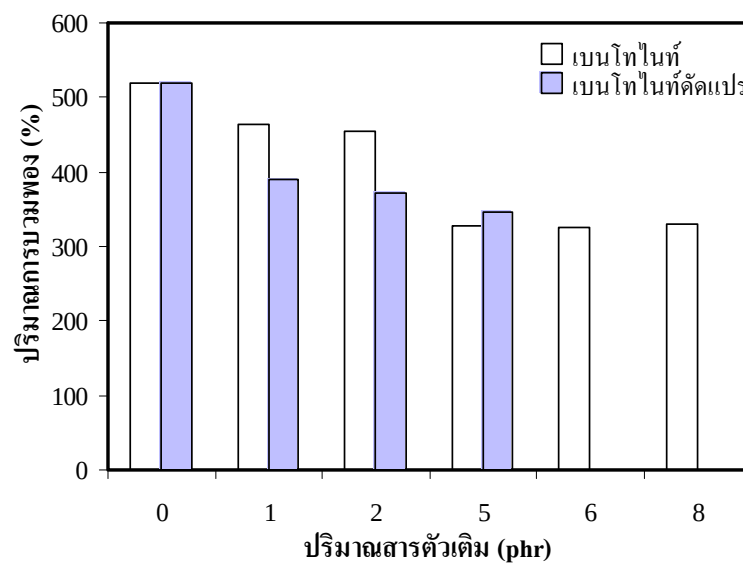
(c)

รูปที่ 18 สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางกับเบนโทไนท์ (□) และ เบนโทไนท์ดัดแปรโครงสร้าง (■) ที่ปริมาณ 5 phr โดยใช้ยางธรรมชาติพอกไซค์ปริมาณ 2 5 และ 10 phr เป็นสารช่วยผสม : (a) 100 % มอดูลัส (b) 300 % มอดูลัส และ (c) ค่าความต้านทานต่อแรงดึง

5.3.2 ทดสอบการบวมพอง

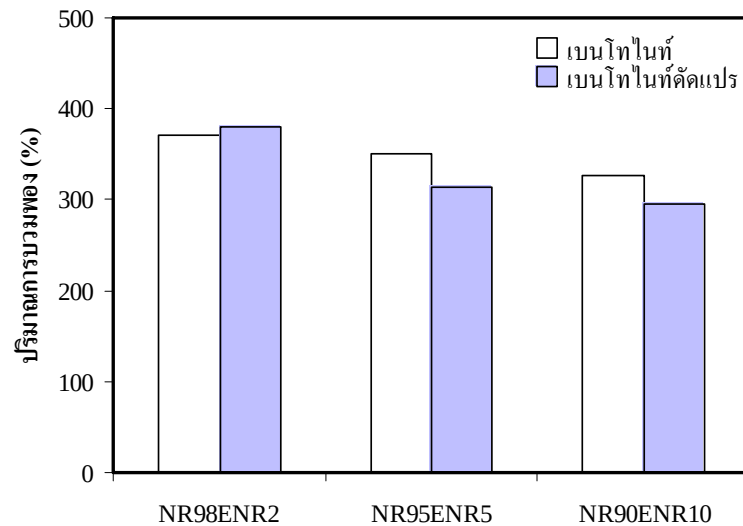
ผลการทดสอบการบวมพองของวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางคอมปาวด์ที่เติมเบนโทไนท์ทั้งก่อน และหลังดัดแปรโครงสร้าง ดังรูปที่ 19 จากผลการทดสอบการบวมพองในโทลูอีน พบว่ายางธรรมชาติมีการบวมพอง 520% ยางธรรมชาติที่เติมดินเบนโทไนท์แนวโน้มเปอร์เซ็นต์การบวมพองลดลงอย่างชัดเจนตามปริมาณเบนโทไนท์ โดยเฉพาะในวัสดุเชิงประกอบที่เติมเบนโทไนท์ 8 phr พบว่าร้อยละการบวมพองลดลงเป็น 330% เมื่อเทียบกับยางวัลคาไนซ์ (520%) เป็นผลเนื่องจากเบนโทไนท์เป็นแร่อนินทรีย์ ซึ่งทนต่อตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วได้ดีเยี่ยม ดังนั้นเมื่อเติมเบนโทไนท์ในยางธรรมชาติซึ่งเป็นสารประกอบ

ไฮโดรคาร์บอนมีผลทำให้วัสดุเชิงประกอบที่ได้ทนต่อทำลายได้มากขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบปริมาณการบวมพองของวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางที่เติมเบนโทไนท์กับดินขาวเกลิน (รูปที่ 15) พบว่าร้อยละการบวมพองของวัสดุเชิงประกอบที่มีเบนโทไนท์มีค่าลดลงมากกว่าดินขาวเกลิน จากผลการทดลองแสดงว่าการเติมเบนโทไนท์ไม่ได้มีผลกระทบต่อระบบการเชื่อมโยงสายโซ่ของยางธรรมชาติเช่นเดียวกับดินขาวเกลิน เมื่อพิจารณาผลของการบวมพองของวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางคอมปาวด์ที่เติมเบนโทไนท์ตัดแปรโครงสร้างด้วยออกตะโคเคซิลเอมีน พบว่า ปริมาณการบวมพองมีแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อยตามปริมาณเบนโทไนท์ที่ตัดแปร แต่เมื่อเติม 5 phr ค่าการบวมพองลดลงใกล้เคียงกับวัสดุเชิงประกอบที่เติมเบนโทไนท์ที่ไม่ได้ตัดแปร โครงสร้าง ซึ่งผลการทดลองที่เกิดขึ้นเป็นไปในลักษณะเดียวกับกรณีเติมดินขาวเกลิน



รูปที่ 19 ปริมาณการบวมพองของวัสดุคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติกับเบนโทไนท์ทั้งก่อนและหลังตัดแปรโครงสร้าง

เมื่อเปรียบเทียบผลของการบวมพองของวัสดุคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเบนโทไนท์ทั้งก่อนและหลังตัดแปรโครงสร้าง โดยใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นสารช่วยผสมดังรูปที่ 20 พบว่าปริมาณการบวมพองลดลง โดยขึ้นอยู่กับปริมาณยางธรรมชาติอีพอกไซด์ ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบดีที่สุดเมื่อเติมยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 10 phr ทั้งนี้เนื่องจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์ปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างยางธรรมชาติกับเบนโทไนท์ ทำให้การบวมพองของโพลิเมอร์ลดลง



รูปที่ 20 ปริมาณการบวมพองของวัสดุคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติกับเบนโทไนท์ทั้งก่อนและหลังดัดแปรโครงสร้าง โดยใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (20% อีพอกซิเดชัน) เป็นสารช่วยผสมโดยแปรปริมาณ 2 5 และ 10 phr

5.4 วัสดุเชิงประกอบที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนต

5.4.1 สมบัติการต้านทานต่อแรงดึง

ในงานวิจัยนี้ได้นำแคลเซียมคาร์บอเนตที่เตรียมได้จากเปลือกหอย ใช้เป็นสารตัวเติมในวัสดุยางธรรมชาติ โดยนำมาเปรียบเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้า เมื่อนำมาทดสอบการทนต่อแรงดึงผลที่ได้แสดงตารางที่ 11 และรูปที่ 21

จากรูปที่ 21(a) แสดงค่า 100 % มอดูลัสของยางคอมปาวด์ที่แปรปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากเปลือกหอยและทางการค้า พบว่าค่า 100 % มอดูลัสของวัสดุเชิงประกอบที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้มาจากการเผาเปลือกหอย มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น แต่ในทางกลับกันวัสดุเชิงประกอบที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้า พบว่า ค่า 100 % มอดูลัส ไม่ได้เปลี่ยนแปลงมากนัก เมื่อพิจารณาค่า 300 % มอดูลัสดังแสดงในรูปที่ 21 (b) มีแนวโน้มในลักษณะเดียวกับค่า 100 % มอดูลัส นั่นคือวัสดุเชิงประกอบที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการเผาเปลือกหอย เมื่อปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น ค่าจะมีแนวโน้มลดลง แต่ในทางกลับกันวัสดุเชิงประกอบที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้า เมื่อปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น ค่ามอดูลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย สำหรับค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงของวัสดุเชิงประกอบที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการเผาเปลือกหอยมีทิศทางเดียวกับค่า 100 และ 300 % มอดูลัส แต่วัสดุเชิงประกอบที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้าเมื่อเติมถึง 10.0 phr จะมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงที่สุด และเมื่อเติมมากกว่า 10 phr พบว่าจะลดลง จากผลที่ได้จากการทดสอบการทนต่อแรงดึง ดังแสดงในรูปที่ 21 จะเห็นว่าเมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการเผาเปลือกหอยปริมาณเพิ่มขึ้น พบว่าค่ามอดูลัสลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลจาก SEM (รูปที่ 12) ที่วิเคราะห์ขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งมีขนาดใหญ่และการกระจาย

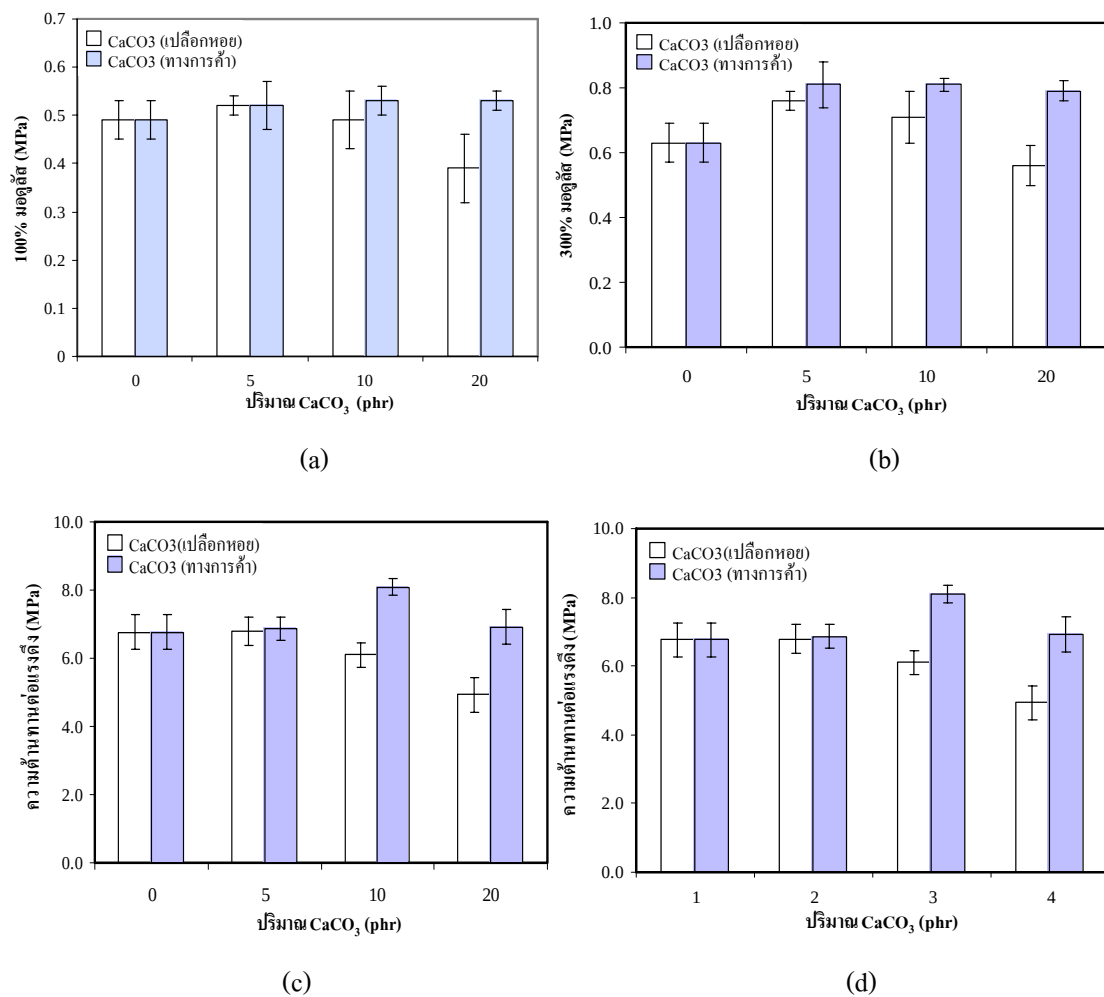
ตัวของอนุภาคไม่สม่ำเสมอ มีผลทำให้แคลเซียมคาร์บอเนตกระจายตัวในเนื้อยางได้ไม่ดี ดังนั้นจึงไม่ได้ช่วยเสริมแรงในวัสดุยาง แต่สำหรับวัสดุเชิงประกอบที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้า พบว่าค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

ตารางที่ 11 สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางธรรมชาติกับแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการเผาเปลือกหอย

ปริมาณ (phr)	100% มอดูลัส (MPa)	300% มอดูลัส (MPa)	500% มอดูลัส (MPa)	ความต้านทานต่อแรงดึง (MPa)
0	0.49	0.63	1.15	6.77
5	0.52	0.76	1.24	6.79
10	0.49	0.71	1.19	6.10
20	0.45	0.56	1.08	4.93

ตารางที่ 12 สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางธรรมชาติกับแคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้า

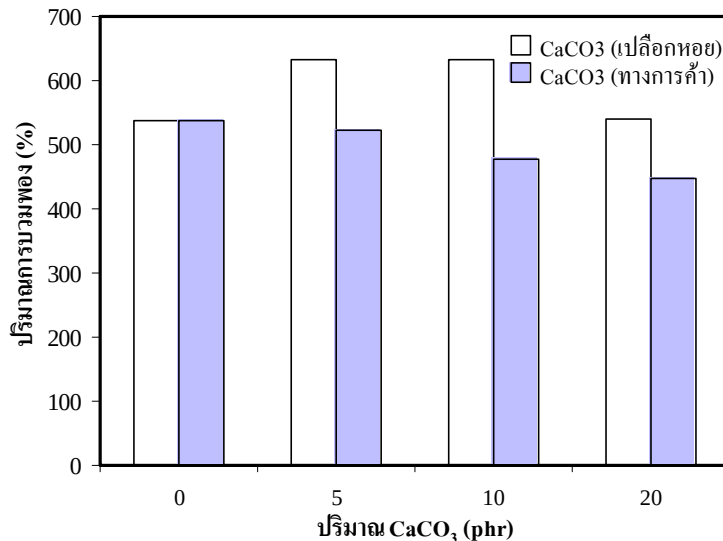
ปริมาณ (phr)	100% มอดูลัส (MPa)	300% มอดูลัส (MPa)	500% มอดูลัส (MPa)	ความต้านทานต่อแรงดึง (MPa)
0	0.49	0.63	1.15	6.77
5	0.52	0.81	1.39	6.86
10	0.53	0.81	1.45	8.09
20	0.53	0.79	1.32	6.92



รูปที่ 21 สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางกับแคลเซียมคาร์บอเนต
เตรียมจากเปลือกหอย (□) และทางการค้า (■): (a) 100% มอดูลัส (b) 300% มอดูลัส
(c) 500% มอดูลัส และ (d) ค่าความต้านทานต่อแรงดึง

5.4.2 ทดสอบการบวมพอง

การบวมพองของวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางคอมปาวด์ที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตทั้งที่ได้จากการเผาเปลือกหอยและทางการค้า แสดงดังรูปที่ 22 จากรูปพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตทั้งที่ได้จากการเผาเปลือกหอยและทางการค้า ผลที่ได้จากการศึกษาการบวมพองมีผลไปในทิศทางเดียวกัน นั่นคือเมื่อเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต การบวมพองจะมีค่าลดลง และวัสดุเชิงประกอบที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้ามีการบวมพองน้อยกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการเผาเปลือกหอย เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการเผาเปลือกหอยมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอและอนุภาคมีขนาดใหญ่ ยืนยันได้จากผล SEM ซึ่งส่งผลต่อการทนต่อตัวทำละลายทำให้ตัวทำละลายสามารถแทรกเข้าไปได้ง่าย การบวมพองจึงเกิดได้มากขึ้น



รูปที่ 22 ปริมาณการบวมพองของวัสดุคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติกับแคลเซียมคาร์บอเนต
เตรียมจากเปลือกหอย (□) และทางการค้า (■)

6. สรุปผลการวิจัย

จากการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางธรรมชาติและสารตัวเติม ซึ่งสารตัวเติมที่ใช้มี 3 ชนิด คือ ดินขาวเกาลิน เบนโทไนท์ทั้งก่อนและหลังดัดแปร โครงสร้างโดยใช้การแลกเปลี่ยนไอออนด้วยออกตะโดเดซิลเอมีน และแคลเซียมคาร์บอเนตทั้งที่ได้จากการเผาเปลือกหอยและทางการค้า ได้ข้อสรุปแสดงดังตามลำดับดังนี้

1. ผลจากการตรวจวิเคราะห์ลักษณะของสารตัวเติม โดยใช้เทคนิค FT-IR และ SEM ผลการตรวจพิสูจน์ลักษณะโครงสร้างเคมีของสารตัวเติมก่อนและหลังดัดแปรโครงสร้างโดยใช้ FT-IR ปรากฏสัญญาณการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของออกตะโดเดซิลเอมีน เมื่อศึกษาลักษณะและขนาดของอนุภาคของสารตัวเติมด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าดินขาวเกาลินและเบนโทไนท์ทั้งก่อนและหลังดัดแปรโครงสร้างมีลักษณะแตกต่างกัน โดยที่หลังดัดแปรโครงสร้างพบว่ามีขนาดอนุภาคเล็กลงและมีการกระจายสม่ำเสมอมากขึ้น

2. ผลการทดสอบการทนต่อแรงดึงยืดของวัสดุเชิงประกอบที่เติมดินขาวเกาลินธรรมชาติ ปรากฏผลไม่ได้ช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ แต่เมื่อดัดแปรโครงสร้างสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุที่ช่วยเสริมความต้านทานต่อแรงดึงให้กับยางธรรมชาติได้ จากผลการทดสอบให้ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100 300 และ 500% และความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารตัวเติม ในส่วนของการเสริมแรงยางโดยใช้เบนโทไนท์ทั้งก่อนและหลังดัดแปร ให้ผลการทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นตามปริมาณของที่เติมในคอมโพสิต

3. เมื่อใช้ยางธรรมชาติพอกไซค์เป็นสารช่วยผสม ปริมาณที่เหมาะสม คือ 2 และ 10 phr ในกรณีที่ใช้เกาลินและเบนโทไนท์ ตามลำดับ สำหรับวัสดุเชิงประกอบที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการเผา

เปลือกหอยมีค่าสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกับที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้า เมื่อเติมปริมาณสูงขึ้นค่ามอดูลัสมีแนวโน้มลดลง เมื่อศึกษาการปริมาณการบวมพองของวัสดุเชิงประกอบที่เติมดินขาวเกาลินและเบนโทไนท์ทั้งก่อนและหลังการตัดแปรรูปโครงสร้าง พบว่าปริมาณการบวมพองลดลงตามปริมาณสารตัวเติม สำหรับวัสดุเชิงประกอบที่ใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมการบวมพองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

7. ข้อเสนอแนะที่คาดว่าควรวิจัยเพิ่มเติม และวิธีการที่ควรพัฒนาต่อยอดสู่ภาคปฏิบัติจริง

(ก) พิจารณาเลือกใช้สารอินทรีย์แลกเปลี่ยนไอออนชนิดอื่น ที่มีจำนวนไฮโดรคาร์บอนเพิ่มขึ้น เพื่อศึกษาลักษณะการแลกเปลี่ยนไอออนภายในชั้นซิลิเกตของดินขาวเกาลินและเบนโทไนท์ เพื่อช่วยเสริมแรงในยางธรรมชาติ

(ข) การใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติม ควรมีการร่อนแยกขนาดเพื่อให้ได้ขนาดที่เหมาะสมในการนำไปใช้งาน

(ค) ทดสอบสมบัติเกี่ยวกับอายุการใช้ของวัสดุเชิงประกอบที่ได้

(ง) ประยุกต์ใช้ในการผลิตภัณฑ์ในการเตรียมถุงมือยาง

8. เอกสารอ้างอิง

- Arroyo, M., Lopez-Manchado, M.A. and Herrero, B. 2003. Organo-montmorillonite as substitute of carbon black in natural rubber compounds. *Polymer*. 44 : 2447-2453.
- Huang, J.T. and Dai, J.C. 1999 Surface modification of clays and clay-rubber composite. *Applied Clay Science*. 15 : 51-65.
- Xu, Y., Brittain, W.J., Xue, C. and Eby, R.K. 2004. Effect of clay type on morphology and thermal stability of PMMA-clay nanocomposites prepared by heterocoagulation method. *Polymer*. 45 : 3735-3746.
- Sharif, J., Wan Yunus, W.M.Z., Zaman Hj, K. and Dahlan, M. 2005. Preparation and properties of radiation crosslinked natural rubber/clay nanocomposites. *Polymer testing* 24 : 211-217.
- Varghese, S. and Karger-Kocsis, J. 2003. Natural rubber-based nanocomposites by latex compounding with layered silicates. *Polymer* 44 : 4921-4927.
- Teh, P.L., Mohd Ishak, Z.A., Hashim, A.S., Karger-kocsis, J. and Ishiaku, U.S. 2004. Effects of epoxidized natural rubber as a compatibilizer in melt compounded natural rubber-organoclay nanocomposites. *Eur. Polym. J.* 40 : 2513-2521.
- พรพรรณ นิธิอุทัย. 2528. สารเคมีสำหรับยาง. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.

ภาคผนวก

คำชี้แจงของนักวิจัยต่อข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ

ข้อคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิ	คำชี้แจงของนักวิจัย
1. ควรมีข้อมูลประมาณราคาของปูนขาวเปรียบเทียบระหว่างปูนขาวทางการค้าและปูนขาวที่ได้โดยการเตรียมขึ้นเอง	1. ได้เพิ่มเติมข้อมูลราคาปูนขาวทางการค้า บาท/กิโลกรัม ในขณะที่เตรียมเองประมาณ 2 บาท/กิโลกรัม
2. ควรเพิ่มเติมข้อมูลเกี่ยวกับอายุการใช้งานของน้ำยาง compound ที่เตรียมได้	2. ได้เพิ่มเติมแล้วในส่วนการเตรียมน้ำยางคอมปาวด์
3. ในการทดลองใช้ epoxided NR เป็นสารช่วยผสมนั้น ควรสรุปข้อได้เปรียบ-เสียเปรียบด้านราคาไว้ด้วย	3. ได้เพิ่มเติมไว้ในบทสรุปอยู่ในภาคผนวก
4. การสรุปผลเปรียบเทียบหากทำเป็นตารางได้น่าจะทำให้ผู้อ่านเข้าใจได้ง่ายขึ้น	4. ได้สรุปผลเป็นข้อๆ เนื่องจากเป็นตารางรวบรวมได้ยาก
5. หน้า 14 ย่อหน้าแรกที่กล่าวว่าน้ำยางธรรมชาติอพอคไซค์เป็นสารช่วยผสมนั้น ต้อง stabilize หรือไม่ น้ำยางที่ได้มี DRC/TSC เท่าไหร่	5. ได้ระบุเพิ่มเติม “น้ำยางธรรมชาติอพอคไซค์ที่มีเนื้อยางแห้งร้อยละ 25 ซึ่งทำให้เสถียรด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดไอออนลบ (polyethylene oxide, terric 16A16)”
6. ควรหาเหตุผลมาอธิบายว่าทำไม ENR (ในรูปน้ำยาง) สามารถช่วยให้ NR Latex และ Filler มีแรงยึดเกาะที่ดีขึ้น	6. ได้อธิบายเพิ่มเติม “การปรับปรุงนี้อาจเกิดขึ้นเนื่องจากเมื่อเติมปริมาณยางธรรมชาติอพอคไซค์มากขึ้น ทำให้มีปริมาณงอพอคไซค์เพิ่มมากขึ้น ส่งผลช่วยให้ปรับปรุงอันตรกิริยากายภาพ เนื่องจากยางธรรมชาติอพอคไซค์มีวงอพอคไซค์ซึ่งอาจเกิดพันธะไฮโดรเจนกับไฮดรอกซิลในชั้นซิลิเกตของเบนโทไนท์ และในขณะเดียวกันงอพอคไซค์สามารถแทรกเข้าไปในชั้นซิลิเกตเกิดในลักษณะ interlocking ระหว่างเบนโทไนท์กับยางธรรมชาติอพอคไซค์ ส่งผลทำให้ยางธรรมชาติอพอคไซค์ เป็นตัวช่วยประสานการเข้ากันได้ของเบนโทไนท์กับยางธรรมชาติ”