



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ
กับพอลิสไตรีนโดยใช้เบนทอไนท์เป็นตัว
เติมในสถานะลาเทกซ์

โดย ดร.จรีรัตน์ รามเจริญและคณะ

เดือนมิถุนายน ปีพ.ศ.2551

สัญญาเลขที่ RDG5050058

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ
กับพอลิไตรีนโดยใช้เบนทอไนท์เป็นตัว
เติมในสถานะลาเทกซ์

คณะผู้วิจัย

สังกัด

1. ดร.จรีรัตน์ รวมเจริญ

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

2. ดร.เสาวภา โชติสุวรรณ

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

3. นางสาวยุดาทิพย์ จารุพร

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชุดโครงการวิจัยขนาดเล็ก เรื่องยางพารา

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

สารบัญ

	หน้า
บทสรุปรายงานสำหรับผู้บริหาร	ii
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	v
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	vi
ความสำคัญและความเป็นมาของการวิจัย	1
วัตถุประสงค์	1
ทฤษฎี แนวคิดในการวิจัย และผลงานที่เกี่ยวข้อง	1
วิธีการ	10
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล	13
สรุปผล	34
ข้อเสนอแนะ	35
เอกสารอ้างอิง	35

บทสรุปรายงานสำหรับผู้บริหาร

ชื่อโครงการ การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีน โดยใช้เบนทอไนท์เป็นสารตัวเติมในสถานะลาเท็กซ์

Preparation of Polymer Blend between Natural Rubber and Polystyrene with Bentonite as a Filler in Latex Stage

ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานสังกัด และที่อยู่

ชื่อ-สกุล ดร.จรีรัตน์ รวมเจริญ

หน่วยงาน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ที่อยู่ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
วิทยาเขตปัตตานี ต.รูสะมิแล อ.เมือง จ.ปัตตานี 94000

โทรศัพท์/โทรสาร 073-313930-50 ต่อ 1845 **E-mail address** : sjareera@bunga.pn.psu.ac.th

ผู้ร่วมวิจัย/นักศึกษา ดร.เสาวภา โชติสุวรรณ

นางสาวยุดาทิพย์ จารุพร

งบประมาณทั้งโครงการ 102,000 บาท

ระยะเวลาดำเนินการ 9 เดือน (ตั้งแต่วันที่ 1 กรกฎาคม 2550 ถึงวันที่ 30 มีนาคม 2551)

ปัญหาที่วิจัยและความสำคัญ

เนื่องจากในปัจจุบันยางธรรมชาติ (natural rubber, NR) มีแนวโน้มราคาเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นจึงมีการลดต้นทุนโดยการเติมสารตัวเติมราคาถูก เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกา เป็นต้น นอกจากนี้การเติมสารตัวเติมยังช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลและความเสถียรต่อความร้อนของยางธรรมชาติ และเป็นแนวทางของการขยายขอบเขตการประยุกต์ใช้งานยางธรรมชาติในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ ได้มากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อนำซิลิกาเติมสังเคราะห์ผสมกับยางธรรมชาติทั้งในสถานะลาเท็กซ์และสถานะหลอมมีผลทำให้สมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพดีขึ้น อีกแนวทางหนึ่งในการขยายขอบเขตการใช้งานคือการเบลนดิงยางธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติกหรือยางสังเคราะห์ชนิดต่างๆ ในงานวิจัยนี้ได้สนใจปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติโดยเบลนดิงกับพอลิสไตรีน (polystyrene, PS) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีในด้านความแข็งแรง ฉนวนไฟฟ้า มีน้ำหนักเบา ราคาถูก และเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถสังเคราะห์ได้ง่ายโดยใช้เทคนิคการเกิดพอลิเมอร์แบบอิมัลชัน (emulsion polymerization) ทำให้สามารถนำมาใช้งานในสถานะลาเท็กซ์ได้โดยตรง ในปัจจุบันจะเห็นได้ว่าการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์โดยพอลิสไตรีนเป็นส่วนหนึ่งของบล็อกที่มีความแข็งแรง และพอลิเมอร์หนึ่งซึ่งมีลักษณะอ่อนนุ่มคล้ายยางเช่น พอลิบิวตะไดอิน (polybutadiene) หรือพอลิไอโซพรีน (polyisoprene) จากโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกันทำให้ทั้งสองบล็อกไม่สามารถรวมเข้ากันได้ในระดับโมเลกุล ดังนั้น จะเกิดการแยกวัฏภาค (phase separation) กัน

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจนำยางธรรมชาติผสมกับพอลิสไตรีนในสถานะลาเท็กซ์ในระบบที่มีการเชื่อมข้ามระหว่างโมเลกุลของยางธรรมชาติด้วยกัมมะถันและใช้เบนทอไนท์เป็นสารตัวเติม เพื่อปรับปรุง

สมบัติเชิงกลและทางกายภาพของยางธรรมชาติ และเป็นแนวทางในการพัฒนาวัสดุพอลิเมอร์ชนิดใหม่จากยางธรรมชาติ เพื่อเพิ่มมูลค่าทางพารา

วัตถุประสงค์

เพื่อเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีนในสภาวะลาเท็กซ์โดยใช้เบนทอไนท์เป็นสารตัวเติม

ผลการดำเนินงาน

ผลจากการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ (NR) กับพอลิสไตรีน (PS) โดยใช้ระบบวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันในสภาวะลาเท็กซ์ โดยแปรปริมาณอัตราส่วน NR/PS (โดยน้ำหนัก) ดังนี้ 90/10 80/20 และ 70/30 ตามลำดับ และปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่าง NR กับ PS โดยใช้เบนทอไนท์และเบนทอไนท์ดัดแปรด้วยออกตะเดซิลแอมโมเนียมไอออน ซึ่งเป็นสารตัวเติมที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสานและเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR กับ PS ผลจากการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม NR/PS และพอลิเมอร์ผสม NR/PS ที่เติมเบนทอไนท์และเบนทอไนท์ดัดแปร พบว่าค่ามอดูลัส และค่าความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ NR และพอลิเมอร์ผสม NR/PS และให้ค่ามอดูลัส และค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดในระบบพอลิเมอร์ผสม NR/PS ในอัตราส่วน 70/30 ที่เติมเบนทอไนท์ 3 ส่วนเมื่อเทียบกับเนื้อยาง 100 ส่วน (phr) ในขณะที่มอดูลัสของพอลิเมอร์ผสม NR/PS ที่เติมเบนทอไนท์ดัดแปร มีแนวโน้มลดลงแต่ยังมีค่าสูงกว่าของยางธรรมชาติ ผลจากการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงฉีกขาด พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงฉีกขาดพอลิเมอร์ผสม NR/PS ที่เติมเบนทอไนท์และเบนทอไนท์ดัดแปรสูงกว่า NR และพอลิเมอร์ผสม NR/PS และมีค่าสูงสุดในกรณีของพอลิเมอร์ผสม NR/PS ในอัตราส่วน 80/20 ที่เติมเบนทอไนท์ 3 phr (120 kN/m) ในส่วนผลสมบัติการทนต่อตัวทำละลายของพอลิเมอร์ผสม NR/PS และพอลิเมอร์ผสม NR/PS ที่เติมเบนทอไนท์และเบนทอไนท์ดัดแปร พบว่าค่าร้อยละการบวมพองลดลงเมื่อเทียบกับ NR และพอลิเมอร์ผสม NR/PS แสดงให้เห็นว่าการเติมเบนทอไนท์สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติการทนต่อตัวทำละลายได้เช่นกัน เพื่ออธิบายสมบัติเชิงกลและพฤติกรรมการทนต่อตัวทำละลายของพอลิเมอร์ผสม NR/PS ทั้งกรณีที่ไม่เติมและไม่เติมสารตัวเติม จึงได้ศึกษาโครงสร้างเคมีและโครงสร้างผลึกของเบนทอไนท์ในพอลิเมอร์ผสมด้วยเทคนิค Infrared spectroscopy (FT-IR) และ X-ray diffraction (XRD) โดยผลที่ได้ปรากฏหลักฐาน มีการแทรกสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนบางส่วนในชั้นซิลิกาของเบนทอไนท์ จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด สามารถสังเกตลักษณะพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PS และพอลิเมอร์ผสม NR/PS ที่เติมเบนทอไนท์และเบนทอไนท์ดัดแปร โดยพบว่าในพอลิเมอร์ผสมที่เติมเบนทอไนท์และเบนทอไนท์ดัดแปรมีขนาดอนุภาคของ PS ที่กระจายในเนื้อเยื่อเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมสารตัวเติม ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเบนทอไนท์สามารถทำหน้าที่เป็นตัวช่วยประสานให้ PS กระจายตัวในวัฏภาคของ NR ได้ดีขึ้น

สรุปผลการวิจัย

ผลจากการศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิสไตรีนและยางธรรมชาติโดยใช้ระบบวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันในสถานะลาเท็กซ์และใช้เบนทอไนท์และเบนทอไนท์ดัดแปรเป็นสารตัวเติม พบว่าค่ามอดูลัสและความต้านทานต่อแรงฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสม NR/PS ที่เติมเบนทอไนท์ปริมาณ 3 ส่วนในเนื้อยาง 100 ส่วน มีค่าสูงมากกว่า NR และพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมเบนทอไนท์ (NR/PS) ผลของการทนต่อตัวทำละลายจะได้ว่าพอลิเมอร์เบสค์ที่เติมเบนทอไนท์ มีค่าร้อยละการบวมพองลดลงเมื่อเติมเบนทอไนท์ลงในพอลิเมอร์ผสม NR/PS ในทุกอัตราส่วน และผลจากการศึกษาด้วยกล้อง SEM พบว่าเบนทอไนท์สามารถเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์ผสม และทำหน้าที่เป็นตัวช่วยประสานให้ PS กระจายในยางธรรมชาติได้ดีขึ้น

ข้อเสนอแนะที่คาดว่าจะควรวิจัยเพิ่มเติม และวิธีการที่ควรพัฒนาต่อยอดสู่ภาคปฏิบัติจริง

1. ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR และ PS โดยใช้ระบบวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันและใช้เบนทอไนท์เป็นสารตัวเติมในสถานะลาเท็กซ์ในระดับอุตสาหกรรม
2. ศึกษาเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR และ PS โดยใช้เบนทอไนท์เป็นสารตัวเติมในสถานะหลอม
3. ศึกษาแนวทางในการผลิตผลิตภัณฑ์โฟมยาง เช่นเบาะรองนั่ง พรมปูพื้น วัสดุกันกระแทก ผลิตภัณฑ์หล่อเบ้า เช่นหุ่นจำลอง เป็นต้น

ผลงานทางวิชาการที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

1. จากการผลการวิจัยทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัณฐานวิทยากับสมบัติเชิงกลของวัสดุที่เตรียมได้และอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นในพอลิเมอร์ผสม เพื่อเป็นพื้นฐานในการเข้าใจถึงพฤติกรรมและสมบัติของวัสดุ
2. งานวิจัยนี้คาดว่าจะนำเสนอเผยแพร่โดยนำเสนอในงานวิชาการระดับนานาชาติ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ (NR) กับพอลิสไตรีน (PS) ในสถานะลาเทกซ์โดยแปรอัตราส่วน (โดยน้ำหนัก) 90/10 80/20 และ 70/30 ตามลำดับ โดยใช้เบนทอไนท์และเบนทอไนท์ดัดแปรเป็นสารสารตัวเติม ผลจากทดสอบสมบัติการต้านทานต่อแรงดึง พบว่าค่ามอดูลัสของพอลิเมอร์ผสมที่เติมเบนทอไนท์เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ NR และพอลิเมอร์ผสม NR/PS และมีค่าสูงที่สุดในระบบพอลิเมอร์ผสม NR/PS ในอัตราส่วน 70/30 ที่เติมเบนทอไนท์ 3 ส่วนเมื่อเทียบกับเนื้อยาง 100 ส่วน (phr) ในทางกลับกันค่ามอดูลัสของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR/PS ที่เติมดินเบนทอไนท์ดัดแปรลดลง ผลของสมบัติความต้านทานต่อแรงฉีกขาด พบว่าความต้านทานต่อแรงฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสมในอัตราส่วน 80/20 ที่เติมดินเบนทอไนท์ 3 phr มีค่าสูงที่สุด ผลจากการศึกษาสมบัติการทนต่อตัวทำละลายของพอลิเมอร์ผสมที่มีเบนทอไนท์และเบนทอไนท์ดัดแปรเป็นสารตัวเติม พบว่ามีค่าร้อยละการบวมพองลดลงเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติและพอลิเมอร์ผสม NR/PS แสดงว่าการเติมเบนทอไนท์สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติการทนต่อตัวทำละลายได้ ผลจากการศึกษาโครงสร้างเคมีและโครงสร้างผลึกของเบนทอไนท์ในพอลิเมอร์พอลิเมอร์ผสม ปรากฏหลักฐานว่ามีสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนเกิดการแทรกเข้าไปในชั้นซิติลิกตของเบนทอไนท์ จากภาพถ่าย SEM สามารถสังเกตลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่เติมเบนทอไนท์ก่อนและหลังดัดแปรโครงสร้างสามารถทำหน้าที่เป็นตัวช่วยประสานให้ PS กระจายตัวใน NR ได้ดีขึ้น

คำสำคัญ

ยางธรรมชาติ พอลิเมอร์ผสม เบนทอไนท์ สมบัติทางกายภาพ

Abstract

The present research is the preparation of polymer blends between natural rubber (NR) and polystyrene (PS) in latex stage with varied composite ratios (by weight) 90/10, 80/20 and 70/30, respectively, using bentonite and modified bentonite as fillers. Tensile modulus shows that composite having 3 phr bentonite content increases when compared with NR and NR/PS blends. It was found that composite NR70/PS30 containing 3 phr of bentonite gives the highest modulus value. On the other hand, the tensile modulus of composite containing 3 phr of modified bentonite is less than that of composite having unmodified form, but the modulus of these composite is higher than that of NR. Tear strength of NR80/PS20 composite containing 3 phr of bentonite is the greatest. It was also found that the toluene resistance of composites with bentonite before and after modification gives higher swelling than natural rubber. The characteristics of crystal and chemical structures of bentonite in the composites give the evident the intercalation of natural rubber and polystyrene between layer silicates of bentonite. SEM photographs show morphology of the composites. These images reveal that the bentonite compatibilize the dispersion of PS in NR matrix.

Keywords

Natural rubber, polymer blend, bentonite, physical properties

1. ความสำคัญและความเป็นมาของการวิจัย

ในปัจจุบันประเทศไทยผลิตยางพาราได้มากเป็นอันดับหนึ่งของโลกต่อเนื่องมาหลายปี แต่อย่างไรก็ตามการนำไปใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ภายในประเทศมีเพียง 10% ของปริมาณทั้งหมด เช่นล้อยางรถ ดุมมือยาง สายพาน ที่นอน หมอน เบาะนั่ง เป็นต้น แต่กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เหล่านั้นในทางอุตสาหกรรมมีการลดต้นทุนในการผลิต โดยการเติมสารตัวเติมที่มีราคาถูกซึ่งได้จากธรรมชาติ เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต เขม่าดำ ซิลิกา เป็นต้น นอกจากนี้การเติมสารตัวเติม (เขม่าดำและซิลิกา) ยังช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลและความเสถียรต่อความร้อนของยางธรรมชาติ และเป็นแนวทางหนึ่งของการขยายขอบเขตการประยุกต์ใช้ยางธรรมชาติในอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ ได้มากขึ้น และมีรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำซิลิกาจากธรรมชาติและซิลิกาสังเคราะห์ผสมกับยางธรรมชาติในสถานะหลอม พบว่ามีผลทำให้สมบัติเชิงกลและทางกายภาพของยางธรรมชาติเพิ่มสูงขึ้น (Arroyo et al., 2003) และมีรายงานผลการใช้เบนทอไนท์และเบนทอไนท์ดัดแปรเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติและพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก พบว่าเบนทอไนท์เป็นสารตัวเติมที่สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้กับยางธรรมชาติและเทอร์โมพลาสติกได้ (Varghese and Karger 2003 และ Lee and Lee 2004) นอกจากนี้ยังมีอีกแนวทางหนึ่งในการประยุกต์ใช้งานยางธรรมชาติคือการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากยางธรรมชาติโดยเบลนด์กับเทอร์โมพลาสติกชนิดต่างๆ (Ismail and Suryadiansyah 2002 และ Mathew et al., 2000) ทำให้ได้วัสดุพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเหมือนทั้งเทอร์โมพลาสติกและยาง ซึ่งสามารถแปรรูปและนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก ในงานวิจัยนี้เลือกใช้พอลิสไตรีนในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติโดยเฉพาะในด้านความแข็งแรง เนื่องจากพอลิสไตรีนเป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีความแข็งแรงสูง มีน้ำหนักเบา ราคาถูก เป็นฉนวนไฟฟ้า และสามารถเตรียมได้ง่ายในสถานะอิมัลชัน

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจนำยางธรรมชาติมาผสมกับพอลิสไตรีนในสถานะลาเท็กซ์ในระบบที่มีการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลของยางธรรมชาติด้วยกำมะถันและใช้เบนทอไนท์เป็นสารตัวเติม ซึ่งเป็นการปรับปรุงสมบัติเชิงกลและทางกายภาพของยางธรรมชาติ เป็นแนวทางในการพัฒนาวัสดุพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากยางธรรมชาติ และที่สำคัญอีกประการหนึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าของยางพารา และศึกษาเรื่องต้นทุนในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมโดยใช้เบนทอไนท์เป็นสารตัวเติม

2. วัตถุประสงค์

เพื่อเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีนในสถานะลาเท็กซ์โดยใช้เบนทอไนท์เป็นสารตัวเติม

3. ทฤษฎี แนวคิดในการวิจัย และผลงานที่เกี่ยวข้อง

3.1 ทฤษฎี

3.1.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber)

ยางธรรมชาติมีโครงสร้างเคมีเป็น ซิส-1,4 พอลิไอโซพรีน (*cis*-1,4-polyisoprene) สูงถึงประมาณ 99% และมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยตามความหนืด (\overline{M}_v) ประมาณ 10^6 ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง

มาก จึงส่งผลทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติเด่นหลายประการ เช่น สมบัติการต้านทานต่อแรงดึง มีความยืดหยุ่นเมื่อแรงภายนอกที่มากระทำ ยางสามารถกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิมได้อย่างรวดเร็ว ความต้านทานต่อการฉีกขาด ทนทานต่อการขีดสีได้ดี และทนต่อสารละลายกรดและด่างเจือจางได้ดี แต่ไม่ทนกรดในตริกและกรดกำมะถันเข้มข้น ยางธรรมชาติมีความกระด้างตัวสูง มีความร้อนสะสมต่ำ ทำให้อย่างธรรมชาติถูกนำมาใช้ทำยางรถบรรทุก ซึ่งต้องรับน้ำหนักสูง และสมบัติการเหนียวติดกับวัสดุอื่นของยางธรรมชาติทำให้สามารถแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่มีหลายชิ้นส่วนประกอบกันได้ เช่น ยางรถยนต์ เป็นต้น แต่ยางธรรมชาติก็มีข้อจำกัดบางประการเช่น มีสมบัติเป็นทั้งพลาสติกและอิลาสติก นั่นคือเมื่อใช้น้ำหนักกดลงไปยางจะเปลี่ยนรูปและไหลได้ และถ้ามีแรงกระทำ เช่น ยึดหรือกดอัด เมื่อเอาแรงออกทำให้วัสดุกลับคืนรูปเดิมแต่ไม่เท่าเดิม จากสมบัติดังกล่าวทำให้ไม่สามารถนำยางไปใช้งานได้โดยตรงจึงต้องทำให้อย่างคงรูปโดยกระบวนการวัลคาไนซ์ ยางธรรมชาติเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว และเสื่อมสภาพได้เร็วภายใต้ออกซิเจน โอโซน แสงแดดและความร้อน เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่ในโครงสร้างของหน่วยไอโซพรีนทำให้องค์ไวต่อปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจนและโอโซนภายใต้สภาวะแสงแดดและความร้อน จากข้อจำกัดที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ดังนั้นการนำยางธรรมชาติมาใช้ประโยชน์จำเป็นต้องมีการผสมยางกับสารเคมีต่างๆ เช่น กำมะถัน สารตัวเร่งหรือสารตัวเติม เพื่อเป็นการปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติให้เหมาะกับการใช้งาน นอกจากนี้ยังมีรายงานวิจัยในการศึกษาการดัดแปรโครงสร้างของยางธรรมชาติโดยกระบวนการทางเคมี (Brosse et al., 2000) เพื่อปรับเปลี่ยนโครงสร้างเคมีทำให้ได้วัสดุชนิดใหม่ที่มีสมบัติเฉพาะทางมากขึ้น

ระบบวัลคาไนเซชัน

จากที่ทราบแล้วว่ายางธรรมชาติมีสมบัติที่ดีเหมาะสำหรับการนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย แต่ยางดิบยังมีข้อจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากมีสมบัติแข็งกลด้าและลักษณะทางกายภาพไม่เสถียร ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ กล่าวคือยางจะอ่อนเềmและเหนียวเหนอะหนะเมื่อร้อน แต่จะแข็งเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำ ด้วยเหตุนี้การใช้ประโยชน์จากยางธรรมชาติจำเป็นต้องมีการผสมยางกับสารเคมีที่ทำให้ยางคงรูป และสารตัวเติมต่าง ๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติให้ดีขึ้น และยังเป็นการลดต้นทุนอีกด้วย สารที่ทำให้ยางคงรูป คือ สารเคมีสำหรับผสมในยางเพื่อทำให้อย่างเกิดการเชื่อมข้ามระหว่างโมเลกุลเป็นโครงสร้างร่างแหขึ้น ทำให้อย่างธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูง แบ่งเป็น 3 ระบบ คือระบบที่ใช้กำมะถัน ไม่ใช่กำมะถัน และระบบที่ใช้ความร้อน

ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงระบบการวัลคาไนซ์ที่ใช้กำมะถัน เป็นระบบคงรูปที่ใช้กับทั้งยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ที่มีพันธะคู่ในโมเลกุล โดยมีกำมะถันเป็นสารวัลคาไนซ์ มีสารตัวเร่งที่นิยมใช้ร่วมกับการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน เช่น ไดไธโอคาร์บาเมต (dithiocarbamate) เป็นตัวเร่งที่ทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ได้เร็วมาก ตัวเร่งประเภทซิงค์ไดไธโอคาร์บาเมต (Zinc salt of dithiocarbamic acid) เป็นตัวเร่งที่สำคัญที่สุด และมีจำหน่ายมากที่สุดในทางการค้า เช่น Zinc-N-diethyl dithiocarbamate (ZDC หรือ ZDEC) สารกระตุ้นคือสารที่ช่วยเสริมให้สารตัวเร่งทำงานอย่างมีประสิทธิภาพสูงขึ้น สารกระตุ้นอาจเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ สารกระตุ้นที่สำคัญและนิยมใช้ คือ ซิงค์ออกไซด์ เมื่อใส่เข้าไปในยางปริมาณเล็กน้อยจะทำให้ยางมีมอดูลัสสูงขึ้น และบางครั้งถ้าไม่มีสารกระตุ้นปฏิกิริยาวัลคาไนซ์อาจไม่เกิดขึ้น

3.1.2 สารตัวเติม

สารตัวเติมมีบทบาทสำคัญมากในอุตสาหกรรมพอลิเมอร์ สารตัวเติมที่ใช้ผสมกับพอลิเมอร์ โดยทั่วไปสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

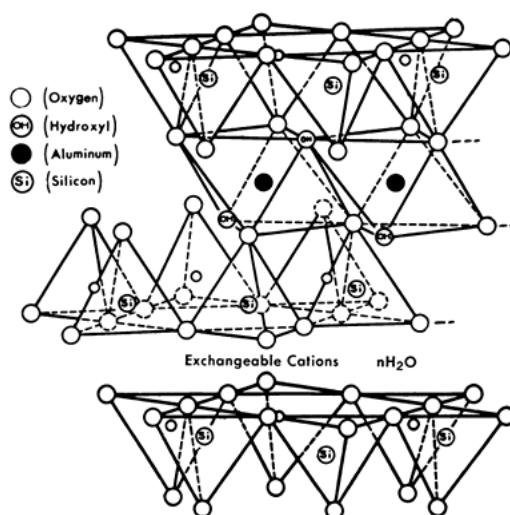
1. สารตัวเติมที่ใช้ในการเสริมแรง มีลักษณะทั้งเป็นเส้นใย และเป็นอนุภาคมีลักษณะเป็นแผ่นทรงกระบอก ส่วนใหญ่อนุภาคจะมีขนาดเล็กประมาณ 180-600 Å เช่น เคลย์ เขม่าดำ เป็นต้น สารตัวเติมเหล่านี้ช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกล

2. สารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง สารตัวเติมประเภทนี้มีราคาถูก มีขนาดอนุภาคมากกว่า 10,000 Å ขึ้นไป เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต แป้งทัลคัม เป็นต้น แต่ในกรณีที่สารตัวเติมบางชนิดมีขนาดอนุภาคปานกลาง เช่น อลูมิเนียมซิลิเกต และ แคลเซียมซิลิเกต ทำให้จัดอยู่ในกลุ่มกึ่งเสริมแรง

โดยทั่วไปสารตัวเติมในยางมีผลทำให้ความแข็งแรงของยางเพิ่มขึ้นและมอดูลัสสูงขึ้นด้วย ส่วนสมบัติอื่นๆ เช่น ความต้านทานต่อการสึกหรอ อาจเพิ่มขึ้นหรือลดลง ขึ้นกับชนิดของยางและสารตัวเติม ได้แก่ ผงเขม่าดำ และ ซิลิกา เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เบนทอไนต์เป็นสารตัวเติมช่วยเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์ และทำหน้าที่เป็นสารช่วยประสานในพอลิเมอร์ผสม

เบนทอไนต์

เบนทอไนต์ เป็นเคลย์ที่ได้จากธรรมชาติ ประกอบด้วย แร่สเมกไทต์ (smectic) เป็นส่วนใหญ่ แร่สเมกไทต์เป็นแร่ธรรมชาติในกลุ่มฟิลาซิลิเกต (phyllosilicate) ในโครงสร้างมีอะลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate) เป็นองค์ประกอบสำคัญ แร่กลุ่มสเมกไทต์เกิดจากการรวมตัวกันของโครงสร้างย่อย ซึ่งมีลักษณะเป็นหน่วย แบบ 3 ชั้น คือ มีไฮดรอกไซด์ออกตะฮีดรอลอยู่ตรงกลาง ($\text{Al}(\text{OH})_3$) ประกอบด้วยชั้นซิลิกา เททระฮีดรอล 2 ชั้น ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างผลึกของเบนทอไนต์ (ที่มา www.kc-eng.co.kr/gi-1.htm)

การที่โครงสร้างของสเมกไทต์ มีชั้นเทพระสัตรอล 2 ชั้นประกบ ชั้นออกตะสัตรอล 1 ชั้นที่อยู่ตรงกลาง ชั้นด้านนอกจึงเป็นชั้นของซิลิกา และไม่มีหมู่ไฮดรอกซิลที่ผิว แต่ละหน่วยของสเมกไทต์ ดึงดูดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์เพียงอย่างเดียว เนื่องจากประจุรวมของโครงสร้างเป็นประจุลบ เพื่อให้ประจุรวมเป็นกลาง จึงมีไอออนบวกภายนอกมาเกาะทั้งบริเวณรอบนอกและภายในระหว่างหน่วยย่อยแต่ละหน่วย ไอออนบวกเหล่านี้สามารถแลกเปลี่ยนหรือแทนที่ได้ เรียกว่า exchangeable cation ไอออนบวกที่พบบ่อยคือ Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} และ H^+ แร่สเมกไทต์เมื่อสัมผัสน้ำจะทำให้เกิดการพองตัว เนื่องจากภายในโครงสร้างสามารถขยายตัวได้มาก จึงนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายในกระบวนการทางเคมีและอุตสาหกรรม นอกจากนี้ยังอาจนำไปใช้ในงานด้านเกษตรกรรม เช่น การเคลือบเมล็ดพืช ใช้ในอุตสาหกรรมยา และอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง หรือใช้เป็นสารดูดกลืนในกระบวนการบำบัดน้ำ

3.1.3 พอลิสไตรีน (Polystyrene)

พอลิสไตรีนเป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก มีลักษณะใสคล้ายแก้ว แข็งแต่เปราะแตกรานได้ง่าย มีความคงรูปดี ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ราคาถูก ทนต่อความร้อนได้พอสมควร ทนสารเคมีบางประเภทได้ดี แต่ไม่ทนตัวทำละลายอินทรีย์ จากสมบัติดังกล่าวข้างต้นทำให้สามารถแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น กล่องบรรจุอาหารและของใช้ชนิดใส แปรงสีฟัน ของเด็กเล่น แผงและตู้โทรทัศน์ โฟมกันแตกสำหรับบรรจุภัณฑ์ แผงฉนวนความร้อนและเสียง เป็นต้น จากข้อจำกัดของพอลิสไตรีนที่เปราะแตกรานได้ง่าย จึงได้มีการปรับปรุงสมบัติโดยทำให้เหนียวขึ้น โดยการผสมกับยางสังเคราะห์ เช่น บิวเทไดอีน ทำให้ได้พอลิเมอร์ชนิดทนแรงกระแทกสูง (high impact polymer)

การเกิดพอลิเมอร์แบบอิมัลชันของพอลิสไตรีน

พอลิสไตรีนสังเคราะห์จากสไตรีนมอนอเมอร์เป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยา โดยทำปฏิกิริยาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเคมีเกิดพอลิเมอร์แบบอิมัลชันมีข้อดี คือ พอลิเมอร์ที่ได้มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแคบ และอัตราการเปลี่ยนจากมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์สูงที่อุณหภูมิต่ำ ในขณะเดียวกันสามารถควบคุมความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพเทคนิคการเกิดพอลิเมอร์แบบอิมัลชันที่มีน้ำเป็นตัวกลางประกอบไปด้วยอนุภาคพอลิเมอร์ที่มีขนาดเล็ก คือ ระหว่าง 0.5-5 ไมครอน นิยมใช้น้ำเป็นตัวกลางในการเกิดปฏิกิริยา ตัวริเริ่มที่ใช้จะละลายในน้ำแทนที่จะละลายในมอนอเมอร์ และผลิตภัณฑ์สุดท้ายอยู่ในรูปลาเท็กซ์ที่เสถียร (อิมัลชันของพอลิเมอร์ในน้ำ)

การเกิดพอลิเมอร์แบบอิมัลชันเริ่มต้นจากสารลดแรงตึงผิว ทำหน้าที่ลดความตึงผิวของน้ำเพื่อให้เกิดสถานะอิมัลชัน โดยสารลดแรงตึงผิวรวมตัวเป็นไมเซลล์ (micelle) โครงสร้างโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นไฮโดรคาร์บอนไม่มีสภาพขั้ว (หาง) และส่วนที่เป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีสภาพขั้ว (หัว) ดังนั้นเมื่ออยู่ในน้ำโมเลกุลจะหันส่วนที่ไม่ชอบน้ำเข้าข้างในไมเซลล์ และหันส่วนที่ชอบน้ำออกข้างนอก และมอนอเมอร์บางส่วนในระบบจะเข้าไปอยู่ภายในไมเซลล์ และบางส่วนกระจายอยู่ในน้ำ ตัวริเริ่มที่อยู่ในน้ำเมื่อได้รับความร้อนจะแตกตัวเกิดเป็นอนุมูลอิสระ เมื่ออนุมูลอิสระเคลื่อนที่เข้าสู่ไมเซลล์ก็จะเกิดพอลิเมอร์เชนขึ้นในไมเซลล์ ปฏิกิริยาจะดำเนินต่อไปเรื่อยๆ จนกว่าอนุมูลอิสระตัวอื่นจะเคลื่อนเข้าไปในไมเซลล์และทำให้พอลิเมอร์เชนหยุดลง ข้อดีของการเตรียมพอลิเมอร์แบบอิมัลชัน คือ ความหนืดต่ำ

ตลอดปฏิกิริยาการควบคุมอุณหภูมิของปฏิกิริยากระทำได้ง่าย พอลิเมอร์ที่ได้อยู่ในรูปของอิมัลชันลาเทกซ์ (latex) อาจนำไปใช้ประโยชน์หรือใช้งานได้โดยตรงได้ร้อยละของการเปลี่ยนเป็นพอลิเมอร์ (% conversion) สูงโดยทั่วไปสูงถึง 100% อัตราของปฏิกิริยาเร็วมากได้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง แต่มีเส้นโค้งการแจกแจงของน้ำหนักโมเลกุลแคบและพอลิเมอร์ที่ได้มีขนาดเล็ก ซึ่งอาจเหมาะสมกับการใช้งานหรือนำไปแปรรูป

3.1.4 พอลิเมอร์ผสม

การเตรียมพอลิเมอร์ผสมเป็นวิธีการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันมาก โดยการนำพอลิเมอร์ 2 ชนิดหรือมากกว่าสองชนิดซึ่งอยู่ในสถานะที่เป็นของไหลได้แก่ สารละลาย และสภาวะหลอม มาผสมรวมกัน ได้เป็นพอลิเมอร์ผสมซึ่งมีสมบัติที่ดีของพอลิเมอร์แต่ละชนิดมารวมกัน แต่การผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ต่างชนิดกันนั้น โดยธรรมชาติแล้วเป็นไปได้ยาก ดังนั้น พอลิเมอร์ผสมที่ได้จึงไม่เป็นเนื้อเดียวกัน และพบว่าเมื่ออยู่ในสถานะที่เป็นของแข็งพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งจะกระจายตัวอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งหรือเป็นส่วนของเมทริกซ์ที่ต่อเนื่องของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ทั้งนี้การกระจายตัวดังกล่าวต้องเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ มิฉะนั้นจะเกิดเป็นข้อบกพร่องของผลิตภัณฑ์ และส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมต่ำกว่าของพอลิเมอร์เริ่มต้นได้ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึงสภาพเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน ซึ่งบางชนิดสามารถเข้ากันได้ดี บางชนิดไม่สามารถเข้ากันได้ เนื่องจากโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลแตกต่างกันจึงไม่สามารถกระจายตัวได้อย่างอิสระเกิดการแยกตัวภาค

กลไกสภาพเข้ากันได้

พอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่พบว่ามีความเข้ากันต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากมีแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสของพอลิเมอร์ทั้งสองน้อย ดังนั้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ในการผสม จึงนิยมใช้สารช่วยผสมหรือทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในระหว่างการผลิต (in-situ chemical reaction) เพื่อปรับปรุงอันตรกิริยาระหว่างผิวสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม เพื่อให้ได้สมบัติของพอลิเมอร์ผสมและโครงสร้างสัณฐานวิทยาที่เหมาะสม

วิธีการผสมเพื่อความสามารถเข้ากันได้

เทคนิคในการผสมเพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ผสมที่มีสมบัติตามที่ต้องการนั้นมีอยู่หลายวิธี แต่ละวิธีในการผสมต้องพิจารณาถึงระดับความสามารถเข้ากันได้ โดยในการพิจารณาสภาพผสมเข้ากันได้ ต้องคำนึงถึงหลักทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic Miscibility) แสดงความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\Delta G_{\text{mix}} = \Delta H_{\text{mix}} - T\Delta S_{\text{mix}}$$

เมื่อ ΔG_{mix} เป็นการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ ΔH_{mix} เป็นเอนทาลปีของการผสม ΔS_{mix} เป็นเอนโทรปีของการผสมและ T เป็นอุณหภูมิผสม

ความสามารถเข้ากันได้ในทางเทอร์โมไดนามิกส์ต้องคำนึงถึงค่า ΔG_{mix} นั่นคือ $\Delta G_{\text{mix}} < 0$ แต่โดยทั่วไปความสามารถเข้ากันระหว่างพอลิเมอร์สองชนิดหรือมากกว่าในพอลิเมอร์ผสมเกิดขึ้นได้ไม่ดี ดังนั้นจึงมีแนวทางในการปรับปรุงความสามารถเข้ากันได้หลายวิธี ดังนี้

1. การเติมบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์

การเติมบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ เป็นแนวทางหนึ่งที่ได้ใช้ในการผสมเพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม โดยมีการใช้บล็อกโคพอลิเมอร์จะใช้เป็นสารช่วยผสมมากกว่ากราฟต์โคพอลิเมอร์ โดยเฉพาะบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกของพอลิเมอร์ที่เหมือนกันกับพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน โดยโคพอลิเมอร์ที่ใช้ต้องมีโครงสร้างเคมีและน้ำหนักโมเลกุลที่เหมาะสมที่จะกระจายอยู่ระหว่างวัฏภาคของพอลิเมอร์แต่ละชนิด โครงสร้างเคมีและน้ำหนักโมเลกุลของโคพอลิเมอร์จะมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพของการเป็นสารช่วยผสม

2. การเติมพอลิเมอร์ที่หน่วงฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา

การเติมพอลิเมอร์ที่หน่วงฟังก์ชันเพื่อทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม อาจนำพอลิเมอร์ชนิดใดชนิดหนึ่งมาดัดแปรโครงสร้างให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา โดยหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสามารถเกิดปฏิกิริยาหรือมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล กับพอลิเมอร์ชนิดอื่นได้ กระบวนการดัดแปรพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันสามารถทำได้ในเครื่องปฏิกรณ์หรือโดยผ่านกระบวนการอัดรีด ตัวอย่างเช่น มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่กราฟต์บนสายโซ่ของพอลิไอโอเลฟินส์ โดยหมู่คาร์บอกซิลิกของมาเลอิกแอนไฮไดรด์มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับหมู่อะมิโนของพอลิเอไมด์ได้ ทั้งนี้พอลิไอโอเลฟินส์กราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์จัดเป็นสารช่วยผสมที่ได้รับความนิยมในทางการค้าและมีราคาไม่แพงนัก

3. การทำให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์ไครเซชันในระหว่างการผสม

การทำให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์ไครเซชันในระหว่างการผสม (reactive blending) เป็นแนวทางใหม่ที่ใช้ในการผสมพอลิเมอร์เข้ากันได้ โดยต่างจากวิธีอื่นๆ คือ องค์ประกอบที่ทำการผสมจะถูกนำมาดัดแปรเพื่อให้สามารถเกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งได้ โดยไม่จำเป็นต้องเติมสารช่วยผสม

โดยในงานวิจัยนี้ศึกษาการผสมยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีนในสถานะลาเท็กซ์และคาดว่าสารตัวเติมที่ใช้คือเบนโทไนท์ทำหน้าที่เป็นช่วยผสมโดยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีน

3.2 แนวคิดในงานวิจัย

เนื่องจากสมบัติของยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อการฉีกขาด ความต้านทานต่อการขีดสี ความยืดหยุ่นสูง เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามยางธรรมชาติมีขีดจำกัดในการใช้งานในด้านความแข็งแรง นั่นคือมีค่ามอดูลัสต่ำ ไม่เสถียรต่อความร้อนและออกซิเจนในอากาศ ในขณะที่พอลิสไตรีนเป็นพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติกที่มีสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและมีค่ามอดูลัสสูงเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ ดังนั้นในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ จึงได้สนใจเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนในสถานะน้ำยางเพื่อปรับปรุงข้อจำกัดของยางธรรมชาติ และเป็นแนวทางในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากยางธรรมชาติในรูปน้ำยาง นอกจากนี้ได้มีการเติมสารตัวเติมจากธรรมชาติ คือเบนโทไนท์ เป็นสารเสริมแรงให้กับวัสดุพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด และคาดว่าสามารถทำหน้าที่เป็นตัวช่วยประสานทำให้พอลิสไตรีนผสมเข้ากับยางธรรมชาติได้ดีขึ้น ซึ่งคาดว่าจะช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลและทางกายภาพของพอลิเมอร์ผสมได้อีกทางหนึ่งด้วย

3.3 ผลงานที่เกี่ยวข้อง

สรินทรและคณะ (2002) ศึกษาตัดแปรโซเดียมเบนทอไนท์โดยใช้แอลคิลแอมโมเนียมไอออนในการแลกเปลี่ยนกับไอออนบวกของโลหะ พบว่าเกิดการแทรกของโมเลกุลของแอลคิลแอมโมเนียมในช่องว่างระหว่างชั้นโครงสร้างผลึกของเบนทอไนท์ โดยทำให้ระยะห่างระหว่างระนาบของชั้นซิลิเกตและชั้นอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้นตามความยาวของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนของเกลือแอลคิลแอมโมเนียมไอออน และจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Thermo gravimetric analyzer (TGA) พบว่าน้ำหนักที่หายไปเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับเบนทอไนท์ที่ไม่ตัดแปร

Asaletha et al., (1999) ศึกษาสมบัติเชิงกลและสัญญาณวิทยาของการผสมกับผลของอัตราการผลิตสถานะของกระบวนการและระบบการวัลคาไนซ์ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากการผสมระหว่างพอลิไทรินและยางธรรมชาติ (NR/PS) ผลจากการศึกษาสมบัติเชิงกลและสัญญาณวิทยาของ NR/PS ในระบบการเชื่อมโยงพลวัตร เมื่อใช้กำมะถัน เปอร์ออกไซด์ และระบบผสมระหว่าง กำมะถันกับเปอร์ออกไซด์ พบว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PS ในอัตราส่วน 30/70 ในระบบเปอร์ออกไซด์ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุด

Mathew et al., (2000) รายงานผลการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ (NR) กับพอลิไทริน (PS) ในระบบที่ใช้และไม่ใช้สารเชื่อมโยง จากผลการทดสอบ พบว่าปริมาณสัดส่วนระหว่าง NR:PS เท่ากับ 30:70 ในระบบที่ไม่ใช้สารเชื่อมโยงให้ค่าการทนต่อแรงกระแทกสูงสุด แต่ระบบพอลิเมอร์ผสมที่มีสารเชื่อมโยง 6%โดยน้ำหนัก พบว่าในปริมาณสัดส่วนระหว่าง NR:PS เท่ากับ 40:60 ให้ค่าการทนต่อแรงกระแทกสูงขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิไทริน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการผสมยางธรรมชาติกับพอลิไทรินในสัดส่วนที่เหมาะสมสามารถปรับปรุงสมบัติการทนต่อแรงกระแทกซึ่งเป็นข้อจำกัดในการใช้งานของพอลิไทรินได้

Arroyo et al., (2003) ศึกษาผลการนำมอนท์โมริลโลไนท์ที่ตัดแปรด้วยออกตะเดซิลแอมโมเนียมไอออน ซึ่งนำมาใช้แทนเขม่าดำเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ พบว่าความต้านทานต่อแรงดึงของยางธรรมชาติที่เติมมอนท์โมริลโลไนท์ 10 phr เพิ่มขึ้น 350 % เมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ และยังพบว่าสมบัติเชิงกลของยางที่เติมมอนท์โมริลโลไนท์ที่ตัดแปรมีค่าใกล้เคียงกับยางที่เติมเขม่าดำ 40 phr ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสามารถนำมอนท์โมริลโลไนท์มาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Varghese and Karger-Kocsis (2003) ศึกษาการเตรียมนาโนพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับเคลย์ในสถานะลาเท็กซ์ เคลย์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ โซเดียมเบนทอไนท์ (จากธรรมชาติ) โซเดียมฟลูออโรเฮกไทไรต์ (จากการสังเคราะห์) และเคลย์ (ทางการค้า) จากการศึกษสมบัติการทนต่อแรงดึงของนาโนพอลิเมอร์ผสม พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่เติมโซเดียมฟลูออโรเฮกไทไรต์มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงมากที่สุด ในขณะที่พบว่าการเติมเคลย์ไม่ได้มีผลต่อการเกิดการตกผลึกของสายโซ่ยางธรรมชาติที่เกิดขึ้นในขณะยืดที่เปอร์เซ็นต์การยืดสูงๆ จากการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่เติมโซเดียมฟลูออโรเฮกไทไรต์ มีค่ามอดูลัสและอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับเคลย์ (ทางการค้า) ผลจากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA พบว่าความเสถียรต่อความร้อนของพอลิเมอร์ผสมที่เติมโซเดียมเบนทอไนท์และโซเดียมฟลูออโรเฮกไทไรต์ที่มีชั้นซิลิเกตสูงกว่าเคลย์ (ทางการค้า) ผลจากการศึกษาการกระจายตัวของเคลย์สังเคราะห์ในยางธรรมชาติได้ดีกว่าเคลย์ (ทางการค้า) และจากเทคนิคการ

เลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ แสดงให้เห็นว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีการเติมเคลย์ที่มีชั้นซิลิเกตมีการแทรกของสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติในระหว่างชั้นซิลิเกตของเคลย์ธรรมชาติ

Varghese et al., (2003) ศึกษาสมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิยูรีเทนที่มีโซเดียมฟลูออโรเฮกไทไรด์ดัดแปรปริมาณ 10 phr เป็นสารเสริมแรงโดยการคอมปาวด์ในรูปลาเท็กซ์ จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน พบว่าพอลิยูรีเทนกับยางธรรมชาติไม่รวมกันเป็นเนื้อเดียวแต่มีการกระจายตัวกันอย่างต่อนื่องคล้ายโครงกระดูกและสังเกตเห็นได้ว่าโซเดียมฟลูออโรเฮกไทไรด์กระจายตัวอยู่ในพอลิยูรีเทนได้ดีกว่าในยางธรรมชาติ โดยมีการแทรกของสายโซ่โมเลกุลของพอลิยูรีเทนเข้าไปในชั้นของซิลิเกตสังเคราะห์ทำให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีสมบัติเชิงกลดีขึ้น

Araújo et al., (2004) ศึกษาผลของการดัดแปรเบนทอไนท์ต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างไนลอน 6 กับเบนทอไนท์ดัดแปรและพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิสไตรีนกับเบนทอไนท์ดัดแปร พบว่าเมื่อดัดแปร เบนทอไนท์ด้วย quaternary ammonium salt จะเกิดการแทรกของสายโซ่โมเลกุล quaternary ammonium salt เข้าไปในชั้นซิลิเกต เมื่อนำเบนทอไนท์ที่ดัดแปรมาเสริมแรงในไนลอน 6 พบว่าทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น เช่น ความแข็ง %ระยะยืดและความหนืด แต่ค่ามอดูลัสไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับไนลอน 6 แต่เมื่อเติมเบนทอไนท์ดัดแปรในพอลิสไตรีน พบว่าสมบัติเชิงกลมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิสไตรีนที่ไม่เติมสารเสริมแรง

Qiu and Qu (2006) ศึกษาการเตรียมนาโนพอลิเมอร์ผสมของพอลิสไตรีนที่ถูกเสริมแรงด้วย Layered double hydroxide (LDH) ในสถานะลาเท็กซ์ โดยผ่านกระบวนการเกิดพอลิเมอร์ในสถานะอิมัลชันโดยไม่ใช้สบู่ จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่ามีการขยายของระยะห่างระหว่างชั้นของ LDH เพิ่มขึ้น เมื่อเวลาในการเกิดพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น และเมื่อใช้เวลาในการพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นมากกว่า 120 นาที ไม่ปรากฏฟิสิกส์ที่แสดงระยะห่างระหว่างชั้นของ LDH เนื่องจากชั้นของ LDH แยกออกและกระจายเป็นแผ่นซิลิเกตบางๆ ในพอลิสไตรีน เมื่อศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน พบว่า LDH กระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิสไตรีน

El-Nashar and Essawy (2004) ศึกษาผลของการใช้มอนท์โมริลโลไนท์เป็นสารเสริมแรงและช่วยผสมในระบบของพอลิเมอร์เบลนดระหว่าง acrylonitrile-butadiene rubber และ styrene-butadiene rubber ผลจากการทดสอบพบว่าสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนดที่เติมเคลย์เพิ่มขึ้นมากเมื่อเทียบกับเบลนดที่ไม่เติมเคลย์ จากภาพถ่าย SEM ปรากฏหลักฐานว่ามีเคลย์ที่บริเวณรอยต่อผิวสัมผัสระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดแสดงให้เห็นว่าเคลย์ทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสมในพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด

Teh et al., (2004) ศึกษาผลของการเติมยางอีพอกซีไดซ์ (ENR25 และ ENR50) เป็นสารช่วยผสมระหว่างยางธรรมชาติกับออร์แกนโนเคลย์ ใช้กระบวนการผสมโดยการหลอมในเครื่องผสมระบบปิด พบว่าเมื่อเติม ENR50 ปริมาณ 2 phr มีการกระจายตัวของออร์แกนโนเคลย์ในเนื้อยางดีที่สุด ซึ่งส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบที่ได้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

Wang et al., (2006) ศึกษาการเตรียมคอมโพสิตระหว่างพอลิบิวทิลอะคิเลทกับซิลิเกตที่มีลักษณะเป็นชั้นที่ถูกห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนโดยการฉายรังสีแกมมาให้เกิดการพอลิเมอร์ไรเซชัน แบบอิมัลชันจาก

การศึกษาพบว่าโซเดียมมอนต์โมริลโลไนท์ (Na-MMT) ที่ดัดแปรด้วย Cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) มีระยะห่างระหว่างชั้นของซิลิเกตเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับโซเดียม-มอนต์โมริลโลไนท์ที่ไม่ได้ดัดแปรโครงสร้าง เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของ CTAB แทรกเข้าไปในชั้นของซิลิเกต เมื่อนำโซเดียมมอนต์โมริลโลไนท์ที่ดัดแปลงมาเสริมแรงในพอลิบิวทิลอะคริเลต พบว่ามีการแทรกสายโซ่โมเลกุลของพอลิบิวทิลอะคริเลตเข้าไปในชั้นของซิลิเกตหลังจากถูกฉายรังสีแกมมา การฉายรังสีแกมมาทำให้คอมโพสิตระหว่างพอลิบิวทิลอะคริเลตกับซิลิเกตที่มีลักษณะเป็นชั้นผสมเข้ากันกับพอลิสไตรีนได้ดี จึงทำให้วัสดุที่ได้มีสมบัติการทนต่อแรงกระแทกและความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น

4. วิธีการ

4.1 การเตรียมพอลิไสไตรีนโดยการเกิดพอลิเมอร์แบบอิมัลชัน

นำขวดก้นกลมสามคอต่อเข้ากับคอนเดนเซอร์ เติมน้ำกลั่นลงในขวดสามคอ 150 มิลลิลิตร โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต 0.077 กรัม และโซเดียมโคเดซิลซัลเฟต 0.752 กรัม กวนผสมที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เติมน้ำกลั่น 50.0 มิลลิลิตร ปั่นกวนด้วยความเร็วคงที่เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ภายใต้อากาศบรรยากาศแก๊สไนโตรเจนหลังจากนั้นจะได้พอลิไสไตรีนในสถานะอิมัลชัน

4.2 ดัดแปรเบนทอไนท์

ดัดแปรเบนทอไนท์ให้ออกตะเคซิลเอมีน (octadecylamine) เป็นตัวแลกเปลี่ยนกับไอออนบวกของโลหะ ในโครงสร้างผลึกซิลิกาของเบนทอไนท์ โดยนำเบนทอไนท์ เติมน้ำกลั่น ปั่นกวนให้เข้ากันที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นำมาผสมกับออกตะเคซิลเอมีน และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ในน้ำกลั่น ปั่นกวนให้เข้ากัน เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นทิ้งไว้ให้ตกตะกอน นำเบนทอไนท์ที่ได้มารองแล้วล้างกรออกด้วยน้ำกลั่นร้อน นำตะกอนไปอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส ตรวจสอบโครงสร้างเคมีและโครงสร้างผลึกของเบนทอไนท์ โดยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) และเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD)

4.3 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิไสไตรีนในสถานะน้ำยาง

(ก) การเตรียมสารเคมีสำหรับยาง

ขั้นตอนในการเตรียมสารเคมีสำหรับยาง (sulphur, Zinc diethyl dithiocarbamate และ ZnO) นำสารเคมีแต่ละชนิดมากระจายตัวในน้ำ โดยนำสารเคมีมาประมาณ 50.0 g ผสมกับน้ำกลั่น 50.0 g และเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ ประมาณ 0.5 g ผสมโดยใช้ ball-mill ให้เข้ากัน

(ข) การเตรียมน้ำยางคอมปาวด์

เจือจางน้ำยางธรรมชาติขึ้นปริมาณแอมโมเนียสูงจาก (60%DRC) ด้วยน้ำกลั่นในมีเนื้อยางแห้งร้อยละ 30 ในน้ำยางธรรมชาติ เติมน้ำกลั่นพอลิไสไตรีนลาเท็กซ์ และสารเคมีดังตารางที่ 4.1 ผสมเข้ากันโดยการปั่นกวนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อบ่มเรณูน้ำยาง กรองด้วยตะแกรง เทใส่เบ้ากระຈးกลี่เหลี่ยม วางทิ้งไว้ให้แห้งในอากาศ หลังจากนั้นนำเข้าตู้อบเพื่อวัลคาไนซ์ยาง ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง หมายเหตุ พอลิเมอร์ผสมในสถานะลาเท็กซ์ที่เตรียมได้มีอายุการใช้งานประมาณ 2 วัน

ตารางที่ 4.1 สูตรของการเตรียมพอลิเมอร์ผสมในสภาวะลาเท็กซ์

Ingredients	Wet (parts by weight)	Dry (parts by weight)
Natural rubber latex (30% TSC)	334	100
30% Polystyrene latex (30% TSC)	37.0, 83.3 และ 143.0	11.1, 25.0 และ 42.9
50% Sulphur dispersion	3.0	1.5
50% Zinc diethyl dithiocarbamate dispersion	2.0	1.0
50% Zinc oxide	3.6	1.8

4.4 เตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีนโดยมีเบนทอไนท์เป็นสารตัวเติม

นำน้ำยางธรรมชาติ (30%DRC) เติมพอลิสไตรีนลาเท็กซ์ เบนทอไนท์ก่อนและหลังคัดแปร (โดยแปรประมาณ 3 และ 5 phr) และสารเคมีตามตารางที่ 4.1 ปั่นจนตลอดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นเทขึ้นรูปในเบ้าแก้วสี่เหลี่ยม ตั้งทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำเข้าตู้อบเพื่อทำให้ยางสุกที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

4.5 ศึกษาโครงสร้างเคมีของพอลิเมอร์ผสม

4.5.1 ตรวจพิสูจน์โครงสร้างเคมีโดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

นำแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสมวัดการดูดกลืนแสงอินฟราเรดด้วยเครื่อง FTIR เพื่อศึกษาการเกิดอันตรกิริยาระหว่างเบนทอไนท์กับยางธรรมชาติและพอลิสไตรีน

4.5.2 ศึกษาโครงสร้างผลึกโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

นำตัวอย่างไปวางบนที่วางตัวอย่าง หลังจากนั้นนำไปวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยใช้ Cu เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์ ซึ่งมีความยาวคลื่น 15.4 nm แล้วคำนวณหาระยะห่างระหว่างชั้นซิกิลิตได้โดยใช้สมการของ Bragg

4.6 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ

4.6.1 ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง

เตรียมตัวอย่างโดยตัดชิ้นทดสอบเป็นรูปดัมเบลล์ขนาด Die type C ตามมาตรฐาน ASTM D412 ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง โดยใช้อัตราเร็วในการดึงเท่ากับ 500 mm/min คำนวณค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100 300 และ 500 % ความต้านทานต่อแรงดึงและระยะยืดที่จุดขาด (ในการทดสอบแต่ละตัวอย่างใช้จำนวน 7 ชิ้นงาน)

4.6.2 ทดสอบความต้านทานต่อแรงฉีกขาด

เตรียมตัวอย่างโดย ตัดชิ้นทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM D624 นำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง อัตราเร็วในการดึงเท่ากับ 500 mm/min (ในการทดสอบแต่ละตัวอย่างใช้จำนวน 7 ชิ้นงาน)

4.6.3 ทดสอบการบวมพอง

เตรียมตัวอย่างโดยตัดชิ้นทดสอบให้มีขนาด 1 x 1 cm ชั่งน้ำหนักที่แน่นอน นำไปแช่ในโทลูอินเป็นเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำส่วนที่เป็นเจลขับโทลูอินออก แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก

คำนวณหาร้อยละการบวมพอง (% Swelling) ได้จาก

$$\% \text{Swelling} = \frac{W_t - W_0}{W_0} \times 100$$

โดยที่ W_0 คือน้ำหนักของตัวอย่างก่อนแช่ (g) และ W_t คือน้ำหนักของตัวอย่างหลังแช่ (g)

4.6.4 ศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม

นำชิ้นตัวอย่างที่ได้จากการขาดในระหว่างการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงไปวางบนที่วางตัวอย่างแล้วเคลือบด้วยทองคำ นำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ภายใต้สภาวะสุญญากาศ

5. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

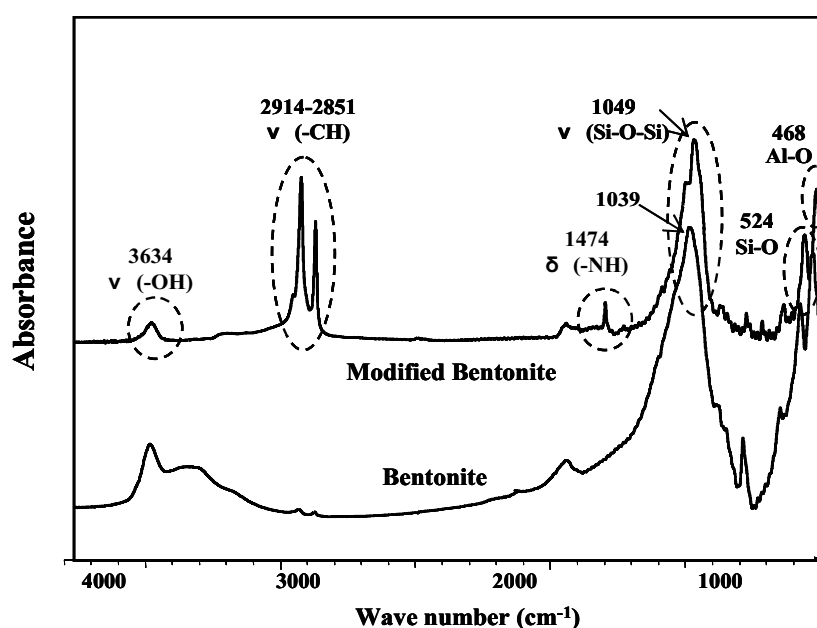
ผลจากการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีนในสถานะน้ำยาง โดยใช้เบนโทไนท์เป็นสารตัวเติมเพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีน รายงานผลตามลำดับดังนี้

5.1 โครงสร้างเคมีและโครงสร้างผลึกของเบนโทไนท์

ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างเคมีด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) และโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD)

5.1.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเคมีของเบนโทไนท์

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเคมีของเบนโทไนท์และเบนโทไนท์ดัดแปร โดยใช้เทคนิค FTIR สามารถระบุตำแหน่งแถบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด ได้ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของเบนโทไนท์ (Bentonite) และเบนโทไนท์ดัดแปร (Modified bentonite)

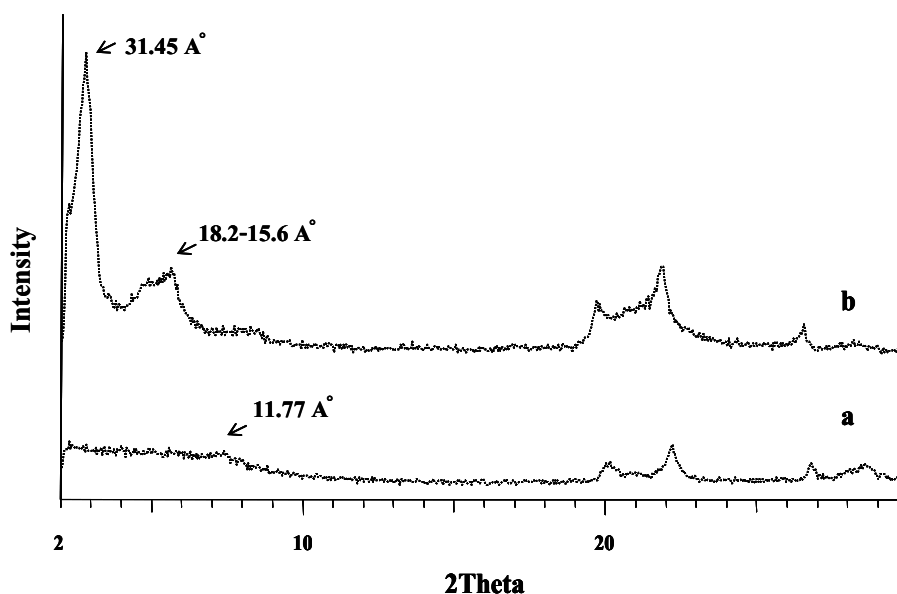
จากรูปที่ 5.1 สเปกตรัมของเบนโทไนท์และเบนโทไนท์ดัดแปรด้วยออกตะเดซิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ปรากฏแถบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด เกิดขึ้นเนื่องจากการสั่นของพันธะ ในโครงสร้างของเบนโทไนท์ จะเห็นได้ว่าแถบการดูดกลืนรังสีหลัก ๆ ที่ปรากฏในสเปกตรัมของเบนโทไนท์และเบนโทไนท์ดัดแปรมีตำแหน่งและลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยตำแหน่งการดูดกลืนรังสีที่เลขคลื่น 3634 cm⁻¹ เกิดจากการสั่นแบบยืดของพันธะ -OH ในโครงสร้างของเบนโทไนท์ ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1039 cm⁻¹ เกิดจากการสั่นแบบยืดของ Si-O-Si ในโครงสร้างของชั้นซิลิเกต ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 524 cm⁻¹ เกิดจากการสั่นแบบงอของ Si-O ในชั้นซิลิเกต และที่เลขคลื่น 468 cm⁻¹ เกิดจากการสั่นแบบงอของ Al-O ในชั้นซิลิเกต ในขณะที่อินฟราเรดสเปก

ตราของเบนทอไนท์ดัดแปร ปรากฏตำแหน่งแถบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเพิ่มในช่วงเลขคลื่น 2851-2914 cm^{-1} เกิดจากการสั่นแบบยืดทั้งสมมาตรและอสมมาตรของพันธะ C-H ของ $-\text{CH}_2-$ และ $-\text{CH}_3$ และที่เลขคลื่น 1474 cm^{-1} เนื่องจากการสั่นแบบยืดของพันธะ $-\text{N}-\text{H}$ ของออกตะเดซิลแอมโมเนียมไอออน นอกจากนี้ยังปรากฏการเลื่อนตำแหน่งเลขคลื่นที่ 1039 cm^{-1} เป็น 1049 cm^{-1} ซึ่งเป็นหลักฐานแสดงให้เห็นว่ามีการแทรกของสายโซ่โมเลกุลออกตะเดซิลแอมโมเนียมไอออนในชั้นซิลิเกตของเบนทอไนท์

5.1.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเบนทอไนท์

ผลของการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเบนทอไนท์ดัดแปรด้วยออกตะเดซิลแอมโมเนียมไอออน ด้วยเทคนิคการแลกเปลี่ยนไอออนด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) เพื่อศึกษาการขยายของชั้นซิลิเกตในโครงสร้างของเบนทอไนท์หลังดัดแปรเปรียบเทียบกับก่อนดัดแปร แสดงดังรูปที่ 5.2

จาก XRD สเปกตราของเบนทอไนท์และเบนทอไนท์ดัดแปรดังรูปที่ 5.2 ปรากฏตำแหน่งพีกซึ่งแสดงว่ามีมอนท์มอริลโลไนท์เป็นองค์ประกอบหลัก และจาก XRD สเปกตรัมของเบนทอไนท์ (รูปที่ 5.2(a)) มีลักษณะพีกกว้าง อาจเนื่องจากมีความเป็นอสัณฐานของเบนทอไนท์ เมื่อพิจารณา XRD สเปกตรัมของเบนทอไนท์ดัดแปร (รูปที่ 5.2(b)) ปรากฏพีกที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 3.0 และลักษณะพีกแคบลง ซึ่งเป็นตำแหน่งของมอนท์มอริลโลไนท์ เมื่อหาค่าระยะห่างระหว่างระนาบ (d-spacing) ของเบนทอไนท์ดัดแปรเท่ากับ 31.45 และ 18.2-15.6 \AA เมื่อเทียบกับระยะห่างระนาบของเบนทอไนท์ก่อนดัดแปร (ประมาณ 11.77 \AA) แสดงว่าเกิดกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะ (Na^+ K^+ และ Ca^{2+}) กับออกตะเดซิลแอมโมเนียมไอออน จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ามีการแทรกของสายโซ่ออกตะเดซิลแอมโมเนียมไอออนในชั้นซิลิเกตของเบนทอไนท์

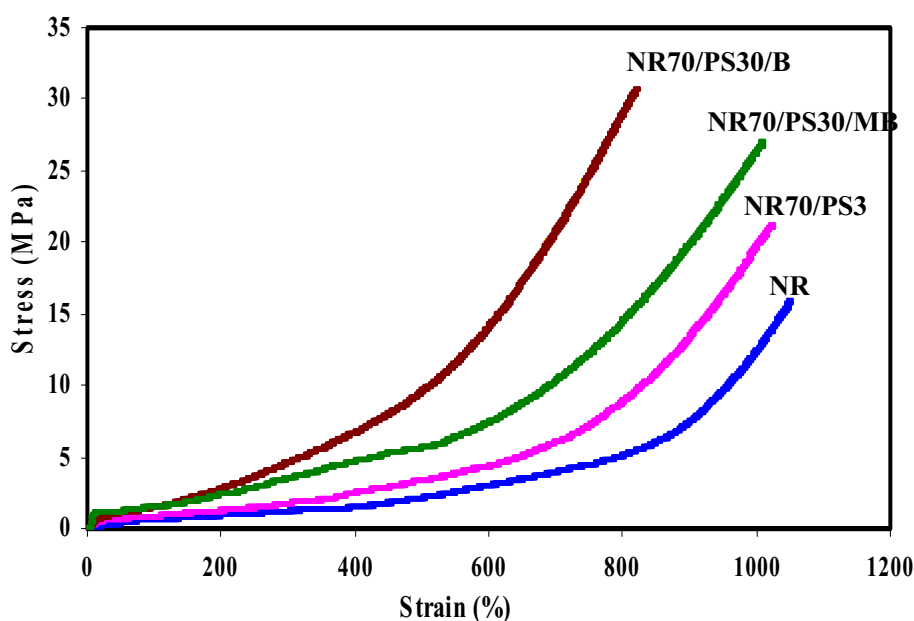


รูปที่ 5.2 XRD สเปกตราของเบนทอไนท์ (a) และเบนทอไนท์ดัดแปร (b)

5.2 ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง

จากผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยางธรรมชาติ (NR) พอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิสไตรีน (NR/PS) และ พอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR/PS เติมน้ำมัน (NR/PS/B) และ NR/PS เติมน้ำมันที่ดัดแปร (NR/PS/MB) ได้ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแสดงดังรูปที่ 5.3

จากลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยาง NR พอลิเมอร์ผสม NR/PS ที่ปริมาณอัตราส่วน 70/30 และพอลิเมอร์ผสมที่เติมน้ำมัน (B) 3 ส่วนเมื่อเทียบกับเนื้อยาง 100 ส่วน (phr) (NR70/PS30/B3) และเบนทอไนท์ดัดแปร (MB) 3 phr (NR70/PS30/MB3) จะเห็นได้ว่าแตกต่างกัน โดยพอลิเมอร์ผสมที่เติมน้ำมัน (NR70/PS30/B3) มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับยาง NR และพอลิเมอร์ผสม NR/PS ในขณะที่ความสามารถในการยืดของพอลิเมอร์ผสมที่เติมน้ำมันที่ลดลง และจากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดยังแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมที่เติมน้ำมัน ยังคงแสดงพฤติกรรมการรับแรงดึงเหมือนกับยางธรรมชาติ



รูปที่ 5.3 ความเค้นกับความเครียดของยางธรรมชาติ (NR) พอลิเมอร์ผสม (NR70/PS30) และพอลิเมอร์ผสมเติมน้ำมัน (NR70/PS30/B3) และเติมน้ำมันที่ดัดแปร (NR70/PS30/MB3)

5.2.1 พอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีน

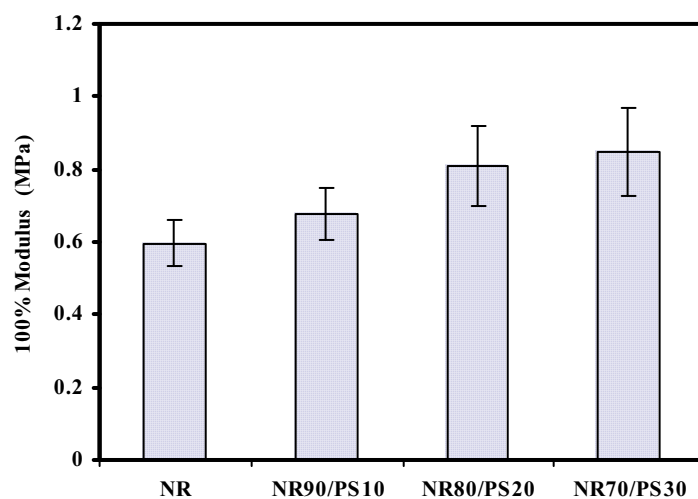
ผลจากการทดสอบการทนต่อแรงดึง ของยางธรรมชาติและพอลิเมอร์ผสม NR/PS โดยแปรปริมาณสัดส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30 ตามลำดับ สามารถคำนวณหาค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100, 300 และ 500% และความต้านทานต่อแรงดึง ได้ข้อมูลแสดงดังตารางที่ 5.1 และรูปที่ 5.4

จากรูปที่ 5.4 (ก และ ข) พบว่าค่ามอดูลัสของพอลิเมอร์ผสม NR/PS สูงกว่าของยางธรรมชาติ และเมื่อเปรียบเทียบค่ามอดูลัสของพอลิเมอร์ผสม NR/PS ที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ จะเห็นได้ว่าค่ามอดูลัสแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณ PS จากรูปที่ 5.4(ค) แสดงค่าความต้านทานต่อแรงดึงของยางธรรมชาติและพอลิ

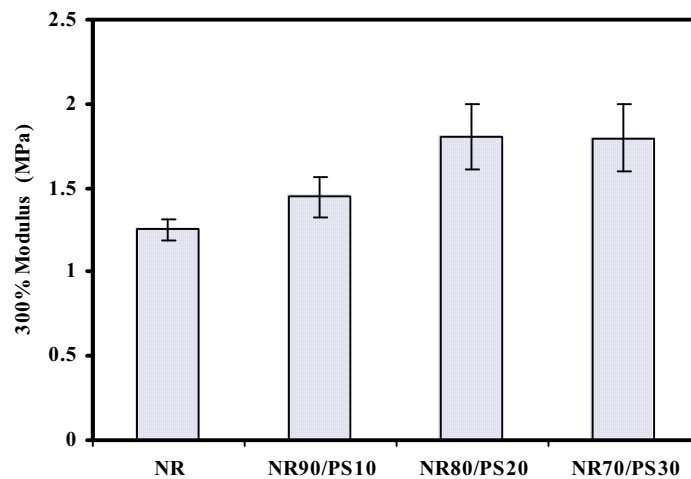
เมอร์ผสม NR/PS พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ และให้ค่าสูงสุด เท่ากับ 21.2 MPa สำหรับพอลิเมอร์ผสม NR/PS ที่อัตราส่วน 70/30 สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อยางธรรมชาติผสมกับพอลิสไตรีนซึ่งเป็นเทอร์โมพลาสติก โดยทั่วไปเทอร์โมพลาสติกเป็นพอลิเมอร์ที่มีค่ามอดูลัสและความต้านทานต่อแรงดึงสูงเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติซึ่งเป็นอีลาสโตเมอร์ ดังนั้นเมื่อผสมพอลิสไตรีนกับยางธรรมชาติ จึงมีผลทำให้พอลิเมอร์ผสมมีค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 5.1 มอดูลัสที่ระยะยืด 100, 300 และ 500% และความต้านทานต่อแรงดึงของยาง NR และพอลิเมอร์ผสม NR/PS

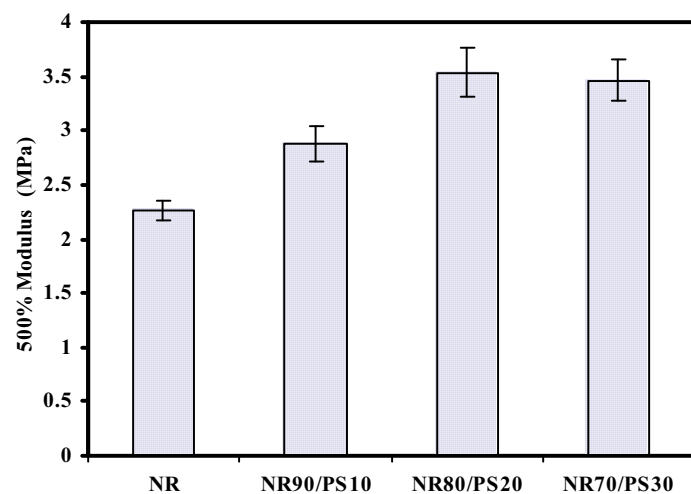
Sample	Modulus (MPa)			Tensile strength (MPa)
	100%	300%	500%	
NR	0.60±0.06	1.26±0.063	2.26±0.09	15.70±0.60
NR90/PS10	0.68±0.07	1.45±0.12	2.88±0.16	15.95±0.92
NR80/PS20	0.81±0.11	1.80±0.20	3.54±0.24	16.59±1.77
NR70/PS30	0.85±0.12	1.80±0.20	3.46±0.19	21.24±2.01



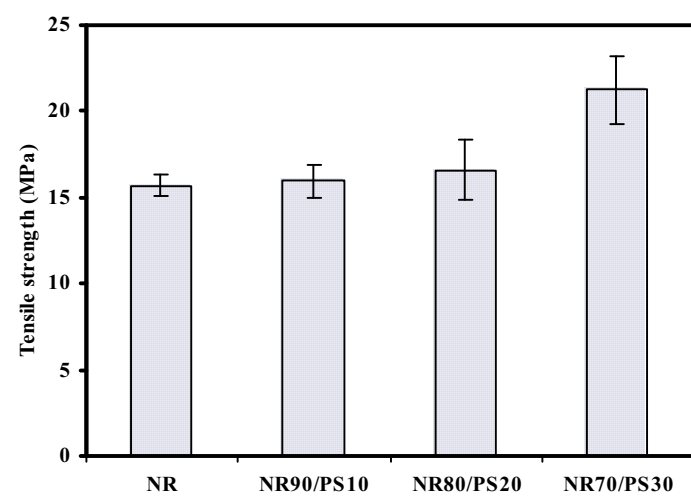
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 5.4 สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ (NR) และพอลิเมอร์ผสม NR/PS (ก) 100% มอดูลัส (ข) 300% มอดูลัส (ค) 500% มอดูลัส และ (ง) ความต้านทานต่อแรงดึง

5.2.2 พอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิไตรีนเดิมเบนทอไนท์

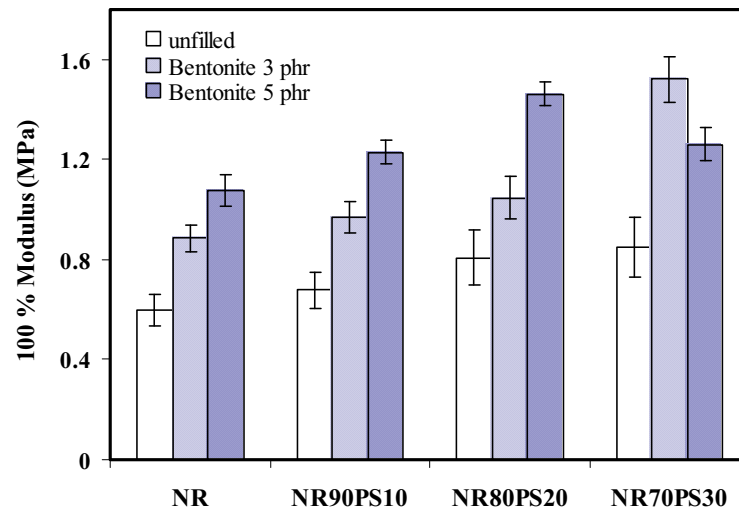
ในการศึกษาครั้งนี้ได้เลือกใช้เบนทอไนท์เป็นสารตัวเติมเพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิไตรีนและเพื่อเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์ผสมโดยใช้เบนทอไนท์เป็นสารตัวเติม (NR/PS/B) ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของ ยางธรรมชาติที่เติมเบนทอไนท์ (NR/B) พอลิเมอร์ผสม NR/PS ในปริมาณอัตราส่วนต่าง ๆ ที่เติมเบนทอไนท์ 3 และ 5 phr ดังตารางที่ 5.2 และรูปที่ 5.5

ตารางที่ 5.2 ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100, 300 และ 500% และความต้านทานต่อแรงดึงของยางธรรมชาติผสม เบนทอไนท์ (NR/B) และพอลิเมอร์ผสม NR/PS เติมเบนทอไนท์ (NR/PS/B)

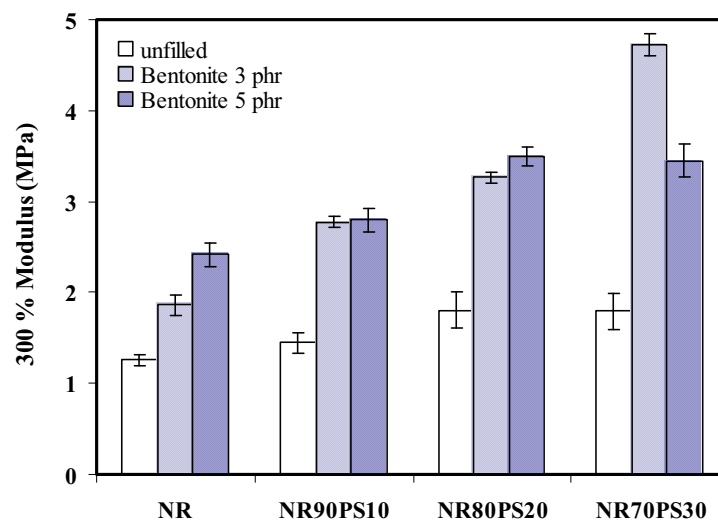
Sample	Modulus (MPa)			Tensile strength (MPa)
	100%	300%	500%	
NR/B3	0.88±0.05	1.86±0.12	3.79±0.09	19.8±2.25
NR90/PS10/B3	0.97±0.06	2.78±0.06	6.24±0.14	31.3±3.04
NR80/PS20/B3	1.05±0.09	3.27±0.07	7.07±0.30	26.8±2.30
NR70/PS30/B3	1.52±0.09	4.72±0.12	9.70±0.14	26.0±2.86
NR/B5	1.07±0.06	2.41±0.14	5.34±0.25	24.6±2.86
NR90/PS10/B5	1.23±0.05	2.80±0.14	5.59±0.11	25.5±1.71
NR80/PS20/B5	1.46±0.05	3.49±0.10	6.32±0.26	22.9±1.81
NR70/PS30/B5	1.26±0.07	3.45±0.18	6.52±0.21	22.7±1.02

จากรูปที่ 5.5 (ก ค และ ข) พบว่าค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100 300 และ 500% ของพอลิเมอร์ผสมที่เติมเบนทอไนท์เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ NR NR/B และ NR/PS จะเห็นได้ว่า ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100 และ 500% สูงสุดในระบบพอลิเมอร์ผสม NR70/PS30 ที่เติมเบนทอไนท์ 3 phr โดยมีค่าเท่ากับ 1.52 และ 9.70 MPa เมื่อคิดร้อยละที่เพิ่มขึ้นประมาณ 90 และ 180% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมเบนทอไนท์ อาจเป็นผลจากเบนทอไนท์กระจายตัวในเนื้อพอลิเมอร์ทำให้โครงสร้างผลึกของเบนทอไนท์ที่มีชั้นซิลิเกตเป็นส่วนรับแรงเมื่อมีแรงมากระทำกับชิ้นงาน และในขณะเดียวกันคาดว่าเบนทอไนท์ทำหน้าที่เป็นตัวช่วยประสานให้ PS กระจายใน NR ได้ดีขึ้น ส่งผลทำให้ค่ามอดูลัสสูงขึ้น แต่ในขณะที่เติมเบนทอไนท์ 5 phr พบว่าค่ามอดูลัสลดลง อาจเนื่องจากมีปริมาณเบนทอไนท์มากขึ้นส่งผลทำให้การกระจายของเบนทอไนท์ในเนื้อพอลิเมอร์มีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนส่งผลต่อการเสริมแรงและบทบาทการเป็นตัวช่วยประสานลดลง ในขณะเดียวกันค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมเมื่อเติมเบนทอไนท์ 3 และ 5 phr รูปที่ 5.5 (ค) สูงกว่ายาง NR NR/B และพอลิเมอร์ผสม NR/PS และให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงที่สุด (31.3 MPa) ในพอลิเมอร์ผสม NR/PS ที่ปริมาณอัตราส่วน 90/10 เมื่อเติมเบนทอไนท์ 3 phr ในขณะที่ปริมาณเบนทอไนท์ 5

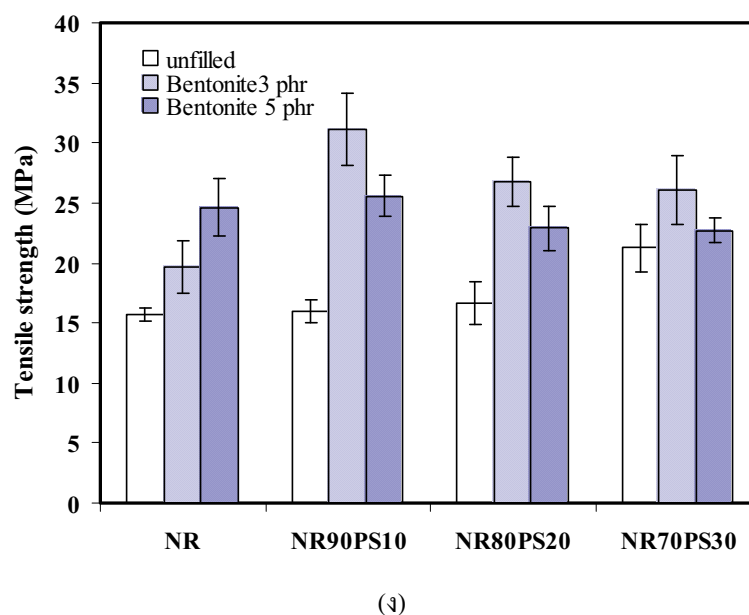
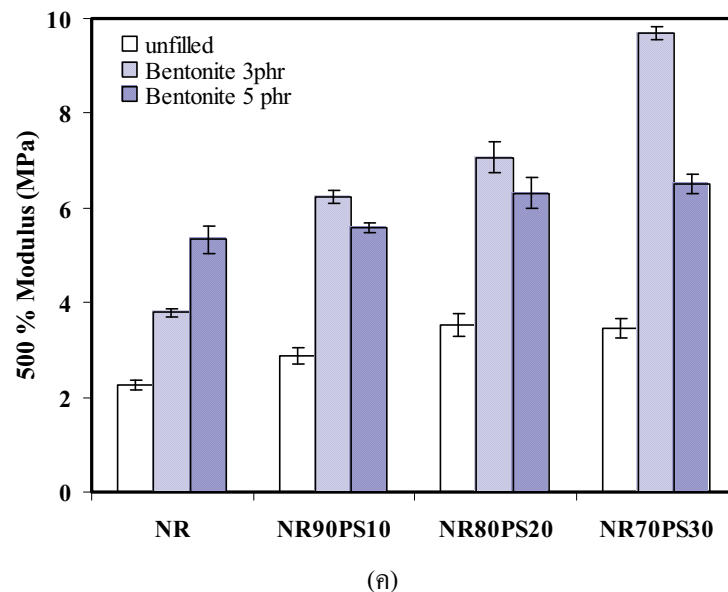
phr พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดลง (25.8 MPa) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าในกรณีที่เติมเบนทอไนท์ 3 phr ไม่ได้ไปขัดขวางการตกผลึกของสายโซ่โพลิเอทิลีนอย่างเมื่อความเครียดเพิ่มขึ้น และคาดว่าเป็นตัวช่วยให้ NR และ PS กระจายกันได้ดีขึ้น (ดังผลของภาพถ่าย SEM)



(ก)



(ข)



รูปที่ 5.5 สมบัติการทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่เติมเบนทอไท์ (ก) 100% มอดูลัส (ข) 300% มอดูลัส (ค) 500% มอดูลัส และ (ง) ความต้านทานต่อแรงดึง

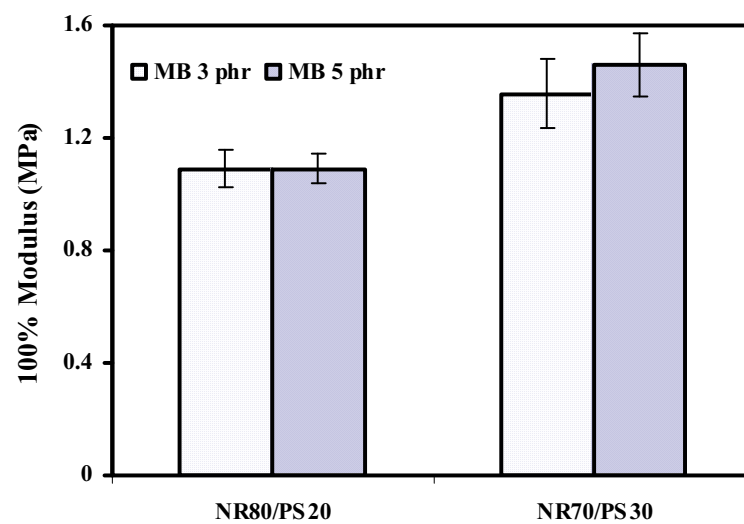
5.2.3 พอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีนที่เติมเบนทอไท์ดัดแปร

นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของการใช้เบนทอไท์ดัดแปรเป็นสารตัวเติมในพอลิเมอร์ผสม NR/PS โดยดัดแปรเบนทอไท์ด้วยออกตะเดซิลแอมโมเนียมไอออน ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม NR/PS ที่อัตราส่วน 80/20 และ 70/30 โดยเติมเบนทอไท์ดัดแปร 3 และ 5 phr ข้อมูลแสดงดังตารางที่ 5.3 และรูปที่ 5.6

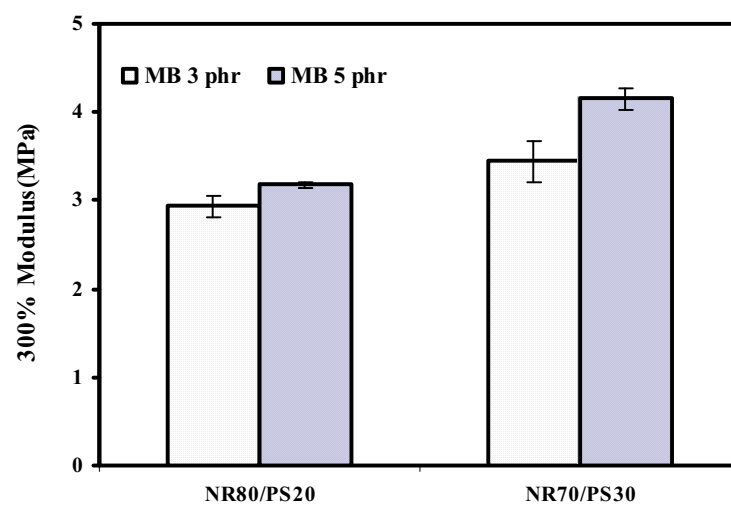
จากรูปที่ 5.6 (ก และ ข) พบว่าค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100 300 และ 500 % ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR/PS ที่เติมเบนทอไนท์ดัดแปรลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR/PS ที่เติมเบนทอไนท์ก่อนดัดแปร (ดังรูปที่ 5.5) แต่อย่างไรก็ตามพบว่าค่ามอดูลัสของพอลิเมอร์ผสมที่เติมเบนทอไนท์ดัดแปร (NR/PS/MB) ยังมีค่าสูงกว่าของยาง NR และพอลิเมอร์ผสม NR/PS เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 5.3 พบว่าค่ามอดูลัสที่ 100 และ 500 % สูงสุดเมื่อเติมเบนทอไนท์ปริมาณ 5 phr ในพอลิเมอร์ผสม NR/PS ในอัตราส่วน 70/30 โดยมีเท่ากับ 1.46 และ 7.02 MPa ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม NR/PS ในอัตราส่วน 80/20 และ 70/30 ที่เติมเบนทอไนท์ดัดแปร 3 และ 5 phr (ดังรูปที่ 5.6 (ค)) จะเห็นได้ว่าเมื่อมีปริมาณเบนทอไนท์ดัดแปรในปริมาณ 5 phr ค่าความต้านทานต่อแรงดึง (16 MPa) ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่เติม 3 phr (25.6 MPa) จากตารางที่ 5.3 จะเห็นได้ว่าทั้งในระบบพอลิเมอร์ผสม NR80/PS20 และ NR70/PS30 ให้ผลในลักษณะเดียวกัน นั่นคือค่าความต้านทานต่อแรงดึงของมีแนวโน้มลดลงเมื่อมี MB มากขึ้น ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากวัสดุพอลิเมอร์ผสมมีความแข็งมากขึ้น ทำให้ความต้านทานต่อแรงดึงที่จุดขาดลดลง เมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมในกรณีที่เติมเบนทอไนท์ (NR/PS/B) และเบนทอไนท์ดัดแปร (NR/PS/MB) จะเห็นได้ว่าให้ผลในลักษณะเดียวกัน คือเมื่อเติมสารตัวเติมมากขึ้น (5 phr) ค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดลง เนื่องมาจากการกระจายตัวของเบนทอไนท์มีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนจึงทำให้มีการเสริมแรงได้น้อยลง และทำหน้าที่เป็นสารช่วยประสานให้ NR เข้ากับ PS ได้น้อยลง

ตารางที่ 5.3 ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100, 300 และ 500% และความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR/PS ที่เติมเบนทอไนท์ดัดแปร (NR/PS/MB)

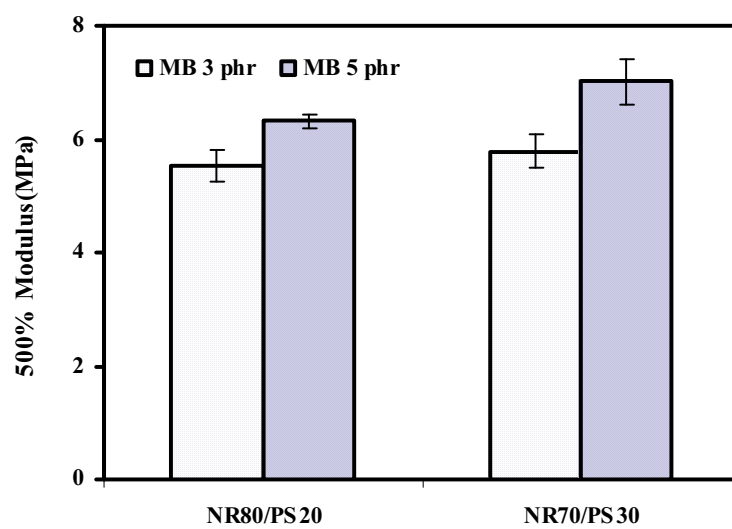
Sample	Modulus (MPa)			Tensile strength (MPa)
	100%	300%	500%	
NR80/PS20/MB3	1.09±0.07	2.93±0.13	5.54±0.28	25.97±0.75
NR80/PS20/MB5	1.09±0.05	3.18±0.04	6.33±0.12	21.86±3.67
NR70/PS30/MB3	1.36±0.12	3.44±0.24	5.79±0.29	26.22±1.16
NR70/PS30/MB5	1.46±0.11	4.15±0.13	7.02±0.40	16.28±0.70



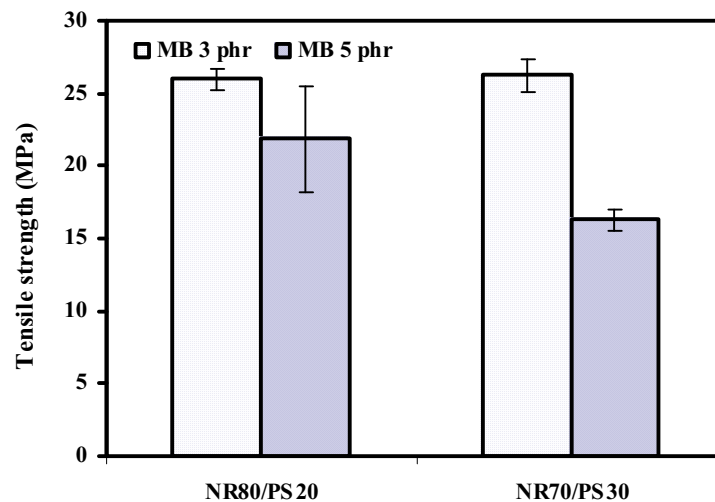
(f)



(g)



(h)



(ง)

รูปที่ 5.6 สมบัติการทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่เติมเบนทอนไนท์ดัดแปร (ก) 100% มอดูลัส (ข) 300% มอดูลัส (ค) 500% มอดูลัส และ (ง) ความต้านทานต่อแรงดึง

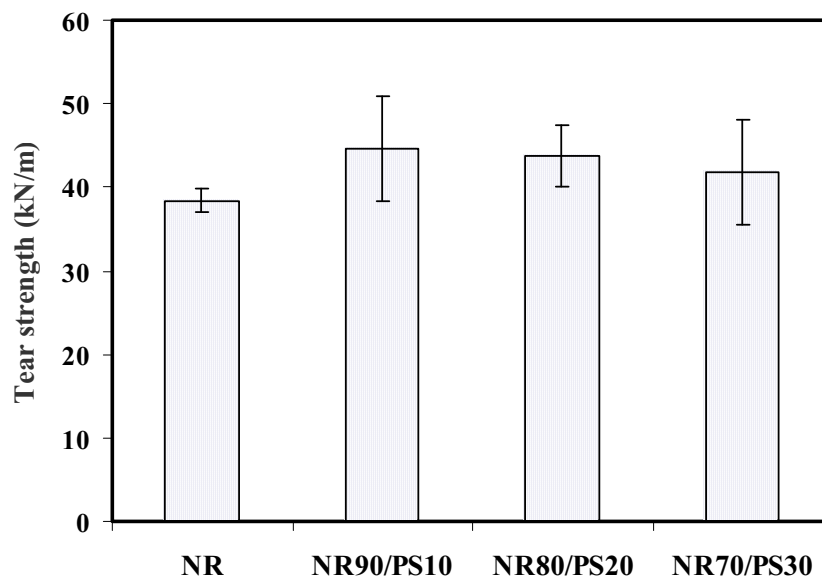
5.3 ผลการทดสอบสมบัติการทนต่อแรงฉีกขาด

5.3.1 ยางธรรมชาติ และพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีน

ผลการทดสอบการทนต่อแรงฉีกขาดของยางธรรมชาติ และพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีน ดังแสดงตารางที่ 5.4 และรูปที่ 5.7 จะเห็นว่าค่าความต้านทานต่อแรงฉีกขาดของยางธรรมชาติ เท่ากับ 38.42 kN/m ในกรณีของพอลิเมอร์ผสมพบว่าเมื่อเติมพอลิสไตรีนลงในยางธรรมชาติ (ที่ปริมาณพอลิสไตรีน 10 และ 20 phr) มีค่าความต้านทานต่อแรงฉีกขาดเท่ากับ 44.58 และ 43.76 kN/m ซึ่งจะเห็นได้ว่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ และเมื่อเติมพอลิสไตรีนในปริมาณ 30 phr พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงฉีกขาดใกล้เคียงกับยางธรรมชาติ อาจเนื่องจากพอลิสไตรีนเป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีสมบัติแข็งเปราะ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการผสมพอลิสไตรีนในยางธรรมชาติไม่ได้ช่วยปรับปรุงความต้านทานต่อแรงฉีกขาด

ตารางที่ 5.4 ค่าความต้านทานต่อแรงฉีกขาดของยาง NR และพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีน (NR/PS)

Sample	Tear strength (kN/m)
NR	38.4±1.3
NR90/PS10	44.6±5.2
NR80/PS20	43.8±3.7
NR70/PS30	41.8±5.3



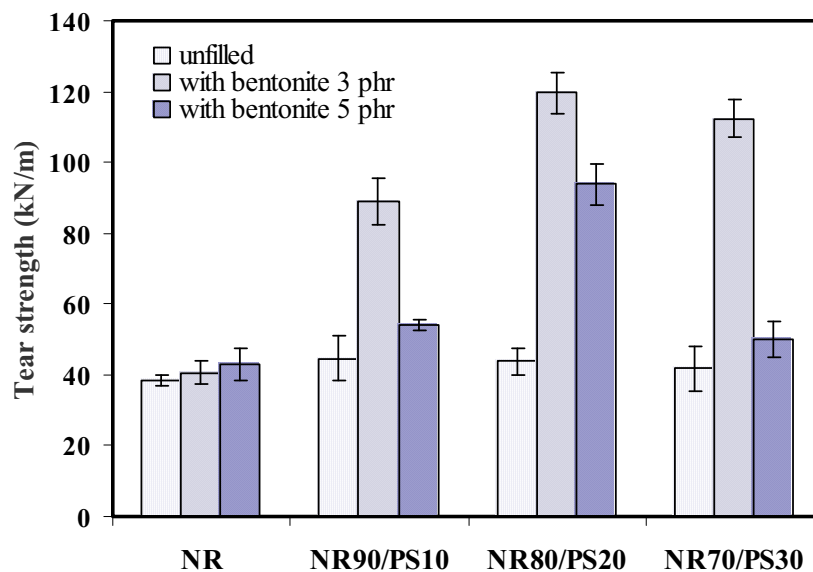
รูปที่ 5.7 ความต้านทานต่อแรงฉีกขาดของยางธรรมชาติ (NR) กับพอลิเมอร์ผสม NR/PS

5.3.2 พอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิไสไตรีนที่เติมเบนทอไนท์

ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิไสไตรีนที่ปริมาณสัดส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30 โดยเติมเบนทอไนท์ (NR/PS/B) ปริมาณ 3 และ 5 phr แสดงดังตารางที่ 5.5 และรูปที่ 5.8 จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานต่อแรงฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสมเติมเบนทอไนท์ 3 phr เพิ่มขึ้นมากเมื่อเทียบกับยาง NR และมีค่าเพิ่มสูงสุด (120 kN/m) ที่ปริมาณสัดส่วนของพอลิไสไตรีน 20 phr ในพอลิเมอร์ผสม (NR80/PS20/B3) เมื่อคิดเป็นร้อยละเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ (38.4 kN/m) และ NR80/PS20 (43.8 kN/m) ประมาณ 210 และ 190 และพอลิเมอร์ผสมที่เติมเบนทอไนท์ 3 phr มีค่าความต้านทานต่อแรงฉีกขาดเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสม NR/PS ที่ไม่เติมเบนทอไนท์ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเติมเบนทอไนท์ในปริมาณ 5 phr พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงฉีกขาดลดลงอย่างเห็นได้ชัดในทุกอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม NR/PS จากผลการศึกษานี้สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อเติมเบนทอไนท์ 3 phr ในพอลิเมอร์ผสมทำให้เกิดการกระจายตัวของเบนทอไนท์ในเนื้อพอลิเมอร์ผสมได้ดี และคาดว่าเบนทอไนท์เป็นทั้งสารเสริมแรงและเป็นตัวช่วยประสานให้พอลิไสไตรีนเข้ากับยางธรรมชาติได้มากขึ้น ส่งผลทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความต้านทานต่อแรงฉีกขาดได้มากขึ้น แต่เมื่อเติมเบนทอไนท์ในปริมาณมากขึ้น (5 phr) ทำให้การกระจายของเบนทอไนท์ในพอลิเมอร์ผสมเกิดขึ้นได้ไม่ดี ซึ่งทำให้บทบาทในการทำหน้าที่เป็นตัวช่วยประสานลดลง ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าปริมาณที่เหมาะสมในการเติมเบนทอไนท์เพื่อปรับปรุงความต้านทานต่อแรงฉีกขาดอยู่ที่ 3 phr

ตารางที่ 5.5 ค่าความต้านทานต่อแรงฉีกขาดของยางธรรมชาติเติมเบนทอไนท์ (NR/B) พอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีนที่เติมเบนทอไนท์ (NP/PS/B)

Sample	Tear strength (kN/m)
NR/B3	40.5±2.6
NR90/PS10/B3	89.0±6.21
NR80/PS20/B3	120±5.90
NR70/PS30/B3	112±10.5
NR/B5	42.8±3.5
NR90/PS10/B5	54.0±1.72
NR80/PS20/B5	93.9±5.84
NR70/PS30/B5	50.0±4.09



รูปที่ 5.8 ความต้านทานต่อแรงฉีกขาดของยางธรรมชาติเติมเบนทอไนท์ (NR/B) พอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีนที่เติมเบนทอไนท์ (NP/PS/B) 3 และ 5 phr

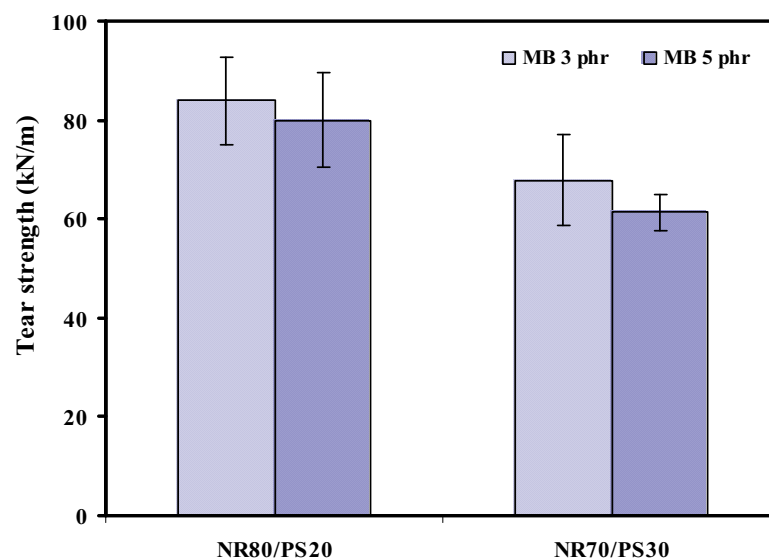
5.3.3 พอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีนเติมเบนทอไนท์ดัดแปร

ผลการทดสอบการทนต่อแรงฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสม NR/PS ที่ปริมาณสัดส่วน 80/20 และ 70/30 เติมเบนทอไนท์ดัดแปร (NR/PS/MB) ปริมาณ 3 และ 5 phr เป็นสารตัวเติม ได้ข้อมูลดังตารางที่ 5.6 และรูปที่ 5.9 จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานต่อแรงฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสมที่เติมเบนทอไนท์ดัดแปร 3 phr

เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ (38.4 MPa) และมีแนวโน้มสูงสุดเมื่อปริมาณสัดส่วนของพอลิไทรีนในพอลิเมอร์ผสม 20 phr (NR80/PS20/MB3) โดยมีค่า 83.4 kN/m และจากการทดสอบพบว่าพอลิเมอร์ผสมที่เติมเบนทอนไนท์ดัดแปร 3 phr มีค่าความต้านทานต่อฉีกขาดต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PS ที่เติมเบนทอนไนท์ก่อนดัดแปร ดังเช่น NR70/PS30 เมื่อเติมเบนทอนไนท์ 3 phr ให้ค่าความต้านทานต่อฉีกขาดเท่ากับ 112 kN/m ในขณะที่ค่าความต้านทานต่อแรงฉีกขาดของ NR70/PS30 เติมเบนทอนไนท์ดัดแปร 3 phr เท่ากับ 67.8 kN/m แสดงให้เห็นว่าการเติมเบนทอนไนท์ดัดแปรไม่ได้ช่วยปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR และ PS

ตารางที่ 5.6 ค่าความต้านทานต่อแรงฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิไทรีนที่เติมเบนทอนไนท์ดัดแปร (NR/PS/MB)

Sample	Tear strength (kN/m)
NR80/PS20/MB3	83.4±10.5
NR80/PS20/MB5	79.7±9.2
NR70/PS30/MB3	67.8±7.2
NR70/PS30/MB5	61.3±3.5



รูปที่ 5.9 ความต้านทานต่อแรงฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิไทรีนที่เติมเบนทอนไนท์ดัดแปร (NR/PS/MB) 3 และ 5 phr

5.4 ผลการทดสอบการทนต่อตัวทำละลาย

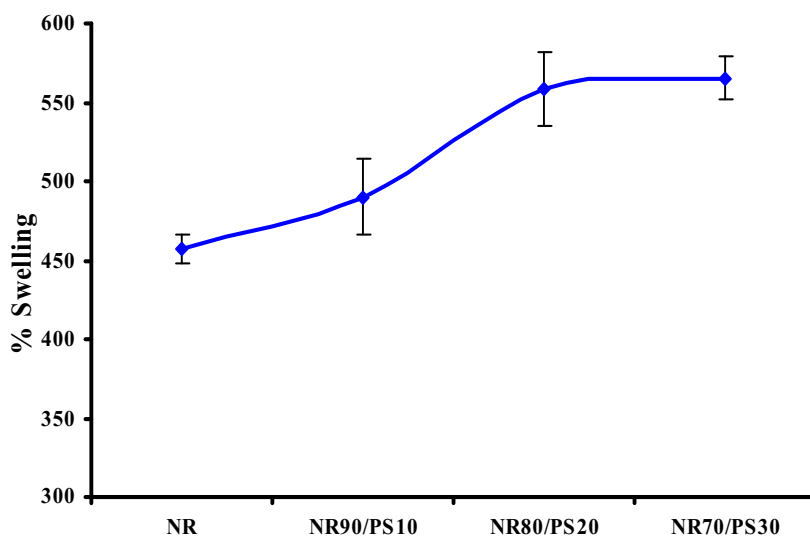
การทดสอบการทนต่อตัวทำละลายสามารถบ่งบอกถึงปริมาณการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุล การเข้ากันได้ระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีน และการเติมเบนทอไนท์ซึ่งเป็นสารอนินทรีย์ลงไปจะช่วยทำให้พอลิเมอร์ผสมทนต่อตัวทำละลายได้ดีขึ้นหรือไม่ หากยางธรรมชาติสามารถเข้ากับพอลิสไตรีนและเบนทอไนท์ได้ดีโดยไม่เกิดการขัดขวางการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติ จะส่งผลให้มีการทนต่อตัวทำละลายได้ดี นั่นคือตัวทำละลายไม่สามารถแทรกเข้าไปในสายโซ่ได้ ซึ่งตัวทำละลายที่ใช้ในการทดสอบ คือ โทลูอิน

5.4.1 ยางธรรมชาติ และพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีน

จากการทดสอบการบวมพองของยางธรรมชาติ และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR/PS โดยเตรียมชิ้นตัวอย่างขนาด 1×1 cm และนำไปแช่ในโทลูอินเป็นเวลา 48 ชั่วโมง คำนวณร้อยละการบวมพองได้ข้อมูลดังตารางที่ 5.7 และรูปที่ 5.10

ตารางที่ 5.7 ร้อยละการบวมพองทนต่อตัวทำละลายของยางธรรมชาติ (NR) และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR และ PS

Samples	% Swelling
NR	457.09±9.50
NR90/PS10	490.16±23.98
NR80/PS20	558.68±23.20
NR70/PS30	565.40±13.50



รูปที่ 5.10 ร้อยละการบวมพองของยางธรรมชาติ (NR) และพอลิเมอร์ผสม NR/PS

จากรูปที่ 5.10 แสดงผลการบวมพองของยางธรรมชาติ และพอลิเมอร์ผสม ในตัวทำละลายโทลูอิน พบว่าเมื่อเวลาผ่าน 48 ชั่วโมง ยางธรรมชาติมีค่าร้อยละการบวมพองเท่ากับ 457 ในขณะที่พอลิเมอร์ผสม ระหว่าง NR/PS ที่มีปริมาณอัตราส่วน 90/10 80/20 และ 70/30 มีค่าร้อยละการบวมพองเท่ากับ 490, 559 และ 565 ตามลำดับ จากผลการทดลองดังกล่าว จะเห็นได้ว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PS มีค่าร้อยละการบวมพอง เพิ่มขึ้นตามปริมาณพอลิสไตรีน สามารถอธิบายได้จากสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติและพอลิเมอร์ผสม คือ สายโซ่โมเลกุลยางธรรมชาติที่ผ่านการวัลคาไนซ์ ทำให้สายโซ่โมเลกุลถูกเชื่อมโยงด้วยกัมมันต์ทำให้มี ช่องว่างระหว่างโมเลกุลน้อยลง ดังนั้นทำให้เกิดการบวมพองขึ้นในชิ้นตัวอย่างน้อย ในส่วนของพอลิเมอร์ ผสมซึ่งมีปริมาณพอลิสไตรีนเพิ่มขึ้นโดยพอลิสไตรีนมีสัณฐานวิทยาเป็นแบบอสัณฐาน ดังนั้นเกิดการแทรกซึมของตัวทำละลายเข้าไปในโครงสร้างได้ง่ายและรวดเร็ว ทำให้ร้อยละการบวมพองการบวมพองมีค่าสูงตาม ปริมาณพอลิสไตรีนที่ผสมลงไป

5.4.3 พอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีนที่เติมเบนทอไนท์

ผลการบวมพองในตัวทำละลายโทลูอินของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีนที่ ปริมาณสัดส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30 เติมเบนทอไนท์ (NR/PS/B) ปริมาณ 3 และ 5 phr เป็นสารตัว เติม ได้ข้อมูลแสดงดังตารางที่ 5.8

จากตารางที่ 5.8 พบว่าร้อยละการบวมพองของพอลิเมอร์ผสมเมื่อเติมเบนทอไนท์ 3 phr ลดลงอย่าง เห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ โดยยางธรรมชาติมีร้อยละการบวมพองเท่ากับ 457 ในขณะที่ พอลิเมอร์ผสม NR/PS ที่มีปริมาณพอลิสไตรีน 10, 20 และ 30 phr เมื่อเติมเบนทอไนท์ 3 phr พบว่ามีค่า ร้อยละการบวมพองเท่ากับ 421, 428 และ 455 ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าพอลิเมอร์ผสมที่เติม เบนทอไนท์ 3 phr มีร้อยละการบวมพองลดลงเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสม NR/PS (จากตารางที่ 5.7) อาจมา จากเบนทอไนท์เป็นสารอนินทรีย์ที่ทนต่อตัวทำละลายได้ดีมากส่งผลทำให้พอลิเมอร์ผสม NR/PS ที่เติมเบน ทอไนท์ทนต่อตัวทำละลายได้เพิ่มขึ้น และทำหน้าที่เป็นตัวช่วยประสานให้พอลิสไตรีนกระจายตัวในยาง ธรรมชาติได้มากขึ้นโดยไม่ขัดขวางการเชื่อมข้ามระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยาง แต่เมื่อเติมเบนทอไนท์ใน ปริมาณ 5 phr พบว่าค่าร้อยละการบวมพองของพอลิเมอร์ผสม NR/PS เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อมีปริมาณเบน ทอไนท์เพิ่มขึ้นทำให้การกระจายของเบนทอไนท์ในพอลิเมอร์ผสมเกิดขึ้นได้ไม่ดี มีลักษณะเป็นกลุ่มก้อน ทำให้ยางพอลิสไตรีนกระจายตัวในยางธรรมชาติได้ไม่ดี ส่งผลให้การแทรกของตัวทำละลายเกิดได้ง่ายขึ้น ทำให้ร้อยละการบวมพองมีค่าสูง

ตารางที่ 5.8 ร้อยละการบวมพองของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR และ PS เติมเบนทอไนท์ (NR/PS/B)

Sample	% Swelling
NR/B3	425±10
NR90/PS10/B3	421±9
NR80/PS20/B3	429±5
NR70/PS30/B3	455±11
NR/B5	395±12
NR90/PS10/B5	458±13
NR80/PS20/B5	449±11
NR70/PS30/B5	470±9

5.4.3 พอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีนเติมเบนทอไนท์ดัดแปร

ผลการบวมพองในตัวทำละลายโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีนที่สัดส่วน 80/20 และ 70/30 โดยเติมเบนทอไนท์ดัดแปร (NR/PS/MB) ปริมาณ 3 และ 5 phr เป็นสารตัวเติมได้ข้อมูลดังตารางที่ 5.9

จากตารางที่ 5.9 พบว่าร้อยละการบวมพองของพอลิเมอร์ผสม NR80/PS20 เมื่อเติมเบนทอไนท์ดัดแปร 3 phr ลดลง (386%) เมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ (457%) เนื่องจากสารอินทรีย์ที่อยู่ในเบนทอไนท์ถูกชะล้างออกจนหมดและเมื่อผ่านกระบวนการดัดแปรเบนทอไนท์คาดว่าจะมีความเป็นขี้ผึ้งมากขึ้น ทำให้พอลิเมอร์ผสมทนต่อตัวทำละลายได้ดีขึ้น

ตารางที่ 5.9 ร้อยละการบวมพองของพอลิเมอร์ผสม NR/PS เติมเบนทอไนท์ดัดแปร (NR/PS/MB)

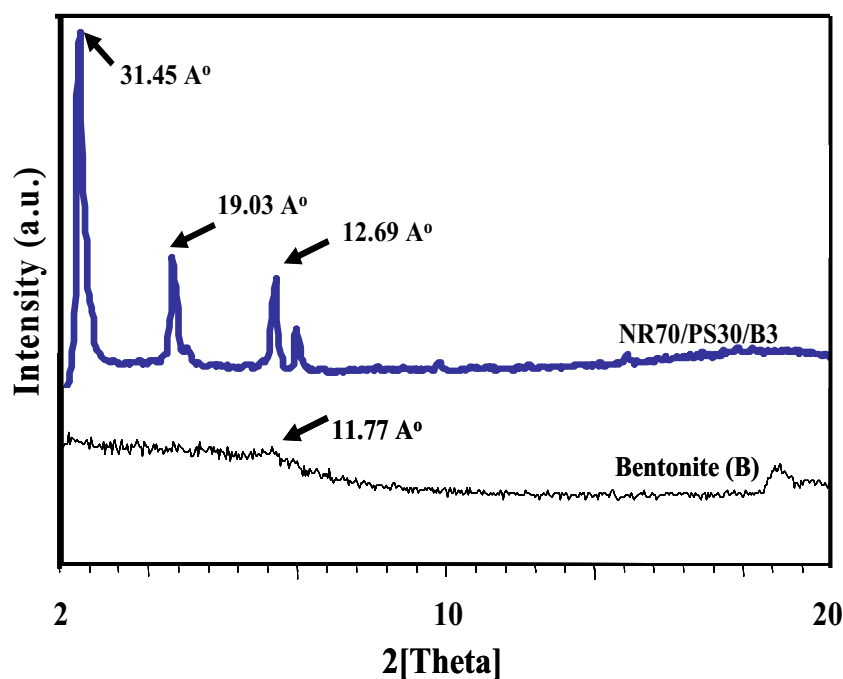
Sample	% Swelling
NR80/PS20/MB3	386.6±3.5
NR70/PS30/MB3	488.4±6.9
NR80/PS20/MB5	451.0±7.2
NR70/PS30/MB5	492.6±10.3

5.5 โครงสร้างผลึก และโครงสร้างเคมีของพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์ผสม

5.5.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเบนทอไนท์

ผลของการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเบนทอไนท์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เพื่อศึกษาการกระจายตัวและการขยายของชั้นซิลิเกตของเบนทอไนท์ในพอลิเมอร์ผสม NR/PS ได้ XRD สเปกตราดังรูปที่ 5.11

จาก XRD สเปกตรัมของเบนทอไนท์ และพอลิเมอร์ผสมที่เติมเบนทอไนท์ พบว่าสเปกตรัมของเบนทอไนท์ (รูปที่ 5.11) มีลักษณะฟีกกว้าง อาจเนื่องจากมีความเป็นอสัณฐานภายในโครงสร้างของเบนทอไนท์ เมื่อพิจารณา XRD สเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมที่เติมเบนทอไนท์ (NR70/PS30/B3) (รูปที่ 5.11) จะเห็นว่าปรากฏฟีกของเบนทอไนท์แสดงให้เห็นว่ามีความเป็นผลึกมากขึ้นและพบว่าค่าระยะห่างระนาบในพอลิเมอร์พอลิเมอร์ผสม NR/PS เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับเบนทอไนท์ นั่นคือ ระยะห่างระนาบเพิ่มขึ้น จาก 11.77 \AA เป็น 12.69 19.03 และ 31.45 \AA คาดว่าเกิดการแทรกสายโซ่โพลิเมอร์ของยางธรรมชาติและ/หรือพอลิสไตรีนในชั้นซิลิเกตของเบนทอไนท์

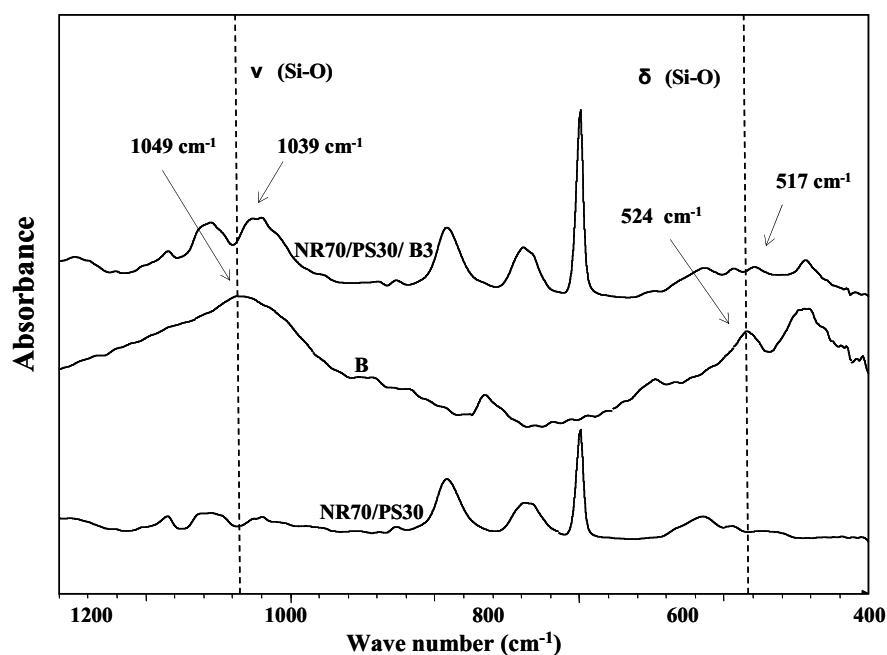


รูปที่ 5.11 XRD สเปกตรัมของเบนทอไนท์ (B) และพอลิเมอร์ผสมที่เติมเบนทอไนท์ (NR70/PS30/B3)

5.5.2 โครงสร้างเคมีของเบนทอไนท์

ผลจากการปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติโดยเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีนโดยใช้เบนทอไนท์เป็นสารตัวเติม ดังนั้นการเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางธรรมชาติ พอลิสไตรีน และเบนทอไนท์เป็นสิ่งที่ต้องพิจารณา ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเคมีของเบนทอไนท์ในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR/PS โดยใช้เทคนิค FTIR ได้ข้อมูลอินฟราเรดสเปกตราดังรูปที่ 5.12

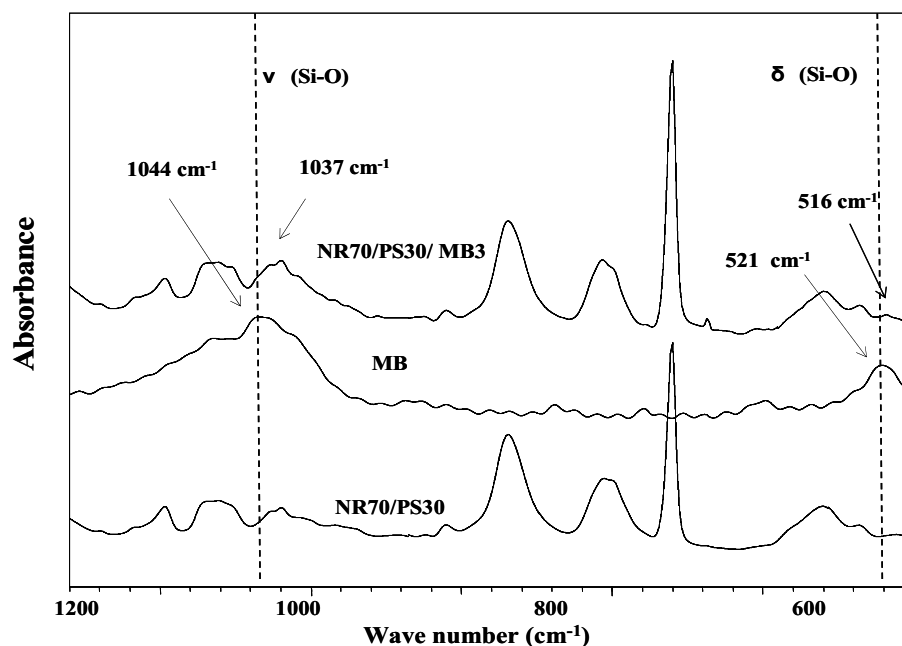
จากรูปที่ 5.12 สามารถสังเกตตำแหน่งของแถบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของเบนทอไนท์กับเบนทอไนท์ในพอลิเมอร์ผสม NR/PS พบว่าปรากฏแถบการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่เลขคลื่นแตกต่างกันคือ 1049 cm^{-1} กับ 1039 cm^{-1} ซึ่งเกิดจากการสั่นแบบยืดของ Si-O และ 524 cm^{-1} กับ 517 cm^{-1} ซึ่งเกิดจากการสั่นแบบงอของ Si-O แสดงให้เห็นว่าแถบการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของเบนทอไนท์ต่ำกว่าเดิม เนื่องจากเบนทอไนท์เกิดอันตรกิริยากับยางธรรมชาติและพอลิสไตรีน โดยสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนแทรกเข้าไปในชั้นของซิลิเกตดัง ทำให้ต้องใช้พลังงานสูงขึ้นเพื่อให้พันธะ Si-O เกิดการสั่น



รูปที่ 5.12 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีน (NR70/PS30) เบนทอไนท์ (B) และพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนที่เติมเบนทอไนท์ 3 phr (NR70/PS30/B3)

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเคมีของเบนทอไนท์ดัดแปรในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR/PS โดยใช้เทคนิค FTIR ได้ข้อมูลอินฟราเรดสเปกตรัมดังรูปที่ 5.13 สามารถสังเกตตำแหน่งของแถบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของเบนทอไนท์ กับเบนทอไนท์ในพอลิเมอร์ผสม NR/PS พบแถบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่เลขคลื่นแตกต่างกันคือ 1044 cm^{-1} กับ 1037 cm^{-1} ซึ่งเกิดจากการสั่นแบบยืดของ Si-O และ 521 cm^{-1} กับ 516 cm^{-1} ซึ่งเกิดจากการสั่นแบบงอของ Si-O แสดงให้เห็นว่าแถบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของเบนทอไนท์ต่ำกว่าเดิม เนื่องจากเบนทอไนท์เกิดอันตรกิริยากับยางธรรมชาติและพอลิสไตรีน โดยสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนแทรกเข้าไปในชั้นของซิลิเกต ผลจากการทดลองนี้สอดคล้องกับรายงานของ Varghese et al., (2004) ศึกษาผลการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างยาง NR กับพอลิยูรีเทนเสริมแรงด้วยซิลิเกตสังเคราะห์

เมื่อเปรียบเทียบตำแหน่งของแถบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของเบนทอไนท์กับเบนทอไนท์ก่อนและหลังดัดแปรในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR/PS พบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR/PS ที่เติมเบนทอไนท์ 3 phr มีการเปลี่ยนตำแหน่งของแถบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดมากกว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR/PS ที่เติมเบนทอไนท์หลังดัดแปรเท่ากับ 3 และ 2 cm^{-1} ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนสามารถแทรกเข้าไปในชั้นซิลิกาของเบนทอไนท์ได้ดีกว่าเบนทอไนท์ดัดแปร



รูปที่ 5.13 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีน (NR70/PS30) เบนทอไนท์ดัดแปร MB) และพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนที่เติม เบนทอไนท์ 3 phr (NR70/PS30/MB3)

5.6 สันฐานวิทยาของยางธรรมชาติ พอลิเมอร์ผสม และพอลิเมอร์ผสม

5.6.1 ลักษณะทางกายภาพของยางธรรมชาติ พอลิเมอร์ผสม และพอลิเมอร์ผสมด้วยกล้อง

จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการทนต่อแรงดึงมาศึกษาสันฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายตัวของพอลิสไตรีนในยางธรรมชาติ และการเติม เบนทอไนท์ลงไปในพอลิเมอร์ผสม NR/PS มีผลต่อการกระจายตัวของพอลิสไตรีนในยางธรรมชาติหรือไม่ แสดงดังรูปที่ 5.14

จากรูปที่ 5.14 (ก) เป็นภาพถ่าย SEM ของยางธรรมชาติ พบว่ามีลักษณะพื้นผิวเรียบหลังจากผ่านการดึง เมื่อพิจารณารูปที่ 5.14 (ข) แสดงสันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR70/PS30 พบว่าการกระจายตัวของอนุภาคพอลิสไตรีนในยางธรรมชาติไม่สม่ำเสมอมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อน เนื่องจากพอลิสไตรีนมีปริมาณมากจึงส่งผลทำให้พอลิเมอร์ผสมเกิดการแตก เมื่อพิจารณาภาพถ่าย SEM ของพอลิเมอร์

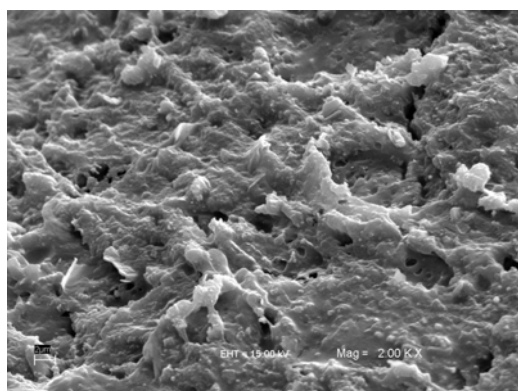
ผสมระหว่าง NR70/PS30 ที่เติมเบนทอไนท์ 3 phr ดังรูปที่ 5.14 (ค) พบว่าการกระจายตัวของอนุภาคพอลิสไตรีนในยางธรรมชาติมีลักษณะสม่ำเสมอและขนาดใกล้เคียงกัน คือประมาณ 1 ไมครอน รูปร่างของอนุภาคไม่เป็นทรงกลม เนื่องจากเบนทอไนท์ทำหน้าที่เป็นตัวช่วยประสานระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีน ทำให้พอลิสไตรีนเข้ากับยางธรรมชาติได้มากขึ้น และเบนทอไนท์ที่เติมลงไปกระจายตัวอยู่ในพอลิเมอร์ผสมได้ดี ส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลสูงขึ้น

พอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR70/PS30 ที่เติมเบนทอไนท์ 5 phr แสดงดังรูปที่ 5.14 (ง) พบว่ามีการกระจายตัวของพอลิสไตรีนไม่สม่ำเสมอเมื่อเทียบกับปริมาณเบนทอไนท์ 3 phr อนุภาคของพอลิสไตรีนแตกต่างกันซึ่งมีขนาดอนุภาคประมาณ 1-2 ไมครอน และในขณะเดียวกันจากภาพถ่ายจะเห็นได้ว่ามีเบนทอไนท์กระจายตัวเป็นกลุ่มก้อนในพอลิเมอร์ผสม

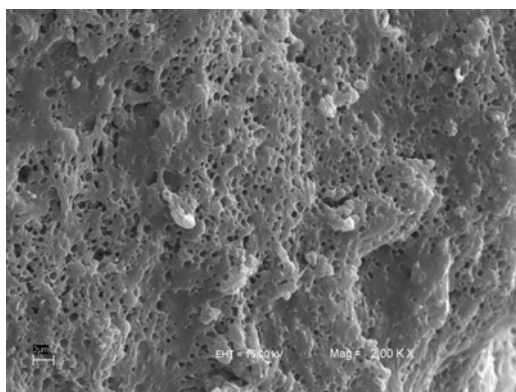
จากการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม และพอลิเมอร์ผสมที่เติมเบนทอไนท์ สันนิษฐานได้ว่า การเติมเบนทอไนท์ก่อนดัดแปรโครงสร้าง 3 phr ทำหน้าที่เป็นตัวช่วยประสานให้ PS ผสมกับ NR มากขึ้น ในขณะเดียวกันไม่ได้ไปขัดขวางกระบวนการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติ ดังนั้นจึงสามารถใช้เป็นสารช่วยผสมในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR/PS ได้ส่งผลทำให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อแรงฉีกขาด และการทนต่อตัวทำละลายเพิ่มขึ้น



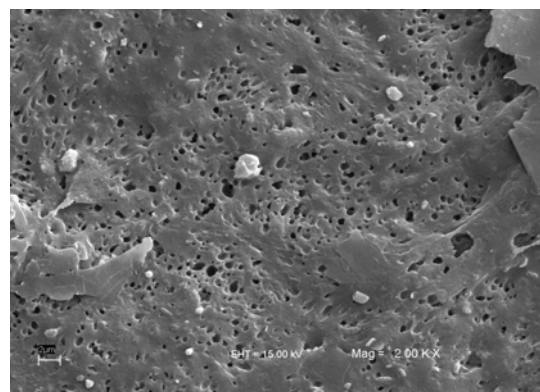
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 5.14 ภาพถ่าย SEM ของยางธรรมชาติ (NR) (ก) พอลิเมอร์ผสม NR/PS (ข) พอลิเมอร์ผสมเติมเบนทอไนท์ 3 phr (ค) และพอลิเมอร์ผสมเติมเบนทอไนท์ 5 phr (ง)

6. สรุปผลการทดลอง

ผลการศึกษาความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิไทรีน (NR/PS) และพอลิเมอร์ผสม ที่เติมเบนทอไนท์และเบนทอไนท์ดัดแปรเป็นสารตัวเติม พบว่าค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100, 300 และ 500% เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ NR และ NR/PS และให้ค่าสูงสุดที่พอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR/PS ในอัตราส่วน 70/30 เมื่อเติมเบนทอไนท์ 3 phr ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100, 300 และ 500% เพิ่มขึ้นประมาณ 90, 160 และ 180% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสม NR/PS ผลการศึกษาความต้านทานต่อแรงฉีกขาด พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงฉีกขาดเพิ่มขึ้นมากเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ และมีแนวโน้มสูงสุดที่พอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR/PS ที่ปริมาณอัตราส่วน 80/20 เติมเบนทอไนท์ 3 phr โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติและ NR80/PS20 ประมาณ 210 และ 190 % ผลการศึกษาการทนต่อตัวทำละลายพบว่าร้อยละการบวมพองของพอลิเมอร์ผสม เมื่อเติมเบนทอไนท์ดัดแปร 3 phr ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ NR, NR/PS และ NR/PS/B แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PS/MB สามารถทนต่อตัวทำละลายได้ดีที่สุด ผลจากการศึกษาโครงสร้างเคมีและโครงสร้างผลึกของเบนทอไนท์ในพอลิเมอร์ผสม ปรากฏหลักฐานว่ามีสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติและพอลิไทรีนเกิดการแทรกเข้าไปในชั้นซิลิเกตของเบนทอไนท์ จากภาพถ่าย SEM สามารถสังเกตลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม พบว่าพอลิเมอร์ผสม ที่เติมเบนทอไนท์และเบนทอไนท์ดัดแปรสามารถทำหน้าที่เป็นตัวช่วยประสานให้ PS กระจายตัวใน NR ได้ดีขึ้น ส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลและการบวมพองต่อตัวทำละลายดีขึ้น และเมื่อเติมเบนทอไนท์ 3 phr สามารถทำหน้าที่เป็นตัวประสานระหว่างวัฏภาคของพอลิไทรีนกับยางธรรมชาติได้ดีกว่าเติมเบนทอไนท์ดัดแปร

ด้านเศรษฐศาสตร์เกี่ยวกับต้นทุน

1. การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR และ PS โดยใช้เบนทอไนท์เป็นสารตัวเติมในสถานะลาเทกซ์ ใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายน้อยกว่าการเตรียมในสถานะหลอม เนื่องจากในกระบวนการเตรียมไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องบดผสมที่อุณหภูมิสูง
2. สารตัวเติมที่ใช้ในการทดลองคือเบนทอไนท์ ซึ่งมีราคาถูกเมื่อเทียบกับเคลย์สังเคราะห์ที่ใช้เป็นสารตัวเติมเพื่อเสริมแรงในพอลิเมอร์ผสม เช่น ฟลูโอโรเฮกโทไรท์ และหาซื้อได้ง่ายในประเทศไทย

ตาราง ก ประเมินค่าใช้จ่ายในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมในสถานะลาเทกซ์ 1 กิโลกรัม

สารเคมี	ค่าใช้จ่าย
ขั้นตอนการเตรียมพอลิไทรีนลาเทกซ์ โดยประมาณ	200 บาท
น้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียสูง 1 ลิตร	120 บาท
สารเคมียาง (กำมะถัน สารกระตุ้น สารตัวเร่ง)โดยประมาณ	
รวม	320 บาท

7. ข้อเสนอแนะที่คาดว่าจะควรรวิจัยเพิ่มเติม และวิธีการที่ควรพัฒนาต่อยอดสู่ภาคปฏิบัติจริง

1. ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR และ PS โดยใช้ระบบวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันและใช้เบนทอนไนท์เป็นสารตัวเติมในสถานะลาเท็กซ์ในระดับอุตสาหกรรม
2. ศึกษาเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR และ PS โดยใช้เบนทอนไนท์เป็นสารตัวเติมในสถานะหลอม
3. ศึกษาแนวทางในการผลิตผลิตภัณฑ์โฟมยาง เช่นเบาะรองนั่ง พรมปูพื้น วัสดุกันกระแทก ผลิตภัณฑ์หล่อเบ้า เช่นหุ่นจำลอง เป็นต้น

8. เอกสารอ้างอิง

- สรินทร ลิ้มปนาท เต็มศักดิ์ ศรีศิริรินทร์ และ วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา. 2002. ผลของความเข้มข้นของเกลือแอลคิลแอมโมเนียมที่มีต่อกระบวนการ intercalation ในดินเบนทอนไนท์ (ออนไลน์). สืบค้นจาก : http://www.scisoc.or.th/stt/28/web/content/P_16/P43.htm [28 สิงหาคม 2549]
- Araújo, E.M., Mélo, T.J.A., Santana, L.N.L., Neves, G.A., Ferreira, H.C. and Lira, H.L. 2004. The influence of organo-bentonite clay on the processing and mechanical properties of nylon 6 and polystyrene composite. *Materials Science and Engineering*, 11 : 175 - 178.
- 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.
- Asaletha, R., Kumaran, M.G. and Thomas, S. 1999. Thermoplastic elastomers from blends of polystyrene and natural rubber: morphology and mechanical properties. *European Polymer Journal*, 35 : 253 - 271.
- Bower, D.I. 2002 *An Introduction to polymer physics*. Cambridge University press. Cambridge UK. Chapter 8 220 - 246.
- Brosse, J.C., Campistron, I., El Hamdaoui, A., Houdayer, S., Reyx, D. and Ritoit-Gillier, S. 2000. Chemical modification of polydiene elastomers : A survey and some recent results. *Journal of Applied Polymer Science*, 78 : 1461 - 1477.
- Essawy, H. and El-Nashar D. 2004. The use of montmorillonite as a reinforcing and compatibilizing filler for NBR/SBR rubber blend. *Polymer Testing*, 23 : 803 - 807.
- Ismail, H. and Suryadiansyah. 2002. Thermoplastic elastomers based on polypropylene/natural rubber and polypropylene/recycle rubber blends. *Polymer Testing*, 21 : 389-395.
- Lee, J.Y. and Lee, H.K. 2004. Characterization of organobentonite used for polymer nanocomposites. *Materials Chemistry and Physics*, 85 : 410-415.
- Mathew, A.P. and Thomas, S. 2000. Izod impact behavior of natural rubber/polystyrene interpenetrating polymer networks. *Polymer Testing*, 25 : 49 - 55.
- Qiu, L. and Qu, B. 2006. Preparation and characterization of surfactant-free polystyrene/layered double hydroxide exfoliated nanocomposite via soap-free emulsion polymerization. *Journal of Colloid and Interface Science*, 301 : 347 - 351.

- Varghese, S. and Karger, K.J. 2003. Natural rubber-based nanocomposites by latex compounding with layered silicates. *Polymer*, 44 : 4921 - 4927.
- Varghese, S., Gatos, K.G., Apostolov, A.A. and Karger, K.J. 2004. Morphology and mechanical properties of layered silicate reinforced natural and polyurethane rubber blends produce by latex compounding. *Journal of Applied Polymer Science*, 92 : 543 - 551.
- 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. *European Polymer Journal*, 40 : 2513 - 2521.
- Wang, T., Wang, M., Zhang, Z., Ge, X. and Fang, Y. 2006. Preparation of core (PBA/layered silicate)-shell (PS) structured complex via γ -ray radiation seeded emulsion polymerization. *Materials Letters*, 60 : 2544 – 2548.

ภาคผนวก

คำชี้แจงของนักวิจัยต่อข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ

ข้อคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิ	คำชี้แจงของผู้วิจัย
1. เพิ่มเติมคำสำคัญในบทคัดย่อ	1. ได้เพิ่มเติมคำสำคัญในบทคัดย่อ
2. ตรวจสอบคำและความถูกต้องทางวิชาการในการใช้ภาษารายงาน	2. ได้ตรวจสอบคำและปรับแก้ไขความถูกต้องทางวิชาการในการใช้ภาษารายงานแล้ว
3. นักวิจัยควรทบทวนรูปแบบและเนื้อหาในคำแนะนำของการเตรียมรายงานฉบับสมบูรณ์ในโครงการ SPR ซึ่งรายงานนี้จะสรุปส่วนที่เกี่ยวข้องจริงให้กระชับได้มากกว่านี้ เช่นทฤษฎี (หัวข้อ 3.1) ส่วนของรายงานผลทดสอบทางกายภาพ : Tensile กับ Tear ก่อนข้างขึ้นก่อน น่าจะสรุปได้ทั้งภาพและตาราง	3. ได้สรุปเนื้อหาของทฤษฎีในหัวข้อ 3.1.1 – 3.1.4 ให้กระชับแล้ว และในส่วนของการรายงานผลทดสอบทางกายภาพ : Tensile กับ Tear ได้ปรับปรุงการนำเสนอแล้ว
4. หน้า 2 และ 12 ใช้คำว่า “หลอมเหลว” น่าจะผิดความหมาย	4. ได้เปลี่ยนคำว่า “หลอมเหลว” ในหน้า 2 และ 12 เป็น คำว่า “หลอม”
5. ในหัวข้อ 3.2 และ 3.3 นั้น สรุปแล้ววิธีการที่วิจัยครั้งนี้มีความสับสนหรือมีแนวคิดต่อจากงานวิจัยที่อ้างถึงว่าเกี่ยวข้องกับเรื่องใดมากที่สุด	5. ได้ปรับเปลี่ยนงานวิจัยที่อ้างถึงว่าเกี่ยวข้องแล้วโดยได้นำเนื้อหาบางงานวิจัยที่เกี่ยวข้องน้อยออก
6. หน้า 16 ใช้คำไม่ถูกต้อง ลูกกลิ้งบด (ball-mill) เพราะว่าลูกกลิ้งบด หมายถึง two roll mill และบรรทัดที่ 4 จากข้างล่างให้ตรวจสอบการทำงานว่านำน้ำเข้าไป “กรองด้วยผ้าขาวบาง” ทำได้จริงหรือไม่	6. ได้แก้ไขโดยตัดคำว่าลูกกลิ้งบดออกแล้วในหน้า 16 และจากการตรวจสอบการทำงานว่านำน้ำเข้าไป “กรองด้วยผ้าตะแกรง”
7. หน้า 17 ให้ตรวจสอบความถูกต้อง ใช้คำว่า พอลิเมอร์ผสมและคอมโพสิตในลักษณะ 2 ความหมายนี้ใช้ถูกต้องหรือไม่ ทั้งไปใช้กันหรือไม่	7. ได้ปรับเปลี่ยนใช้คำว่า “พอลิเมอร์ผสม” แทนคอมโพสิตแล้ว
8. หน้า 18 ข้อ 4.6.2 ใช้ ASTM เบอร์อะไร	8. หน้า 18 ได้เพิ่มเติมข้อ 4.6.2 ใช้ ASTM เบอร์ 412
9. หน้า 21 รูปที่ 5.3 การตรวจสอบความสมบูรณ์ของรูป ผลการวิจัยส่วนไหนที่อธิบายได้ว่า “คอมโพสิตแสดงพฤติกรรมการแตกหักเนื่องจากความเครียด”	9. ได้แก้ไขและตรวจสอบคำอธิบายใหม่แล้ว
10. หน้า 22 และ 24 ที่ใช้คำพูด “ไม่มีผลกระทบต่อการแตกหัก” ไม่น่าถูกต้อง	10. ได้แก้ไขปรับเปลี่ยนคำอธิบายในเนื้อความใหม่แล้ว

11. ผลการทดลองเกี่ยวกับค่า Tensile, Modulus และ Tear ในทุกๆ การทดสอบมีจำนวนชิ้นจำนวนซ้ำเพียงพอและวิเคราะห์ทางสถิติหรือไม่ การวิจารณ์ผลการวิจารณ์จำนวนซ้ำให้ผู้อ่านมั่นใจว่าน่ายอมรับได้ เช่นตารางที่ 5.1 ค่า Tensile ของ NR, NR90/PS10 และ NR80/PS20 ก่อนข้างไม่ต่างกันเลย และค่า NR ก็ค่อนข้างต่ำกว่าที่ควรเป็นมาก	11. ผลการทดลองเกี่ยวกับค่า Tensile, Modulus และ Tear ในทุกๆ การทดสอบมีจำนวนซ้ำเพียงพอ 7 ชิ้นตัวอย่าง ค่า NR ที่ได้จากการทดลองใกล้เคียงกับบางวารสารที่รายงานไว้
12. หน้า 34 ผลการทดลองของ NR/PS/B เป็น %การบวม 458, 449, 470 ไม่เรียงตามลำดับในการลดลง น่าจะมีค่าตอบหรือทดลองซ้ำ	12. %การบวม 458, 449 มีค่าไม่แตกต่างกันมาก เนื่องจากปริมาณ NR/PS แตกต่างกัน 10 phr
13. หน้า 36 รูปที่ 5.12 : ไม่น่าจะแสดงเป็นกราฟได้ เพราะมีการทดสอบเพียง 2 จุดเท่านั้น	13. ได้เสนอผลการทดลองในรูปแบบตารางเพียงอย่างเดียว
14. หน้า 41 ไม่มีข้อมูลมาเปรียบเทียบว่าใช้พลังงานในการอบแห้งนั้น จะเป็นการใช้พลังงานมากกว่าหรือทำเคมีในการแปรรูปจากน้ำยางเป็นยางแห้ง	14. ในการใช้งานรูปนำยางขึ้นซึ่งไม่ต้องผ่านกระบวนการเตรียมเป็นยางแห้ง คาดว่าจากกระบวนการเริ่มต้นน่าจะใช้พลังงานน้อยกว่าการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากยางแห้ง
15. -หัวข้อเสนอแนะหน้า 3 และหน้า 42 น่าจะเป็นแนวเดียวกัน และต้องมีความชัดเจนว่า ควรพัฒนาคอมโพสิตนี้เพื่อการนำไปเป็นรูปอะไร กรณียกตัวอย่างปูพื้น ไม่น่าใช่ เพราะไม่มีมูลค่าสูงพอที่จะใช้วัสดุนี้ และถ้านำไปเป็นรูปยางฟอง, dipping, หล่อเป็นผลิตภัณฑ์อะไร และจะเป็นไปได้หรือที่จะพัฒนาในระดับอุตสาหกรรมในเมื่อหน้าคำแนะนำข้อ 3 หน้า 42 ขัดแย้งกับหัวข้อการวิเคราะห์ต้นทุนหน้า 41	15. ได้แก้ไขในส่วนของข้อเสนอแนะ