สมบัติของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางโบรโมบิวไทล์ที่มีสารตัวเติมแบบ layered – silicates

โดย

การุณย์ เจียมจิตศิริพงษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
พ.ศ. 2551

สมบัติของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางโบรโมบิวไทล์ที่มีสารตัวเติมแบบ layered – silicates

โดย

การุณย์ เจียมจิตศิริพงษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
พ.ศ. 2551

Vulcanizate Properties of Natural Rubber/Bromobutyl Rubber Blends Filled with Layered – Silicates.

By

Mr. Karoon Jiamjitsiripong

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Thammasat University

2008

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

วิทยานิพนธ์

ของ

นายการุณย์ เจียมจิตศิริพงษ์

เรื่อง

สมบัติของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางโบรโมบิวไทล์
ที่มีสารตัวเติมแบบ layered – silicates

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

เมื่อ วันที่ 29 พฤษภาคม พ.ศ. 2552

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ _____

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพิชชา รุ่งโรจน์นิมิตรชัย)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ _____

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แคทลียา ปัทมพรหม)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ _____

(ดร.นุชนาฏ ณ ระนอง)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ _____

(ดร. วิยงค์ กังวานศุภมงคล)

คณบดี _____

(รองศาสตราจารย์ ดร. อุรุยา วีสกุล)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติการซึมผ่านของก๊าซในยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางโบรโมบิวไทล์ ด้วยการใช้สารตัวเติมแบบแผ่นต่างชนิดกัน ประกอบไปด้วย แร่ดินเหนียว Montmorillonite, แร่ดินเหนียว Kaolinite, แร่ดินเหนียวขัดสี (Bleaching Clay) และแป้งทัลคัม นอกจากนี้ ยังได้ศึกษาผลของการปรับสภาพผิวของสารตัวเติม รวมถึงการใช้ยางอีพอกซีไดส์ (Epoxidised Natural Rubber, ENR) เป็นตัวประสาน (Compatibilizer) เพื่อทำให้วัสดุทั้งสองเข้ากันได้มากขึ้น และทำให้สมบัติต่างๆ ดีขึ้นอีกด้วย โดยที่แร่ดินเหนียว Montmorillonite ทำการปรับสภาพผิวด้วย octadecylamine (C_{18}) ส่วนแร่ดินเหนียว Kaolinite และแร่ดินเหนียวขัดสี ทำการปรับสภาพผิวด้วย bis(3–trietyoxylpropyl)–tetrasulfane (Si–69) แร่ดินเหนียวที่ผ่านการปรับสภาพผิวแล้วจะนำไปทดสอบลักษณะเฉพาะเพื่อศึกษาปริมาณ coupling agent โดยใช้เครื่อง Thermogravimetric Analysis (TGA) และศึกษาระยะระหว่างชั้นของแร่ดินเหนียวที่เปลี่ยนไปภายหลังการปรับสภาพโดยใช้เครื่อง X – Ray Diffraction (XRD) สำหรับยางคอมพอสิตทั้งหมดจะวัดคุณสมบัติการดึงยืด, ความแข็งที่ผิว, การยุบตัวเนื่องจากแรงอัด, ความทนทานต่อการสึกหรอ, และสมบัติการซึมผ่านของก๊าซ ซึ่งจากการทดสอบสมบัติต่างๆ ของยางคอมพอสิทโดยเปรียบเทียบชนิดของสารตัวเติม พบว่า คอมพอสิทของสารตัวเติมทั้งก่อนและหลังการปรับสภาพผิวมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน กล่าวคือ คอมพอสิทของแร่ดินเหนียว Montmorillonite มีสมบัติเด่นในด้านความแข็งที่ผิวและความทนทานต่อการสึกหรอ ในขณะที่ คอมพอสิทของแร่ดินเหนียว Kaolinite มีสมบัติเด่นในด้านสมบัติการดึงยืด คอมพอสิทของแร่ดินเหนียวขัดสี มีสมบัติเด่นในด้านมอดูลัสที่สูง หลังการสภาพผิว คอมพอสิทของแร่ดินเหนียว Montmorillonite และ Kaolinite มีสมบัติต่างๆ ที่ดีขึ้น ในขณะที่ คอมพอสิทของแร่ดินเหนียวขัดสีมีค่าสมบัติต่างๆ ด้อยลงหลังการปรับสภาพผิว เมื่อพิจารณาผลของตัวประสาน (ยาง ENR) พบว่า การใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน ทำให้ยางคอมพอสิทมีโมดูลัส, ความแข็งแรงที่ผิวและความทนทานต่อการสึกหรอที่ดีขึ้น ในด้านสมบัติการซึมผ่านของก๊าซ คอมพอสิทของแป้งทัลคัม มีคุณสมบัติการกักเก็บก๊าซได้ดีที่สุด เนื่องจาก แป้งทัลคัมสามารถลดการซึมผ่านของก๊าซได้มากเกือบเป็นสองเท่าของสารตัวเติมชนิดอื่น โดยข้อเสียของแป้งทัลคัม คือ ความแข็งแรงต่ำและการสึกหรอที่สูง อย่างไรก็ดีผู้วิจัยพบว่า การนำยาง ENR มาใช้ในสูตรยางที่มีแป้งทัลคัมช่วยกักเก็บก๊าซ สามารถช่วยลดการสึกหรอและเพิ่มสมบัติเชิงกลให้ยางคอมพอสิทได้เป็นอย่างมาก โดยไม่เสียสมบัติการกักเก็บก๊าซไป

Abstract

In this study, the improvement in mechanical properties and gas permeability of natural rubber/bromobutyl rubber (NR/BIIR) blends has been investigated when using platelike–structured particles as reinforcing fillers. These fillers include montmorillonite clay, kaolinite clay, bleaching clay and talcum. Surface modifications of fillers, as well as addition of Epoxidised Natural Rubber (ENR) as compatibilizer, were studied to further improve the properties of these rubber composites. Treatments of clays included cation–exchange reaction with octadecylamine for montmorillonite clay and silylation with silane–69 for kaolinite and bleaching clays. A thermagravimetric analyzer (TGA) was used to analyze the thermal characteristics of clay particles and %weight of the coupling agent incorporated onto clay surfaces after surface treatment. X-ray powder diffraction patterns of clay particles were obtained using an X-ray Diffractometer (XRD). The properties investigated here were tensile properties, surface hardness, compression set, abrasion resistance, and gas permeability. The results indicated that the untreated montmorillonite and kaolinite provided the highest abrasion and mechanical properties, respectively. On the other hand, untreated bleaching clay provided high modulus. After surface modification, the properties of treated montmorillonite and kaolinite composites were improved, whereas the properties of the treated bleaching clay dropped significantly. Moreover, the addition of 10 phr of ENR to the rubber composites has promoted faster cure, higher surface hardness and higher abrasion resistance to the composites of NR/BIIR blend. In term of gas permeability, talcum composite possessed twice as high gas barrier property as composites of other plate–like fillers, even with organophilic surface treatment. However, the disadvantages of talcum were low strength and abrasion resistance. The incorporation of ENR compatibilizer in the talcum composite could improve the abrasion resistance and mechanical properties significantly while maintaining good gas barrier property.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แคทลียา ปัทมพรหม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำในด้านต่างๆ พร้อมทั้งให้ความช่วยเหลือผู้เขียนมาโดยตลอด จนทำให้งานวิจัยนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณ คุณจิตตรา ดอกบัว, คุณสากล ม่วงเขียว, คุณกิตติ เมธาวงศ์, คุณสมศักดิ์ หิริรักษ์ดำรง, คุณไพรัช รักพืช, คุณเยาวลักษณ์ ระติกุล และคุณขวัญมนัส มิตรสุพรรณ เจ้าหน้าที่สังกัดภาควิชาวิศวกรรมเคมี ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในด้านอุปกรณ์การทดลองและการใช้ห้องปฏิบัติการรวมทั้งคำแนะนำในด้านต่างๆที่เป็นประโยชน์ ขอขอบคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมเคมีทั้งที่ มศว จุฬาฯ และธรรมศาสตร์ ทุกคนที่ให้การช่วยเหลือเป็นอย่างดี เพื่อนเก่าที่ให้กำลังใจ และสุดท้าย ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ คุณป้าและครอบครัวที่สนับสนุนและให้กำลังใจผู้เขียนมาโดยตลอด

จึงขอกล่าวนามและแสดงความขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

การุณย์ เจียมจิตศิริพงษ์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

พ.ศ. 2552

สารบาญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) ..... (1)

บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) ..... (2)

กิตติกรรมประกาศ ..... (3)

สารบัญตาราง ..... (8)

สารบัญภาพประกอบ ..... (10)

บทที่

1. บทนำ 1-3

2. ผลงานวิจัยและงานเขียนอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง 4-26

2.1 ยางธรรมชาติ 4

2.2 ยางโบรโมบิวไทล์ 6

2.2.1 โครงสร้างและการผลิต 6

2.2.2 สมบัติทั่วไป 8

2.2.3 สมบัติทั่วไป 8

2.3 การศึกษาในอดีตเรื่องยางผสมยองยางโบรโมบิวไทล์และยางธรรมชาติ 9

2.4 สารเคมีสำหรับยาง 10

2.4.1 สารทำให้ยางคงรูป 10

2.4.2 สารตัวเร่งปฏิกิริยา 11

2.4.3 สารกระตุ้นปฏิกิริยา 11

2.4.4 สารตัวเติม 12

2.4.5 สารทำให้ยางนิ่ม 12

2.4.6 สารช่วยในกระบวนการผลิต 12

2.5 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง 13

2.5.1 การบดยาง 13

2.5.2 การขึ้นรูป 15

สารบาญ (ต่อ)

หน้า

บทที่

2.5.3 การทำให้ยางคงรูป 16

2.5.4 การตกแต่งผลิตภัณฑ์ยาง 16

2.6 สารตัวเติมแร่ดินเหนียว 17

2.6.1 แร่ดินเหนียว Montmorillonite 17

2.6.2 แร่ดินเหนียว Kaolinite..... 17

2.6.3 แร่ดินเหนียวขัดสี 19

2.6.4 แป้งทัลคัม 20

2.7 การปรับสภาพพื้นผิวสารตัวเติมแร่ดินเหนียว 22

2.7.1 การปรับสภาพพื้นผิวสารตัวเติมแร่ดินเหนียว Montmorillonite..... 22

2.7.2 การปรับสภาพพื้นผิวสารตัวเติมแร่ดินเหนียว Kaolinite และ แร่ดินเหนียวขัดสี 24

2.8 ยาง ENR 25

3. วิธีการวิจัย 27-53

3.1 สารเคมี 27

3.2 ขั้นตอนการทดลอง 28

3.2.1 การปรับสภาพผิวแร่ดินเหนียว Montmorillonite 28

3.2.2 การปรับสภาพผิวแร่ดินเหนียว Kaolinte และแร่ดินเหนียวขัดสี..... 29

3.2.3 การทดสอบลักษณะของสารตัวเติม 30

3.2.4 การทดสอบความเข้ากันได้ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ และยางโบโมบิวไทล์ 36

3.2.5 การออกสูตรยาง..... 37

3.2.6 การบดผสมยาง..... 39

สารบาญ (ต่อ)

หน้า

บทที่

3.2.7 การทดสอบสมบัติการคงรูป..... 40
3.2.8 ขั้นตอนการขึ้นรูป..... 42
3.2.9 การทดสอบสมบัติของยางคอมพอสิท..... 44
3.2.9.1 การทดสอบสมบัติการดึงยืด..... 44
3.2.9.2 การทดสอบความแข็งกด..... 45
3.2.9.3 การทดสอบการการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด..... 48
3.3.9.4 การทดสอบความทนทานต่อการสึกหรอ..... 50
3.3.9.5 การทดสอบการซึมผ่านของก๊าซ..... 51
3.3.9.6 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค..... 52

4. ผลของการวิจัย..... 54-101
4.1 ลักษณะเฉพาะของแร่ดินเหนียวก่อนการปรับสภาพผิว..... 54
4.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้นด้วย XRF..... 54
4.1.2 การวิเคราะห์การสลายตัวเชิงความร้อนด้วย TGA..... 55
4.1.3 การวิเคราะห์ระยะระหว่างชั้นด้วย XRD..... 57
4.1.4 การวิเคราะห์พันธะต่างๆ ด้วย FTIR..... 60
4.1.5 การวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาค..... 61
4.2 ลักษณะเฉพาะของแร่ดินเหนียวหลังการปรับสภาพผิว..... 62
4.2.1 องค์ประกอบและลักษณะของแร่ดินเหนียว Montmorillonite..... 62
4.2.2 องค์ประกอบและลักษณะของแร่ดินเหนียว Kaolinite..... 64
4.2.3 องค์ประกอบและลักษณะของแร่ดินเหนียวขัดสี..... 65
4.3 การทดสอบความเข้ากันได้ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและ
ยางโบรโมบิวไทล์..... 67

สารบาญ (ต่อ)

หน้า

บทที่

4.4 ผลของชนิดของสารตัวเติมแร่ดินเหนียวและการปรับสภาพผิวสารตัวเติม ต่อสมบัติต่างๆ ของยางคอมพอสิท….. 69

4.5 ผลของตัวประสาน (Compatibilizer) ต่อสมบัติต่างๆ ของยางคอมพอสิท.. 84

4.6 ผลของสารตัวเติมและตัวประสานต่อสมบัติการซึมผ่านของก๊าซ ของยางคอมพอสิท 97

4.7 ราคาต่อหน่วยของสูตรยางต่างๆที่ศึกษาในงานวิจัยนี้..... 98

4.8 การประยุกต์สูตรยางที่ได้กับผลิตภัณฑ์ต่างๆ..... 100

5. สรุปผลการศึกษาวิจัยและข้อเสนอแนะ 102-104

5.1 สรุปผลการศึกษาวิจัย..... 102

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต 104

บรรณานุกรม 105-110

ภาคผนวก 111-124

ภาคผนวก ก ข้อมูลพื้นฐานของยางชนิดต่างๆ 112

ภาคผนวก ข สูตรยางในลูกฟุตบอล..... 114

ภาคผนวก ค ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณของยางและสารเคมีต่างๆ ที่ใช้กับยาง…..... 115

ภาคผนวก ง ตัวอย่างการคำนวณราคาต่อหน่วยของสูตยางต่างๆ..... 117

ภาคผนวก จ ตัวอย่างข้อมูลดิบของการทดสอบสมบัติของยางคอมพอสิท..... 119

ประวัติการศึกษา..... 125

สารบาญตาราง

ตารางที่ หน้า

3.1 สูตรยาง NR/BIIR ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ 38

4.1 องค์ประกอบเบื้องต้นด้วยเครื่อง XRF ของแป้งทัลคัม แร่ดินเหนียว Montmorillonite แร่ดินเหนียว Kaolinite และแร่ดินเหนียวขัดสี..... 55

4.2 ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย ($d_{0.5}$) และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของสารตัวเติม 61

4.3 ค่า T_g ของยางผสมของยางธรรมชาติและยางโบรโมบิวไทล์ในอัตราส่วนต่างๆ 68

4.4 สมบัติการคงรูปของยางคอมพอสิทแบบปกติ 70

4.5 สมบัติการคงรูปของยางคอมพอสิทแบบที่มียาง ENR เป็นตัวประสาน 85

4.6 ราคาต่อหน่วยของสูตรยางต่างๆ ใน 1 กิโลกรัม..... 99

ก.1 ผลการทดสอบมาตรฐานยางแท่ง STR 5L..... 108

ก.2 Specification of ENR..... 108

ค.1 ปริมาณยางและสารเคมีต่างๆ สำหรับสูตร A ในบทที่ 3..... 112

ค.2 ปริมาณยางและสารเคมีต่างๆ สำหรับสูตร B ในบทที่ 3..... 113

ง.1 ราคาต่อหน่วยของสูตรยางต่างๆ ใน 1 กิโลกรัม..... 117

จ.1 สมบัติการทนทานต่อแรงดึงและค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของยางคอมพอสิท แบบปกติ 119

จ.2 สมบัติโมดูลัสที่ความเครียด (Strain) เท่ากับ 100% และ 300% ของยางคอมพอสิท แบบปกติ 119

จ.3 ความแข็งแรงที่ผิว (Surface Hardness) ของยางคอมพอสิทแบบปกติ 120

จ.4 ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (Compression Set) ของยางคอมพอสิทแบบปกติ 120

จ.5 ผลความทนทานต่อการสึกหรอ (Abrasion Resistance) ของยางคอมพอสิทแบบปกติ 121

จ.6 สมบัติการทนทานต่อแรงดึงและค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของยางคอมพอสิท แบบที่มียาง ENR เป็นตัวประสาน 121

จ.7 สมบัติโมดูลัสที่ความเครียด (Strain) เท่ากับ 100% และ 300% ของยางคอมพอสิท แบบที่มียาง ENR เป็นตัวประสาน 122

สารบาญตาราง

ตารางที่ หน้า

จ.8 ความแข็งแรงที่ผิว (Surface Hardness) ของยางคอมพอสิท
แบบที่มียาง ENR เป็นตัวประสาน 122

จ.9 ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (Compression Set) ของยางคอมพอสิท
แบบที่มียาง ENR เป็นตัวประสาน 123

จ.10ผลความทนทานต่อการสึกหรอ (Abrasion Resistance) ของยางคอมพอสิท
แบบที่มียาง ENR เป็นตัวประสาน 123

จ.11ผลการซึมผ่านของก๊าซของยางคอมพอสิท 124

สารบาญภาพประกอบ

ภาพที่ หน้า

2.1 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ 5

2.2 การเรียงตัวของโครงสร้างทางเคมียางธรรวมชาติ..... 5

2.3 การสังเคราะห์ยางโบรโมบิวไทล์……..... 7

2.4 โครงสร้างของกลุ่มไอโซพรีนิวล์ในยางโบรโมบิวไทล์……..... 7

2.5 ลักษณะเครื่องบดผสมระบบเปิด 14

2.6 ลักษณะเครื่องบดผสมระบบปิด 14

2.7 โครงสร้างของแร่ดินเหนียว Montmorillonite 18

2.8 โครงสร้างของแร่ดินเหนียว Kaolinite..... 19

2.9 โครงสร้างของแป้งทัลคัม 20

2.10 ลักษณะโครงสร้างของ Amino Acids 23

2.11 ปฏิกิริยา Hydrolysis ของ Silane Coupling Agent..... 24

2.12 โครงสร้างของ Bis(3–triethoxysilyllpropyl)–tetrasulfane (Si–69)..... 24

2.13 โครงสร้างทางเคมีของยาง ENR–25 และ ENR–50 25

3.1 เครื่อง XRF..... 31

3.2 เครื่อง TGA-50 Thermo Gravimetric Analyzer 31

3.3 เครื่อง X–Ray Diffractometer (XRD)..... 32

3.4 ลักษณะการวัดของเครื่อง X–Ray Diffractometer (XRD)..... 33

3.5 (ก.) แสดงลักษณะของระนาบตาม Miller Index (ข.) แสดงระนาบสามมิติของวัสดุ 33

3.6 ลักษณะผลของ XRD ตาม Miller Index 35

3.7 เครื่อง Fourier Transform Infrared (FTIR)..... 35

3.8 เครื่อง Dynamic mechanical measurements..... 37

3.9 เครื่อง Two–roll mill..... 39

3.10 เครื่อง Moving Die Rheometer..... 41

สารบาญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

3.11 ลักษณะการคงรูปของยาง 41

3.12 เครื่องอัดยางคงรูป สำหรับการทดสอบแรงดึง การทดสอบความแข็งกด การทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด และการทดสอบการซึมผ่านของก๊าซ 43

3.13 เครื่องอัดยางคงรูป สำหรับการทดสอบความทนทานต่อการสึกหรอ 43

3.14 ขนาดตัวอย่างที่ใช้ในการวัดสมบัติความทนทานต่อแรงดึง 46

3.15 เครื่องวัดสมบัติการดึงยืด..... 47

3.16 เครื่อง Durometer Shore A 47

3.17 กราฟแสดงหลักการทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด 49

3.18 เครื่องทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด..... 49

3.19 เครื่อง Abrasion Tester..... 51

3.20 เครื่องทดสอบการซึมผ่านของก๊าซ บริเวณด้านนอกตัวเครื่อง..... 53

3.21 เครื่องทดสอบการซึมผ่านของก๊าซ บริเวณที่วางตัวอย่างทดสอบ 53

4.1 ผล TGA ของ (a.) แร่ดินเหนียว Montmorillonite (b.) แร่ดินเหนียว Kaolinite และ (c.) แร่ดินเหนียวขัดสี..... 56

4.2 ผล XRD ของ (a.) แร่ดินเหนียว Montmorillonite (b.) แร่ดินเหนียว Kaolinite และ (c.) แร่ดินเหนียวขัดสี..... 57

4.3 XRD pattern ของแร่ดินเหนียว Montmorillonite 58

4.4 XRD pattern ของแร่ดินเหนียว Kaolinite..... 58

4.5 XRD pattern ของแร่ดินเหนียว Illite 59

4.6 ผล FTIR ของ (a.) แร่ดินเหนียว Montmorillonite (b.) แร่ดินเหนียว Kaolinite และ (c.) แร่ดินเหนียวขัดสี..... 60

4.7 ผล TGA ของแร่ดินเหนียว Montmorillonite ก่อนและหลังการปรับสภาพผิว..... 63

4.8 ผล XRD ของแร่ดินเหนียว Montmorillonite ก่อนและหลังการปรับสภาพผิว..... 63

สารบาญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.9 ผล TGA ของแร่ดินเหนียว Kaolinite ก่อนและหลังการปรับสภาพผิว..... 64

4.10 ผล XRD ของแร่ดินเหนียว Kaolinite ก่อนและหลังการปรับสภาพผิว 65

4.11 ผล TGA ของแร่ดินเหนียวขัดสี ก่อนและหลังการปรับสภาพผิว 66

4.12 ผล XRD ของแร่ดินเหนียวขัดสี ก่อนและหลังการปรับสภาพผิว 66

4.13 ผล Mechanical loss factor (tan δ) ของยางผสมยางธรรมชาติต่อยางโบรโมบิวไทล์ในอัตราส่วนต่างๆ..... 68

4.14 ค่า T_g ของยางผสมยางธรรมชาติต่อยางโบรโมบิวไทล์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับการคำนวณจากความสัมพันธ์ของ Fox 69

4.15 ผลเวลาที่ยางเริ่มคงรูปและเวลาในการขึ้นรูปของยางคอมพอสิทแบบปกติ..... 71

4.16 ผลของค่าแรงบิดต่ำสุด (T_{min}) และผลต่างของค่าแรงบิดสูงสุดกับต่ำสุด (ΔT_{max}) ของยางคอมพอสิทแบบปกติ..... 72

4.17 ผลค่าปริมาณของโครงสร้างแบบเชื่อมโยงของยางคอมพอสิทแบบปกติ……. 73

4.18 ผลความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ของยางคอมพอสิทแบบปกติ..... 75

4.19 ผลค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) ของยางคอมพอสิทแบบปกติ 76

4.20 ผลโมดูลัส (Modulus) ที่ความเครียด (Strain) เท่ากับ 100%ของยางคอมพอสิทแบบปกติ 76

4.21 ผลโมดูลัส (Modulus) ที่ความเครียด (Strain) เท่ากับ 300%ของยางคอมพอสิทแบบปกติ 77

4.22 ผลความแข็งแรงที่ผิวของยางคอมพอสิทแบบปกติ 78

4.23 ปริมาตรที่สึกหรอของยางคอมโพสิทต่างๆ ในการทดสอบความต้านทานการสึกหรอ 78

4.24 ภาพถ่ายพื้นที่ผิวหักของยางคอมพอสิทที่มีสารตัวเติมเป็นแป้งทัลคัม, แร่ดินเหนียว montmorillonite, แร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว, แร่ดินเหนียว kaolinite, และแร่ดินเหนียว kaolinite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว โดยใช้ SEM..... 81

สารบาญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.25 ภาพถ่ายพื้นที่ผิวหักของยางคอมพอสิทที่มีสารตัวเติมเป็นแป้งทัลคัม, แร่ดินเหนียว montmorillonite, แร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว, แร่ดินเหนียว kaolinite, และแร่ดินเหนียว kaolinite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว โดยใช้ SEM และการกระจายตัวของโบรมีน โดยใช้ EDX..... 82

4.26 ผลเวลาในการขึ้นรูปของยางคอมพอสิทแบบที่มียาง ENR เป็นตัวประสานเปรียบเทียบกับยางคอมพอสิทแบบปกติ..... 84

4.27 ผลค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum Torque) ของยางคอมพอสิทแบบที่มียาง ENR เป็นตัวประสานเปรียบเทียบกับยางคอมพอสิทแบบปกติ..... 86

4.28 ผลค่าผลต่างของแรงบิด (Max – Min Torque) ของยางคอมพอสิทแบบที่มียาง ENR เป็นตัวประสานเปรียบเทียบกับยางคอมพอสิทแบบปกติ 87

4.29 ผลค่าปริมาณของการเชื่อมประสานของยางคอมพอสิทแบบที่มียาง ENR เป็นตัวประสานเปรียบเทียบกับยางคอมพอสิทแบบปกติ 87

4.30 ผลความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ของยางคอมพอสิทแบบที่มียาง ENR เป็นตัวประสานเปรียบเทียบกับยางคอมพอสิทแบบปกติ..... 89

4.31 ผลค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation @ break) ของยางคอมพอสิทแบบที่มียาง ENR เป็นตัวประสานเปรียบเทียบกับยางคอมพอสิทแบบปกติ..... 89

4.32 ผลโมดูลัส (Modulus) ที่ความเครียด (Strain) เท่ากับ 100% ของยางคอมพอสิทแบบที่มียาง ENR เป็นตัวประสานเปรียบเทียบกับยางคอมพอสิทแบบปกติ..... 90

4.33 ผลโมดูลัส (Modulus) ที่ความเครียด (Strain) เท่ากับ 300% ของยางคอมพอสิทแบบที่มียาง ENR เป็นตัวประสานเปรียบเทียบกับยางคอมพอสิทแบบปกติ 90

4.34 ผลความแข็งแรงที่ผิวของยางคอมพอสิทแบบที่มียาง ENR เป็นตัวประสานเปรียบเทียบกับยางคอมพอสิทแบบปกติ..... 92

4.35 ผลการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของยางคอมพอสิทแบบที่มียาง ENR เป็นตัวประสานเปรียบเทียบกับยางคอมพอสิทแบบปกติ..... 92

สารบาญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.36 ปริมาตรที่สึกหรอของยางคอมพอสิทแบบที่มียาง ENR เป็นตัวประสานเปรียบเทียบกับยางคอมพอสิทแบบปกติ…….. 93

4.37 ภาพถ่ายพื้นที่ผิวหักของยางคอมพอสิทแบบปกติ เปรียบเทียบกับที่ใช้ยาง ENR เป็นตัวประสานและมีสารตัวเติมเป็นแป้งทัลคัม, แร่ดินเหนียว montmorillonite, แร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว, แร่ดินเหนียว kaolinite, และแร่ดินเหนียว kaolinite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว โดยใช้ SEM…… 94 - 95

4.38 ภาพถ่ายพื้นที่ผิวหักของยางคอมพอสิทแบบปกติ เปรียบเทียบกับที่ใช้ยาง ENR เป็นตัวประสานและมีสารตัวเติมเป็นแป้งทัลคัม, แร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว, และแร่ดินเหนียว kaolinite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว โดยใช้ SEM และการกระจายตัวของโบรมีน โดยใช้ EDX …….. 96

4.39 ผลการซึมผ่านของก๊าซของยางคอมพอสิท……. 99

บทที่ 1

บทนำ (INTRODUCTION)

ยางธรรมชาติ (Natural Rubber-NR) ได้จากการตกตะกอนแยกเอาเนื้อยางออกมาจากน้ำยางพาราที่กรีดจากต้นยาง ซึ่งยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ชนิดเทอร์มอพลาสติกมีชื่อเรียกว่า พอลิ-ไอโซพรีน (Poly-isoprene) ที่มีมวลโมเลกุลสูงตั้งแต่ 50,000 – 3,000,000 ประกอบด้วย จำนวนของมอนอเมอร์ 1,000 – 15,000 ต่อโมเลกุลโดยประมาณ และมีการกระจายตัวของขนาดโมเลกุลกว้าง ประเทศไทยมีการผลิตยางธรรมชาติได้มากเป็นอันดับหนึ่งของโลก โดยเฉพาะพื้นที่ทางภาคใต้และภาคตะวันออกของประเทศ โดยธรรมชาติแล้วน้ำยางสดจะไม่คงทนต่อสภาพการเปลี่ยนแปลงของสภาวะต่างๆ จึงต้องแปรรูปน้ำยางสดตามลักษณะการใช้งาน อาทิ น้ำยางข้น ยางแผ่นและยางแท่ง ยางธรรมชาติถูกนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นสิ่งของเล็กน้อยใกล้ตัว จนไปถึงการใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ

ถึงแม้ว่ายางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูง แต่ไม่สามารถทนต่อน้ำมัน ความร้อนและสภาพอากาศได้ จึงมีความพยายามในการผลิตยางสังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อใช้แทนยางธรรมชาติในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องใช้คุณสมบัติดังกล่าว อาทิเช่น ยาง EPDM (Ethylene–Propylene–Diene Rubber), ยาง IIR (Butyl Rubber) หรือยาง NBR (Acrylonitrile–Butadiene Rubber) อย่างไรก็ตาม โดยส่วนใหญ่ยางสังเคราะห์ยังคงต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งทำให้มีราคาแพง ในขณะที่ยางธรรมชาติสามารถผลิตได้ในประเทศและมีราคาถูกกว่า จึงมีความพยายามในการปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆ ของยางธรรมชาติให้ดีขึ้น โดยวิธีการหนึ่งคือการนำยางธรรมชาติมาบดผสม (Blend) กับยางสังเคราะห์ชนิดต่างๆ เพื่อเพิ่มรูปแบบการใช้งานให้กว้างขึ้น เพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติและลดค่าใช้จ่ายของยางสังเคราะห์ให้น้อยลงอีกด้วย ในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาการบดผสมยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ เพื่อเพิ่มความสามารถในการลดการซึมผ่านของก๊าซ รวมทั้ง ปรับปรุงคุณสมบัติด้านอื่นควบคู่กันไปด้วย เช่น ความแข็งแรง, ความทนทานต่อการดึงยืด เป็นต้น โดยมีวัตถุประสงค์ในการใช้งานเพื่อลดการซึมผ่านของก๊าซและสมบัติต่างๆ ในผลิตภัณฑ์ เช่น ยางในของล้อรถ, ยางในของลูกเทนนิสและลูกฟุตบอล, ฉนวนหุ้มของท่อของเครื่องปรับอากาศ เป็นต้น โดยยางสังเคราะห์ที่เราสนใจ คือ ยางโบรโมบิวไทล์ เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีในด้านการเกิดปฏิกิริยาการคงรูปที่เร็ว เข้ากับยางธรรมชาติได้ดีกว่ายางบิวไทล์ สมบัติเชิงกลที่ดี รวมทั้ง มีอัตราการซึมผ่านของก๊าซต่ำ (พงษ์ธร แซ่อุย, 2548)

สารตัวเติมในยาง ก็เป็นสิ่งที่มีความสำคัญเช่นกัน เพราะว่า สารตัวเติมสามารถช่วยในการเพิ่มสมบัติต่างๆของยางให้ดีขึ้น นอกจากนั้น ยังเป็นสารที่สามารถช่วยลดต้นทุนได้ด้วย ปัจจุบันนี้ได้มีความสนใจศึกษาด้วยการนำแร่ดินเหนียว (Clay) โดยเฉพาะอย่างยิ่งแร่ดินเหนียว montmorillonite มาใช้เป็นสารตัวเติมในคอมพอสิทของพอลิเมอร์และยาง (Okada, et al., 1990 and Kojima, et al., 1993) เพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรงและลดการซึมผ่านของก๊าซเพราะมีลักษณะเป็นแผ่นที่ขยายตัวได้และมีลักษณะของโครงสร้างเป็นแบบแผ่น (Platelike–structure) อาจช่วยเพิ่มสมบัติการกักเก็บก๊าซและให้ความแข็งแรงไปพร้อมกัน งานวิจัยนี้ เราจึงมีความสนใจศึกษาผลของสารตัวเติมแบบแผ่นคือ แร่ดินเหนียว montmorillonite เปรียบเทียบกับแร่ดินเหนียวที่พบมากในประเทศไทย คือ แร่ดินเหนียว kaolinite และแร่ดินเหนียวที่มีราคาถูกกว่า คือ แร่ดินเหนียวขัดสี (Bleaching Clay) โดยทำการเปรียบเทียบกับสารตัวเติมแป้งทัลคัม (Talcum) เนื่องจากเป็นสารตัวเติมที่ใช้กันแพร่หลายในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับสมบัติการกักเก็บก๊าซเป็นส่วนใหญ่

นอกจากการเปรียบเทียบชนิดของสารตัวเติมแล้ว งานวิจัยนี้จะศึกษาการปรับสภาพผิวของสารตัวเติมและการใช้ตัวประสาน เพื่อช่วยให้สามารถเข้ากับยางได้ดีขึ้น เนื่องจากจะช่วยทำให้ความมีขั้วของสารตัวเติมลดลงและทำให้สมบัติของยางคอมพอสิท (Composite Rubber) ที่ผสมสารตัวเติมเหล่านี้ดีขึ้นด้วย โดยวิธีการปรับสภาพนั้นได้เลือกวิธีการปรับสภาพผิวที่เหมาะสมสำหรับสารตัวเติมแร่ดินเหนียวแต่ละชนิด กล่าวคือ สารตัวเติมแร่ดินเหนียว montmorillonite จะทำการปรับสภาพผิวด้วย Octadecylamine (C_{18}) (Arroyo, Lòpez–Manchado, & Herrero, 2003) ส่วนสารตัวเติมแร่ดินเหนียว kaolinite และแร่ดินเหนียวขัดสี จะทำการปรับสภาพผิวด้วย Silane–69 (สุทธินี เนตรพุกกณะ, 2548) ด้านการใช้ตัวประสานนั้น ตัวประสานที่นิยมใช้ คือ Silane Coupling Agent โดยที่นิยมใช้ตัวหนึ่ง คือ silane–69 เนื่องจาก silane–69 ประกอบด้วยหมู่ alkoxy ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ silanol บนผิวของสารตัวเติมเกิดเป็นโครงสร้างของหมู่ siloxane และหมู่ organo–fuction ซึ่งเป็นส่วนของไฮโดรคาร์บอนและซัลเฟอร์ ซึ่งเข้ากันได้ดีและสามารถเกิดปฏิกิริยาโครงสร้างร่างตาข่าย (Crosslink) กับยางเพื่อเพิ่มความแข็งแรงอีกด้วย ตัวประสานอีกประเภทที่น่าสนใจ คือ ยางที่มีการปรับสภาพให้มีความมีขั้วมากขึ้น ในงานวิจัยนี้สนใจยางที่ปรับสภาพ โดยการเติมออกซิเจนเข้าไปในโมเลกุลของยางตรงบริเวณพันธะคู่เกิดเป็นวงแหวนอีพ๊อกไซด์ ผ่านปฏิกิริยาอีพ๊อกซิเดชั่น (Epoxidation) ที่เรียกว่า ยาง Epoxidised Natural Rubber (ENR) (Gelling, 1985) ซึ่งยางชนิดนี้ได้มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย ในอดีตยางชนิดนี้จะต้องเตรียมขึ้นเองแต่ทว่าในปัจจุบันมีขายในเชิงพาณิชย์

กล่าวโดยสรุปคือ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการปรับปรุงสมบัติต่างๆ ได้แก่ สมบัติการดึงยืด (Tensile), ความแข็งแรง (Hardness), การยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (Compression Set), ความทนทานต่อการสึกหรอ (Abrasion) และการลดการซึมผ่านของก๊าซ (Gas Permeability) ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางโบรโมบิวไทล์ โดยใช้สารตัวเติมที่ใช้เป็นแร่ดินเหนียวแบบแผ่น 4 ชนิดคือ แร่ดินเหนียว montmorillonite, แร่ดินเหนียว kaolinite, แร่ดินเหนียวขัดสี (Bleaching Clay) และแป้งทัลคัม เนื่องจากเป็นสารตัวเติมที่นิยมใช้กันทั่วไปในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการกักเก็บก๊าซ รวมทั้งยังได้มีการศึกษาผลของการปรับสภาพผิวของแร่ดินเหนียวแบบแผ่นทั้ง 3 ชนิดแรก และการใช้ตัวประสาน (Compatibilizer) คือ ยาง Epoxidised Natural Rubber (ENR) ต่อสมบัติต่างๆ ของยางผสม

บทที่ 2

ผลงานวิจัยและงานเขียนอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง (REVIEW OF LITERATURE)

ในงานวิจัยนี้ จำเป็นต้องศึกษาข้อมูลและผลงานวิจัยต่างๆ หลายด้าน คือ ข้อมูลของยาง, ชนิดของสารตัวเติม, การปรับสภาพผิวของสารตัวเติม และกระบวนการผลิตยางคอมพอสิท โดยมีรายละเอียด ดังนี้

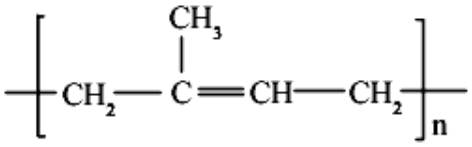
2.1 ยางธรรมชาติ (NATURAL RUBBER)

ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR) เป็นพอลิเมอร์ชนิดเทอร์มอพลาสติก มีชื่อเรียกว่า พอลิ-ไอโซพรีน (Poly-isoprene) ที่มีมวลโมเลกุลสูงตั้งแต่ 50,000 – 3,000,000 ประกอบด้วยจำนวนของมอนอเมอร์ 1,000 – 15,000 ต่อโมเลกุลโดยประมาณ และมีการกระจายตัวของขนาดโมเลกุลกว้าง ประเทศไทยมีการผลิตยางธรรมชาติได้มากเป็นอันดับหนึ่งของโลก โดยเฉพาะพื้นที่ทางภาคใต้และภาคตะวันออกของประเทศ โดยธรรมชาติแล้วน้ำยางสดจะไม่คงทนต่อสภาพการเปลี่ยนแปลงของสภาวะต่างๆ จึงต้องแปรรูปน้ำยางสดตามลักษณะการใช้งาน อาทิ น้ำยางข้น ยางแผ่น และยางแท่ง ยางธรรมชาติถูกนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นสิ่งของเล็กน้อยใกล้ตัว จนไปถึงการใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ

โดยส่วนใหญ่ ยางธรรมชาติมาจากต้นยางพาราสายพันธุ์ Hevea Brazilliensis ซึ่งเป็นไม้ป่าที่มีต้นกำเนิดจากลุ่มแม่น้ำอเมซอนในทวีปอเมริกาใต้ น้ำยางสดที่กรีดได้จากต้นยางพาราลักษณะเป็นสีขาวข้นและมีสัดส่วนของเนื้อยาง (Dry Rubber Content, DRC) ประมาณ 30% โดยน้ำหนักแขวนลอยอยู่ในน้ำ ปริมาณของเนื้อยางขึ้นอยู่กับชนิดของพันธุ์ยาง อายุต้นยาง และฤดูกาลที่กรีดยาง (พงศ์ธร แซ่อุย, 2547) ซึ่งยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติ มีโครงสร้างทางเคมีคือ 1,4–Polyisoprene ดังแสดงในรูปที่ 2.1 น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ในช่วง 200,000 ถึง 400,000 และมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้างมาก และ T_g (Glass Transition Temperature) เท่ากับ –72°C ยางที่ได้จากธรรมชาติมีโครงสร้างมีทั้งแบบ cis และ trans ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (Rattana, 2003)

รูปที่ 2.1

โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ



โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ ยางแท่ง ซึ่งเป็นยางแห้งชนิดหนึ่ง ที่เตรียมได้จากการนำน้ำยางสดมาเติมน้ำเพื่อเจือจางให้มีปริมาณเนื้อยางเหลือเพียง 12 – 18% แล้วจึงเติมกรด ส่วนใหญ่นิยมกรดอะซิติค กรดฟอร์มิคหรือกรดซัลฟูริค เพื่อให้ยางจับตัวกันและแยกตัวออกจากน้ำ ซึ่งความเป็นกรด – ด่าง (pH) ที่ทำให้อนุภาคของน้ำยางเริ่มจับตัวกันอยู่ในช่วง 4.8 – 5.1 จากนั้นก็ไล่ความชื้นออกจากเนื้อยาง เพื่อป้องกันการเกิดเชื้อรา นำยางที่ได้มาทำให้เป็นก้อนเล็กๆ เพื่อให้ง่ายในการใช้น้ำชำระล้างสิ่งสกปรกออกไปและง่ายต่อการทำให้แห้งในขั้นตอนต่อมา เมื่อทำการอบยางให้แห้งด้วยอากาศร้อนแล้วจึงนำยางที่เป็นก้อนเล็กๆ ไปอัดให้เป็นแท่ง ซึ่งวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตยางแท่งนั้น ขึ้นอยู่กับเกรดของยางแท่ง อาทิ การผลิตยางแท่งเกรด STR XL หรือ STR 5L ซึ่งมีสีจางมาก จึงใช้น้ำยางเป็นวัตถุดิบและใช้กรดฟอร์มิคในการทำให้อนุภาคน้ำยางจับตัวกันภายใต้สภาวะที่มีการควบคุมอย่างดีหรือถ้าต้องการผลิตยางแท่งเกรด STR 10 หรือ STR 20 ซึ่งมีสิ่งเจือปนสูงและมีสีเข้มกว่า จึงใช้ยางแผ่นเศษยางหรือขี้ยางเป็นวัตถุดิบ

รูปที่ 2.2

การเรียงตัวของโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ

Cis Trans

เนื่องจากยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่ในโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.1 พันธะคู่ดังกล่าวสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆ ได้อีก เช่น ออกซิเจน หรือโอโซน ทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพหรืออาจทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนหรือคลอรีนหรือไฮโดรเจนคลอไรด์ เป็นต้น เนื่องจากยางยังคงอ่อนตัวและเหนียวเยิ้มเมื่อร้อน แต่จะแข็งเปราะที่อุณหภูมิต่ำ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างยางกับสารเคมีต่างๆ ที่พันธะคู่จะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วด้วย เป็นสาเหตุให้ต้องใส่สารเคมีอื่นๆ เพื่อทำให้ยางคงรูปอยู่ได้ เช่น กำมะถัน สารตัวเติมและสารเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น จนได้ยางผสมหรือที่เรียกว่า ยางคอมพาวด์ (Rubber Compound) แล้วนำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อนและความดัน กระบวนการนี้เรียกว่า กระบวนการคงรูปยาง (Vulcanization) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยง (Crosslink) ระหว่างโมเลกุลของยางเกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ ทำให้ยางคงรูปและมีสมบัติความยืดหยุ่นสูงขึ้น ส่วนยางที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวจะเรียกว่า ยางสุกหรือยางคงรูป (Vulcanizate) หรือยางคอมพอสิท (Rubber Composite) ซึ่งมีสมบัติที่เสถียร ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนัก

2.2 **ยางโบรโมบิวไทล์** (BROMOBUTYL RUBBER, XIIR)

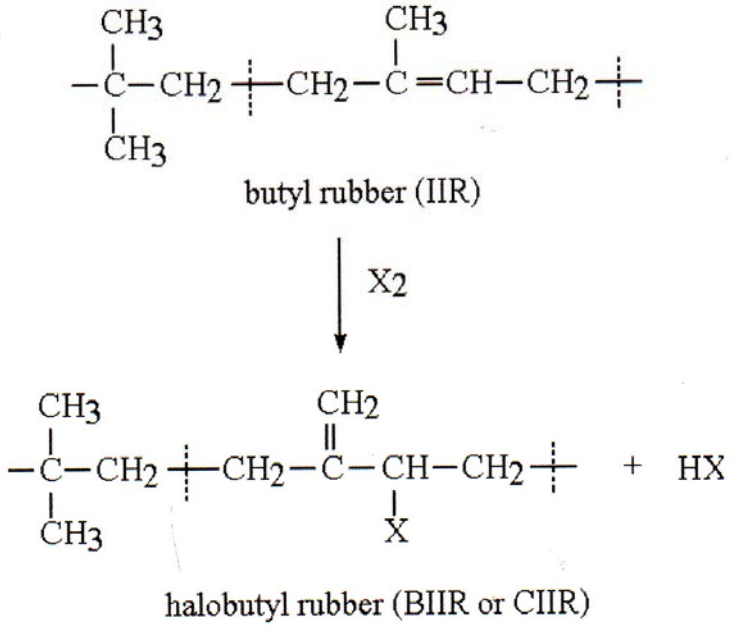
2.2.1 **โครงสร้างและการผลิต**

ยางโบรโมบิวไทล์ (BIIR) เกิดจากการทำปฏิกิริยาฮาโลจิเนชั่น (Halogenation) ระหว่างยางบิวไทล์กับก๊าซโบรมีน (Br_2) ได้เป็นยางโบรโมบิวไทล์ ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาฮาโลจิเนชั่นจะต้องมีการควบคุมสภาวะให้เหมาะสมเพื่อให้ยางฮาโลบิวไทล์ยังคงมีพันธะคู่เหลืออยู่ (พันธะคู่จากสายโซ่หลัก (Backbone) ไปยังตำแหน่งที่อยู่ติดกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.3) โดยมีค่า T_g ประมาณ –50°C (พงศ์ธร แซ่อุย, 2547)

รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างของกลุ่มโบรมีนที่สามารถพบได้ในยางโบรโมบิวไทล์ โดยส่วนใหญ่กลุ่มไอโซพรีนิวล์ (isoprenyl group) จะเป็นการจัดเรียงตัวแบบ trans โครงสร้างแบบที่ II จะเป็นโครงสร้างหลักของยางโบรโมบิวไทล์ มีประมาณ 50 – 60% โครงสร้างแบบที่ I มีประมาณ 30 – 40% โครงสร้างแบบที่ III มีประมาณ 5 – 15% โครงสร้างแบบที่ IV มีประมาณ 1 – 3%

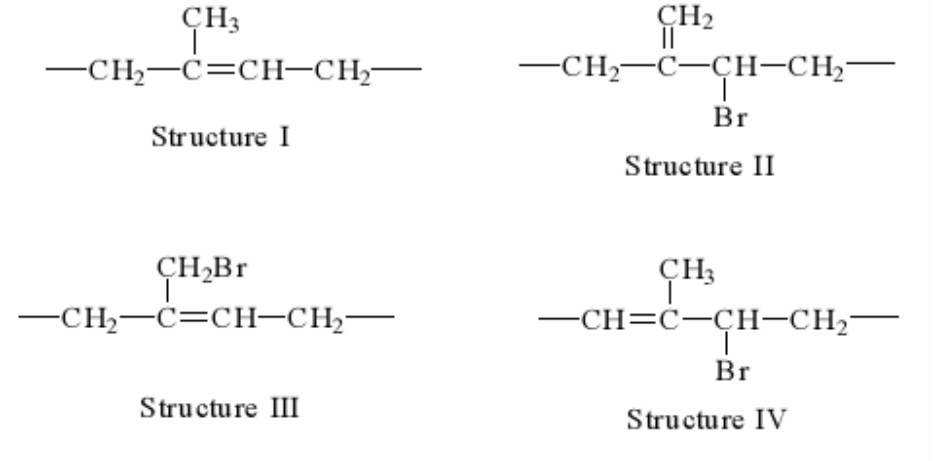
รูปที่ 2.3

การสังเคราะห์ยางโบรโมบิวไทล์ (เมื่อ X = Br)



รูปที่ 2.4

โครงสร้างของกลุ่มไอโซพรีนิวล์ในยางโบรโมบิวไทล์



ยางโบรโมบิวไทล์จะมีปริมาณโบรมีนอยู่ 1.9–2.1% โดยน้ำหนัก เนื่องจากยางโบรโมบิวไทล์มีปริมาณฮาโลเจนอยู่น้อยมาก ดังนั้น ยางชนิดนี้จึงไม่จัดอยู่ในพวกยางที่มีขั้ว การเติมหมู่ฮาโลเจนเข้าไปในยางบิวไทล์จะทำให้ยางมีความเป็นขั้วสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ อะตอมของธาตุฮาโลเจนยังทำให้พันธะคู่ที่มีอยู่ในโมเลกุลของยางมีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาคงรูปหรือปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เซชั่นสูงขึ้น ยางฮาโลบิวไทล์จึงคงรูปได้เร็ว มีระดับการคงรูปสูง และมีความต้านทานต่อการเกิด reversion ในระหว่างการคงรูปได้ดีขึ้น ดังนั้น ยางฮาโลบิวไทล์จึงมีความสามารถใช้ผสมกับยางไม่อิ่มตัวชนิดอื่นๆ เช่น ยางธรรมชาติได้ดีและยังสามารถเกิดการคงรูปร่วมกับยางที่ไม่อิ่มตัวอื่นๆได้ ในขณะที่ยางบิวไทล์ (ซึ่งมีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุลน้อยมาก) ไม่สามารถผสมกับยางที่ไม่อิ่มตัวอื่นๆได้ เนื่องจากอัตราการคงรูปของยางอื่นๆจะสูงกว่ายางบิวไทล์มากจึงทำให้ยางบิวไทล์ที่อยู่ในยางผสมไม่คงรูปเต็มที่ (Undercure) ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางเสียไป โดยทั่วไป ยางโบรโมบิวไทล์สามารถเกิดปฏิกิริยาคงรูปได้เร็วกว่า ให้ระดับการคงรูปที่สูงกว่า และมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่ายางคลอโรบิวไทล์เล็กน้อย

2.2.2 **สมบัติทั่วไป**

ยางโบรโมบิวไทล์มีสมบัติโดยทั่วไปดีกว่ายางบิวไทล์เล็กน้อย คือ มีอัตราการซึมผ่านของก๊าซต่ำกว่า มีความทนทานต่อโอโซน ความร้อน สภาพอากาศ และสารเคมีต่างๆ ได้ดีกว่า และฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) สูงกว่า (ฮิสเทอรีซิส คือ เปอร์เซ็นต์ของพลังงานที่สูญเสียไปเมื่อวัตถุได้รับแรงแล้วถ่ายเทแรงที่ได้รับไปเป็นพลังงานในรูปแบบอื่น) โดยทั่วไป สมบัติของยางคลอโรบิวไทล์จะอยู่ระหว่างยางโบรโมบิวไทล์กับยางบิวไทล์ นอกจากนี้ ยางโบโมบิวไทล์ยังสามารถคงรูปได้ด้วยเพอร์ออกไซด์ได้ ในขณะที่ ยางบิวไทล์และยางคลอโรบิวไทล์ ไม่สามารถทำได้

2.2.3 **การใช้งาน**

ยางโบรโมบิวไทล์นิยมใช้ในการผลิตยางโอริงหรือปะเก็นยางชนิดที่ต้องทนต่อสารเคมี ท่อไอน้ำ (Steam hose) ยางบุด้านในของยางล้อแบบไม่มียางใน สายพาน ยางบุต่างๆ และจุกปิดภาชนะทางเภสัชกรรม เช่น จุกปิดขวดยา เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ยางโบรโมบิวไทล์ไม่เหมาะที่จะนำไปใช้เป็นปลอกหุ้มสายไฟ เนื่องจากยางชนิดนี้ มักจะมีเกลือที่ละลายน้ำ ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยาคงรูปหลงเหลืออยู่ในปริมาณเล็กน้อย ส่งผลให้ยางมีความเป็นฉนวนต่ำ

2.3 การศึกษาในอดีตเรื่องยางผสมของยางโบรโมบิวไทล์และยางธรรมชาติ

Dutta และ Tripathy, 1993 ได้ทำการศึกษาถึงความเข้ากันได้ของยางโบรโมบิวไทล์และยางธรรมชาติ โดยใช้ระบบในการเชื่อมโยง (Crosslinking system) 4 แบบ คือ sulfur, sulfur donor, maleimide และ phenolic formaldehyde resin เมื่อทำการวิเคราะห์ยางผสมในระบบการเชื่อมโยงทั้ง 4 แบบ ด้วยวิธี DMA (Dynamic Mechanical Analysis) พบว่า ค่า T_g ของยางผสมอยู่ระหว่างค่า T_g ของยางทั้งสอง อย่างไรก็ดี ค่าการกระจายตัวของค่า T_g ของยางผสม มีความกว้างกว่าของยางโบรโมบิวไทล์และยางธรรมชาติบริสุทธิ์ แสดงว่า การรวมตัวของทั้ง 4 ระบบ อาจไม่ผสมกันได้ดีถึงระดับโมเลกุล แต่ผสมกันได้ในระดับไมโครเมตร (microheterogeneous) โดยยางผสมที่ได้มีค่า T_g ใกล้เคียงกันมาก เมื่อตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) และความหนาแน่นของพลังงานความเครียด ณ จุดขาด (Strain energy density at break) พบว่า ระบบที่ใช้ sulfur เป็นสารคงรูป จะได้ค่าที่ต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับระบบอื่น โดยนักวิจัยกลุ่มดังกล่าวได้สรุปไว้ว่า ยางผสมของยางโบรโมบิวไทล์และยางธรรมชาติเกิดการคงรูปร่วม (co-vulcanized) ได้ดีในทุกระบบ ยกเว้น ระบบ sulfur

Lewis, Buanpa และ Kiatkamjornwong, 2003 ได้ทำการศึกษาถึงอัตราของการใช้ยาง, ระดับของเขม่าดำ (carbon black, HAF) และ ระดับของสารตัวเร่งปฏิกิริยา (ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ TBBS) ที่มีผลต่อสมบัติของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางโบรโมบิวไทล์ โดยทำการสร้างเป็นแบบจำลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า

1. ระดับของเขม่าดำมีผลเป็นอย่างมากต่อเวลาที่ยางเริ่มคงรูป (Scorch time) และเวลาในการขึ้นรูป (Cure time)

- ถ้าเพิ่มปริมาณของเขม่าดำไปถึง 30 phr จะทำให้เวลาที่ยางเริ่มคงรูปและเวลาในการคงรูปลดลง เนื่องจาก surface chemistry และค่า pH ของเขม่าดำ มีผลต่อปริมาณของการคงรูป
- ถ้าเพิ่มปริมาณของเขม่าดำไปถึง 66 phr จะทำให้เวลาที่ยางเริ่มคงรูปและเวลาในการขึ้นรูปเพิ่มขึ้น อาจจะมีสาเหตุมาจากสัดส่วนโดยปริมาตร (Volume fraction) ของยางมีค่าน้อย

2. อัตราส่วนของยางธรรมชาติที่สูงขึ้นในยางผสม NR/BIIR ส่งผลต่อสมบัติการคงรูปและสมบัติทางกายภาพที่ดีขึ้น เพราะว่า ยางธรรมชาติทำปฏิกิริยากับการเชื่อมโยงด้วย sulfur ได้ดีกว่า รวมทั้งยังมีความแข็งแรงกว่ายางโบรโมบิวไทล์

3. ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (Compression set) จะขึ้นอยู่กับการเชื่อมโยงของ sulfur กล่าวคือ ถ้าเพิ่มปริมาณของ TBBS ซึ่งเป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาไปถึงจุดๆหนึ่ง จะทำให้ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดลดลง แต่ถ้ายังเพิ่มปริมาณสารตัวเร่งปฏิกิริยา TBBS ขึ้นไปอีก อาจจะเกิดการเชื่อมโยงแบบ polysulfide ทำให้ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดเพิ่มขึ้น

2.4 **สารเคมีสำหรับยาง**

สำหรับสารเคมีที่ใช้เติมแต่ละชนิดนั้นจะมีหน้าที่แตกต่างกันไป (พงษ์ธร แซ่อุย, 2548) ดังนี้

2.4.1 **สารทำให้ยางคงรูป** (Vulcanizers)

สารทำให้ยางคงรูปเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ต้องผสมลงไปในยาง เพื่อทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่เรียกว่า ปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เซชั่นหรือปฏิกิริยาคงรูป การคงรูปของยางสามารถแบ่งได้เป็น 3 ระบบใหญ่ๆ ได้แก่

1. ระบบการคงรูปด้วยกำมะถัน เป็นระบบที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน เพราะเป็นระบบที่มีต้นทุนต่ำ การคงรูปเกิดขึ้นได้เร็ว และยางคงรูปที่ได้ก็มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี นอกจากกำมะถันแล้ว ในบางกรณีอาจใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ ที่สามารถแตกตัวให้กำมะถัน ณ อุณหภูมิของการคงรูป แทนได้ เรียกสารเคมีเหล่านี้ว่า สารตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถให้กำมะถันได้ (Sulfur Donor Accelerator) ได้แก่ เททระเมทีลไทยูแรมไดซัลไฟด์ (Tetramethyl thiuramdisulfide, TMTD) คาร์โพรแลกแทมไดซัลไฟด์ (Carprolactamdisulfide, CLD) มอร์โฟลิโนไดไทโอเบนโซไทอะโซล (2-morpholino-dithio-benzothiazole, MBSS) และ ไดไทโอไดมอร์โฟลีน (Dithiodimorpholine, DTDM) เป็นต้น ถึงแม้ว่าสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถให้กำมะถันได้เหล่านี้ จะให้ปริมาณกำมะถัน

ออกมาไม่มากนัก แต่กำมะถันเหล่านี้มีประสิทธิภาพในการ crosslink มาก และให้โมดูลัสสูงกว่าการใช้กำมะถันเพียงอย่างเดียวในปริมาณเดียวกัน

2. ระบบการคงรูปด้วยเพอร์ออกไซด์ แม้ว่าระบบนี้จะสามารถใช้ได้กับยางส่วนใหญ่ แต่เนื่องจากมีต้นทุนที่สูงกว่า รวมทั้ง สมบัติของยางคงรูปส่วนใหญ่ก็ด้อยกว่าการคงรูปด้วยกำมะถัน รวมทั้ง เพอร์ออกไซด์ยังจัดเป็นสารเคมีที่อันตรายอีกด้วย ตัวอย่างได้แก่ ไดคิวมีลเพอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, DCP) เป็นต้น

3. ระบบการคงรูปด้วยสารเคมีอื่นๆ ได้แก่ การใช้ซีลีเนียมและเทลลูเรียม การใช้โลหะออกไซด์ เช่น ซิงก์ออกไซด์ (ZnO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เป็นต้น ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของยางและสภาวะต่างๆที่ใช้ในการขึ้นรูป

2.4.2 **สารตัวเร่งปฏิกิริยา** (Accelerators)

การใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสารที่ช่วยเร่งให้ปฏิกิริยาการคงรูปของยางเกิดเร็วขึ้น เพิ่มความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงขึ้นและช่วยลดอุณหภูมิที่ใช้ในการคงรูปลงด้วย สารตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายกลุ่ม ยกตัวอย่างเช่น

- อัลดีไฮด์-เอมีน (Aldehyde-amine) ได้แก่ สารที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างบิวทีลอัลดีไฮด์ (Butylaldehyde) และอนีลีน (Aniline)
- เอมีน (Amines) ได้แก่ เฮกซะเมทีลีนเททระมีน (Hexamethylene tetramine, HEXA)
- กัวนิดีน (Guanidines) ได้แก่ ไดฟีนีลกัวนิดีน (Diphenyl guanidine, DPG)
- ไทอะโซล (Thiazoles) ได้แก่ เบนโซไทอะซีลไดซัลไฟด์ (Benzothiazyl disulfide, MBTS)
- ไทยูแรม (Thiuram) ได้แก่ เททระเมทีลไทยูแรมไดซัลไฟด์ (Tetramethythiuram disulphide, TMTD)

2.4.3 **สารกระตุ้นปฏิกิริยา** (Activators)

สารกระตุ้นปฏิกิริยา คือ สารเคมีที่เติมลงไปในยางเพื่อเพิ่มอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาคงรูป เพราะสารเคมีในกลุ่มนี้จะเข้าไปกระตุ้นสารตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีประสิทธิภาพการทำงานสูงขึ้น แม้ว่ากลไกการกระตุ้นปฏิกิริยาค่อนข้างจะซับซ้อนและยังไม่เป็นที่ทราบกันอย่างแน่ชัด แต่เชื่อกันว่า

สารกระตุ้นปฏิกิริยาจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่เสถียร ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับกำมะถันที่มีอยู่ในยางอย่างรวดเร็ว ทำให้ยางมีอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาคงรูปสูงขึ้น โดยทั่วไปสารกระตุ้นปฏิกิริยาสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่

1. สารอนินทรีย์ ที่ใช้เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาคงรูปส่วนใหญ่เป็นออกไซด์ของโลหะ เช่น ซิงก์ออกไซด์ (ZnO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เป็นต้น

2. กรดอินทรีย์ เช่น กรดสเตียริก กรดลอริกและกรดไมริสติก (ในน้ำมันมะพร้าว) เป็นต้น

3. สารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นด่าง เช่น ไดบิวทีลอะมิโนโอลีเอต (Dibutylaminooleate) ไดฟีนีลกัวดีนพะทาเลต (1,3-diphenylguanidinephthalate) เป็นต้น

2.4.4 **สารตัวเติม** (Fillers)

สารตัวเติม เป็นสารช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้ยาง โดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มคาร์บอนแบล็ค (Carbon Black) ซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็ก ผิวหน้าว่องไวทางเคมี และโครงสร้างเกาะกันดี มีรูพรุนทำให้เสริมความแข็งแรงได้ดี และกลุ่ม Non – Black เช่น ซิลิกา (Silica) ดินขาวหรือแร่ดินเหนียว (Clay) หรือ แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonates) เป็นต้น

2.4.5 **สารทำให้ยางนิ่ม** (Softeners)

สารทำให้ยางนิ่ม เป็นสารที่เติมลงไปในยางในปริมาณเล็กน้อยแล้วทำให้ยางคงรูปอ่อนลงหรือทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปได้ง่ายยิ่งขึ้นหรือทำให้สารตัวเติมสามารถเข้าไปผสมกับยางได้ง่ายขึ้นยกตัวอย่างเช่น น้ำมันมิเนอรัล (mineral oils) พาราฟิน (paraffines) คูมาโรนเรซินและอินดีนเรซิน (coumarone and indene resin) เป็นต้น

2.4.6 **สารช่วยในกระบวนการผลิต** (Processing Aids)

สารช่วยในกระบานการผลิต คือ องค์ประกอบที่เติมเข้าไปในยางเพื่อช่วยในกระบวนการผลิตในขั้นตอนต่างๆ เป็นไปได้ง่ายยิ่งขึ้น สารในกลุ่มนี้จึงช่วยลดระยะเวลาและพลังงานที่จะใช้ในกระบวนการผลิต ยกตัวอย่างสารที่ทำให้ยางเหนียวติดกัน ซึ่งเป็นสารที่ช่วยในกระบวนการผลิตอีกอย่างหนึ่ง เช่น ปิโตรเลียมเรซิน ฟีนอลิกเรซิน ไซลอลฟอร์มอลดีไฮด์เรซิน โคเรซิน เป็นต้น

2.5 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง

กระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากยางแห้ง เริ่มต้นจากการออกสูตรส่วนประกอบของยางและสารเคมี ตามชนิดและปริมาณที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผลิต ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการบดยางให้นิ่ม (Mastication) ในกรณีที่ใช้ยางธรรมชาติ และการบดผสมยางกับสารเคมี (Mixing) ซึ่งทั้ง 2 กระบวนการนี้จะใช้เครื่องมือการบดที่มีด้วยกัน 2 แบบ คือ เครื่องบดระบบเปิด (Open mill or Two-roll mill) และเครื่องบดระบบปิด (Internal mixer) จากนั้นจะนำยางที่บดผสมกับสารเคมีแล้ว (Compounded rubber) ไปขึ้นรูป (Forming) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการแล้วอบให้ยางคงรูป (Vulcanization) และตกแต่งผลิตภัณฑ์ในขั้นสุดท้าย (วราภรณ์ ขจรไชยกุล, 2451)

2.5.1 การบดยาง

- เครื่องมือ (Machinery) เครื่องมือกลที่ใช้บดยางให้นิ่มและใช้บดยางกับสารเคมีต่างๆ ทั้งในระดับห้องปฏิบัติการหรือในระดับโรงงาน แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1) เครื่องบดผสมระบบเปิด รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะเครื่องบดระบบเปิด ซึ่งประกอบด้วย ลูกกลิ้ง 2 ลูก เรียงในแนวนอนและแนวขนานกัน ลูกกลิ้งลูกหน้าจะมีสกรูสำหรับปรับช่องระหว่างลูกกลิ้งทั้งสอง (Nip หรือ Gap)

2) เครื่องบดผสมระบบปิด รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะเครื่องบดระบบปิด เครื่องมือนี้มีส่วนประกอบสำคัญ คือ แรม (Ram) ที่จะกดยางให้ถูกบดด้วยโรเตอร์ (Rotor)

- การบดยางให้นิ่มและการบดผสมยางกับสารเคมี การใช้ยางธรรมชาติจำเป็นต้องผ่านกระบวนการบดให้นิ่มก่อนที่บดผสมสารเคมี เพราะยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลสูง การบดยางให้นิ่มเสียก่อนนั้นเป็นการทำให้โมเลกุลฉีกขาด น้ำหนักโมเลกุลลดลง ส่วนยางสังเคราะห์จะถูกสังเคราะห์ขึ้นโดยมีการควบคุมน้ำหนักโมเลกุล ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นต้องบดให้นิ่มก่อน วิธีการบดยางให้นิ่มคือบดยางล้วนๆ และอาจใช้สารเคมีผสมพวกสารทำให้ยางนิ่มช่วยเร่งด้วย เมื่อยางนิ่มพอเหมาะแล้วจึงจะทำการบดผสมสารเคมีบดให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียวกัน ขั้นตอนการเติมสารเคมีต่างๆลงบดผสมกับยางนั้น จะต้องจัดลำดับการเติมไว้อย่างถูกต้อง สารผสมที่มีขนาดอนุภาคใหญ่และผสมกับยางยากจะถูกเติมลงไปก่อน สารเคมีพวกเร่งให้ยางเกิดการคงรูปจะถูกจัดไว้ลำดับสุดท้าย มิฉะนั้นแล้ว ยางผสม

สารเคมีอาจเกิดปัญหาคงรูปก่อนเวลาหรือภาษาที่ทางโรงงานเรียกกันว่า “ยางตาย” คือ ยางจะมีลักษณะที่คงรูปแล้ว ยางที่ได้บดผสมสารเคมีเรียบร้อยแล้ว จะถูกเก็บไว้อย่างน้อย 16 ชั่วโมง ก่อนการนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ

รูปที่ 2.5

ลักษณะเครื่องบดระบบเปิด (Open Mill หรือ Two-Roll Mill)

รูปที่ 2.6

ลักษณะเครื่องบดระบบปิด (Internal Mixer)

- ยางมาสเตอร์แบทช์ (Masterbatch) ยางมาสเตอร์แบทช์ในทางเทคโนโลยียาง หมายถึง ยางผสมที่ประกอบด้วยยางกับสารอื่น ซึ่งโดยปกติมักจะเป็นสารหลักชนิดใดชนิดหนึ่ง การใช้มาสเตอร์แบทช์นั้น เพื่อความสะดวก ความสะอาด หรือความแน่นอนของการชั่งน้ำหนักสาร สำหรับสูตรยางที่มีการใช้สารบางชนิดในปริมาณน้อยมาก และสารนั้นๆ มีราคาแพง มีประสิทธิภาพ หรือที่มีผลต่อคุณภาพของสูตรยางมาก

2.5.2 การขึ้นรูป

การขึ้นรูปยางที่ได้ผสมสารเคมีเรียบร้อยแล้วให้เป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ มี 4 วิธี คือ

- การใช้เบ้าพิมพ์ (Moulding) ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางเกิดเป็นรูปร่างของผลิตภัณฑ์ พร้อมๆกับการเกิดปฏิกิริยายางคงรูปโดยความร้อนและแรงอัด เบ้าพิมพ์ที่ใช้จะก่อให้เกิดรูปร่างของ ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เบ้าพิมพ์มีแบบต่างๆ คือ แบบอัด (Compression mould) แบบกึ่งฉีด (Transfer mould) และแบบฉีด (Injection mould)

- การอัดผ่านดาย (Extruding) เครื่องที่ใช้อัดยางผ่านดาย เป็นเครื่องที่ทำงานโดยการ อัดหรือดันยางไปยังส่วนหัวของเครื่องซึ่งมีดายรูปร่างต่างๆตามลักษณะของผลิตภัณฑ์ ยางจะออกจาก ดายเป็นชิ้นยางและมีรูปลักษณะตามดาย ชนิดของเครื่องแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ เครื่องที่อาศัยแรงอัด จากแรม (Ram) และ เครื่องที่อาศัยแรงอัดจากการหมุนของสกรู (Extruder หรือ Forcing Machine หรือ Tuber)

- การอัดผ่านดาย (Calender) คาเล็นเดอร์เป็นเครื่องที่ประกอบด้วยชุดของลูกกลิ้ง จำนวนต่างๆ คือ 2 หรือ 3 หรือ 4 ลูกกลิ้ง ซึ่งทำมาจากเหล็กหล่ออย่างดี ผิวหน้าขัดเรียบ การใช้เครื่อง คาเล็นเดอร์เพื่องานการรีดยางเป็นแผ่นเรียบ มีความหนาและความกว้างสม่ำเสมอ หรือเพื่องานการ ฉาบยางอย่างบางๆลงบนผ้า หรือแผ่นใยลวด (วิธีที่นี้เรียกว่า “Coating”) หรือเพื่องานการรีดอัดยาง เป็นฟิล์มบางๆอัดลงในเนื้อผ้า โดยอาศัยแรงเสียดทาน (Friction) ระหว่างลูกกลิ้ง (วิธีการนี้เรียกว่า “Frictioning”)

- การฉาบสารละลายยางบนผ้า (Spreading on fabric from rubber solution) กรรมวิธีนี้ประกอบด้วยการนำยางที่ผสมสารเคมีด้วยเครื่องบดผสมยางแบบ 2 ลูกกลิ้ง ไปตัดชิ้นเล็กๆ แช่ตัวทำละลายโดยทำให้สารละลายยางนี้มีความเข้มข้นมากจนอยู่ในสถานะคล้ายแป้งกับน้ำที่ เรียกว่า “Dough” อุปกรณ์การฉาบยางบนผ้า ประกอบด้วยใบมีดยึดติดอยู่กับที่เรียกว่า “Doctor”

ใบมีดนี้จะเกลี่ยยางและฉาบอย่างสม่ำเสมอบนผ้าที่ผ่านมาใต้ใบมีด จากนี้ผ้าที่ได้ถูกฉาบด้วยยางแล้วจะเคลื่อนไปผ่านความร้อน (Heated Chest) เพื่อให้ตัวทำละลายยางระเหยออกจากผ้า

ในงานวิจัยนี้ เราใช้วิธีการขึ้นรูปแบบการใช้เบ้าพิมพ์ ซึ่งเบ้าพิมพ์ที่ใช้เป็นแบบอัด (Compression mould) โดยแบ่งตามมาตรฐานต่างๆ ที่จะนำไปทำการทดสอบ

2.5.3 **การทำให้ยางคงรูป** (Vulcanizing)

การทำให้ยางคงรูป คือ การทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงระหว่างต่างโมเลกุลและเป็นผลให้เพิ่มความยืดหยุ่นตัว รวมทั้ง ลดความเสียรูปทรงของยางเมื่อปล่อยยางให้เป็นอิสระจากแรงที่กระทำให้เสียรูป ซึ่งผลของปฏิกิริยาดังกล่าว ทำให้สามารถนำยางไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง วิธีการที่จะทำให้ยางคงรูปมีหลายวิธี ซึ่งการเลือกใช้วิธีต่างๆนั้น ขึ้นอยู่กับรูปร่างและลักษณะของผลิตภัณฑ์

- วิธีทำให้ยางคงรูปด้วยเครื่องอัด (Vulcanization by hydraulic press) ใช้กับการทำผลิตภัณฑ์ยางชนิดที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แบบอัดหรือแบบกึ่งฉีด
- ทำให้ยางคงรูปแบบเปิด (Open cure) ใช้สำหรับทำผลิตภัณฑ์ยางชนิดที่ไม่ต้องการความแน่นอนของรูปร่างโดยแม่พิมพ์
- ทำให้ยางคงรูปโดยระบบต่อเนื่อง (Continuous vulcanization) ซึ่งอาศัยความร้อนจากระบบความดันไอสูง ความร้อนจากไฟฟ้า ความร้อนจากระบบ microwave และจากระบบอื่นๆ

ในงานวิจัยนี้ ทำการเติมสารช่วยในการคงรูปลงไปในขั้นตอนสุดท้ายของการบดผสมเลยแล้วจึงนำไปขึ้นรูป โดยใช้เครื่องอัดแบบเบ้าพิมพ์ ตามที่กล่าวมาแล้ว

2.5.4 **การตกแต่งผลิตภัณฑ์ยาง** (Finishing)

ขั้นสุดท้ายของการทำผลิตภัณฑ์ยาง คือ การตกแต่งชิ้นผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีวิธีการหลายแบบและการเลือกวิธีการนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของผลิตภัณฑ์ วิธีการตกแต่ง เช่น ใช้มือตกแต่งโดยการใช้กรรไกรขลิบ หรือตัดส่วนเกิน ใช้เครื่องตกแต่ง หรือใช้วิธีการขัดด้วยล้อขัดผิวหน้า เป็นต้น

2.6 **สารตัวเติมแร่ดินเหนียว** (CLAY)

แร่ดินเหนียวที่สนใจศึกษาในงานวิจัยนี้ มี 4 ชนิด คือ แร่ดินเหนียว montmorillonite, แร่ดินเหนียว kaolinite, แร่ดินเหนียวขัดสี (Bleaching Clay) และแป้งทัลคัมคัล โดยที่ลักษณะเฉพาะของแร่ดินเหนียวทั้งสี่ชนิด เป็นดังนี้

2.6.1 **แร่ดินเหนียว** Montmorillonite

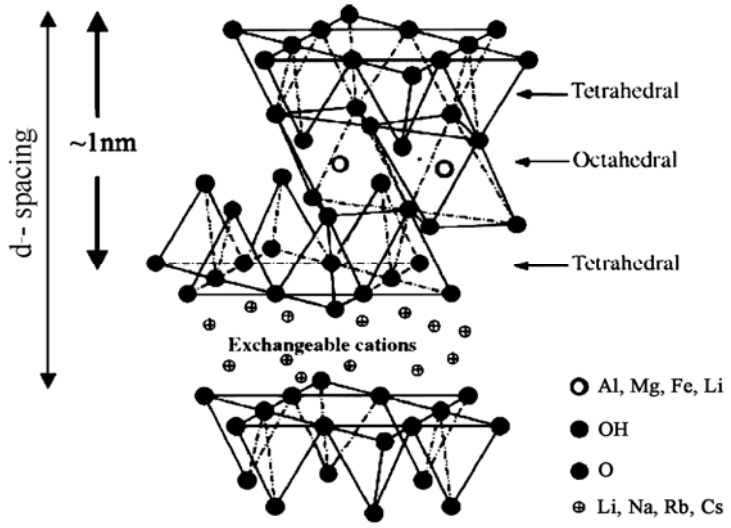
แร่ดินเหนียว montmorillonite มีสูตรโครงสร้างทั่วไปดังนี้ $(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2$ และมีพื้นที่ผิวประมาณ 700 – 800 m^2/cm^3 (Grim, 1968) เป็นแร่ดินเหนียวในกลุ่มของ smectite มีโครงสร้างเป็นแผ่นชนิด 2:1 โดยเป็นชั้นของ octahedral ถูกประกบด้วยชั้นของ tetrahedral ดังรูปที่ 2.7 แร่ดินเหนียว montmorillonite มีความยาวต่อความกว้าง (Aspect ratio) สูง โดยความหนาแต่ละชั้นประมาณ 1 นาโนเมตร ในขณะที่ผิวด้านบนมีความกว้างประมาณ 200 – 300 นาโนเมตร ระยะระหว่างแต่ละชั้น (Interlayer) นอกจากยึดกันด้วยแรง Van der Waals แล้ว ยังมีประจุบวกที่สามารถแลกเปลี่ยนประจุได้อยู่ที่ระยะระหว่างแต่ละชั้น ซึ่งมักเป็นประจุบวกของ Hydrated alkali metal และ alkali earth cation อาทิ Na^+, K^+, Ca^{2+} หรือ Mg^{2+} เป็นต้น (Rattana, 2003) ปัจจัยอันเนื่องมาจากแรง electrostatic และแรง Van der Waals อย่างอ่อนนั้น เป็นปัจจัยทำให้แร่ดินเหนียว montmorillonite มีความสามารถในการบวมตัวได้ในน้ำสูง

2.6.2 **แร่ดินเหนียว** Kaolinite

แร่ดินเหนียว kaolinite มีสูตรโครงสร้างทางเคมี คือ ไฮดรัสอะลูมิโนซิลิเกรต (Hydrous aluminosilicate, $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ ซึ่งมีโครงสร้างเป็นชั้น (Platelet Structure) ชนิด 1:1 โดยเป็นชั้นของ octahedral สลับกับชั้นของ tetrahedral ดังรูปที่ 2.8 ความหนาของแต่ละชั้นประมาณ 0.7 นาโนเมตร และมีความยาวต่อความกว้าง (Aspect ratio) ที่แตกต่างกันมาก คือ 12 : 1 ถึง 1 : 1 สำหรับระหว่างชั้นของแร่ดินเหนียวของ kaolinite ยึดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน และเนื่องจากพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงมาก จึงเป็นสาเหตุสำคัญทำให้ชั้นของแร่ดินเหนียวชนิดนี้ขยายตัวได้น้อยมาก

รูปที่ 2.7

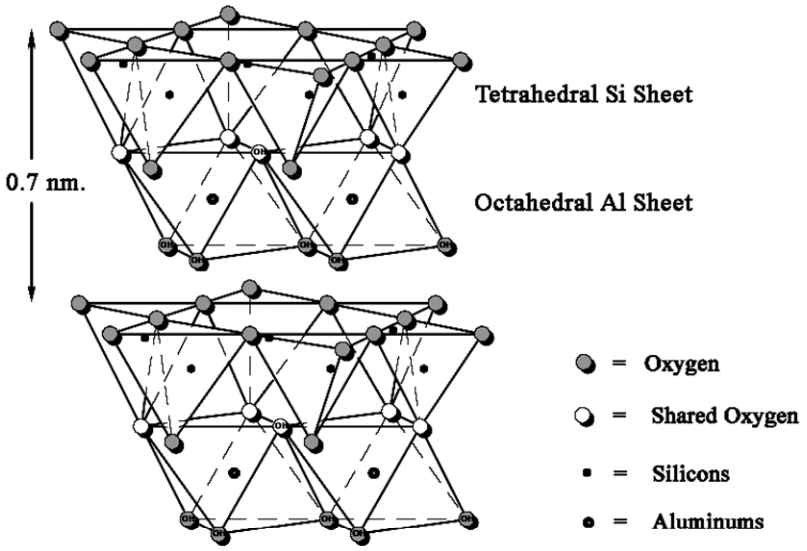
โครงสร้างของแร่ดินเหนียว Montmorillonite



แร่ดินเหนียว kaolinite จัดเป็นแร่ดินเหนียวธรรมชาติ โดยทั่วไปอาจจะมีแร่ดินเหนียว Illite, Mica หรือ Smectite ปะปนมาด้วย (Peter, 1996) นิยมใช้มากที่สุดเทียบกับสารตัวเติมไม่มีสีดำชนิดอื่น เนื่องจากมีราคาถูก สีขาว เป็นผงขนาดเล็ก มีความแข็งแรงสูง และมีพื้นที่ผิวเฉื่อย (Inert) นิยมใช้ผสมเพื่อเพิ่มความแข็ง (Stiffness) ให้กับพอลิเมอร์ สามารถประยุกต์ใช้งานเป็นสารตัวเติมได้ในอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมพลาสติก ยาง สีทา ปุ๋ย เซรามิกส์ หมึกพิมพ์ กาว สิ่งทอ และยา แต่มีความหนาแน่นค่อนข้างสูง (260 g/cm^3) เมื่อใส่ปริมาณมากจะทำให้ผลิตภัณฑ์ยางหนัก แร่ดินเหนียว kaolinite เป็นสารตัวเติมชนิดกึ่งเสริมแรง (Semi-reinforcing fillers) หรือไม่เสริมแรง ช่วยลดต้นทุนเพียงอย่างเดียว (อิทธิพล แจ้งชัด, 2545)

รูปที่ 2.8

โครงสร้างของแร่ดินเหนียว Kaolinite



2.6.3 **แร่ดินเหนียวขัดสี** (Bleaching Clay)

แร่ดินเหนียวขัดสี (Bleaching Clay) เป็นแร่ดินเหนียว bentonite ชนิดหนึ่ง ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของ smectite เช่นเดียวกับแร่ดินเหนียว montmorillonite ที่มีแคลเซียม (Ca^{2+}) ในองค์ประกอบ หรือเรียกว่า แร่ดินเหนียว calcium bentonite มีสูตรโครงสร้างทั่วไปดังนี้ $Ca_{0.33}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)$ (George Wypych, 1998)

แร่ดินเหนียวขัดสี จัดเป็นแร่ดินเหนียวธรรมชาติที่ไม่สามารถบวมตัวในน้ำได้ ส่วนใหญ่จะใช้ในอุตสาหกรรมของผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับสุขภาพ เช่น อาหารที่ใช้กำจัดสารพิษ (Detox diet) เนื่องด้วยแร่ดินเหนียวชนิดนี้มีคุณสมบัติที่ดีด้านการทำความสะอาด (Cleansing properties) นอกจากนี้ สามารถใช้แร่ดินเหนียวขัดสี ในการฟอกสี (Decolorize) ของน้ำมัน ได้อีกด้วย

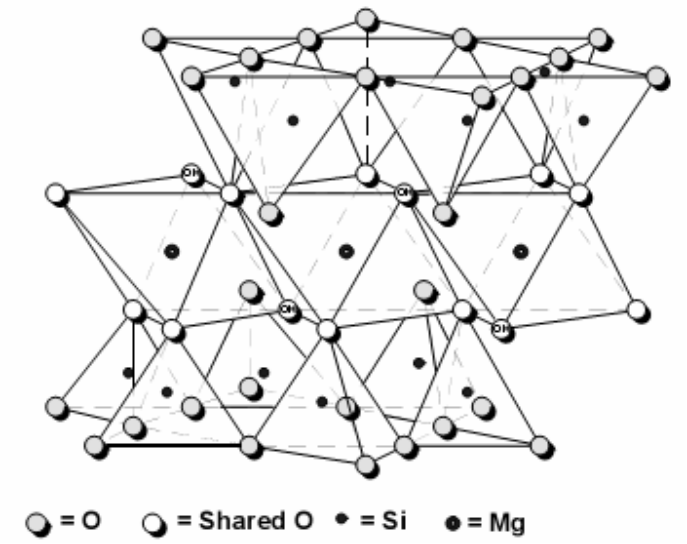
2.6.4 แป้งทัลคัมคัล (Talcum)

แป้งทัลคัมคัล (Talcum) มีสูตรโครงสร้างทางเคมีคือ ไฮเดรตแมกนีเซียมซิลิเกต (Hydrated magnesium silicate, $Mg_3[Si_4O_{10}(OH)_2]$) ดังรูปที่ 2.9 แป้งทัลคัมคัล เป็นสารตัวเติมเฉื่อย สีขาวถึงสีเขียวจาง มักใช้เป็นสารป้องกันการติด (Antitack agent) ของก้อนยางไม่ให้ติดกับวัสดุอื่น หรือติดกันเองในระหว่างขบวนการผลิต นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรง (Reinforcing filler) ในพลาสติก โดยเฉพาะพอลิพรอพิลีน (PP) สามารถใช้ผสมเซรามิกส์ สีทา อุตสาหกรรมกระดาษ เครื่องสำอาง เป็นต้น (อิทธิพล แจ้งชัด, 2545)

แป้งทัลคัมคัล เป็นสินแร่ที่ไม่แข็ง (Soft mineral) เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นชั้นๆ คล้ายแร่ดินเหนียว Kaolin แต่มีแรงยึดระหว่างชั้นต่ำ จึงเกิดการหลุดออกของชั้น (Delamination) ได้ง่ายเมื่อได้รับแรงทำให้มีสมบัติหล่อลื่นและไม่แข็ง อนุภาคมีความยาวต่อความกว้าง (Aspect ratio) สูงประมาณ 5 – 20 มีความหนาแน่นค่อนข้างสูง (ประมาณ 2.8 g/cm^3) มีขนาดอนุภาคประมาณ 5 – 8 ไมครอน และพื้นที่ผิว (BET N_2) ประมาณ 6 – 10 m^2/g

รูปที่ 2.9

โครงสร้างของแป้งทัลคัม



เมื่อเทียบกับสารตัวเติมอินทรีย์ชนิดอื่น แป้งทัลคัมคัลมีพื้นที่ผิวที่ไม่ชอบน้ำหรือสมบัติไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) สูงสุด เนื่องจากความสมดุลของโครงสร้างที่มีขั้วและความเป็นกลางของประจุในชั้นโครงสร้าง ซึ่งสมบัตินี้เป็นสมบัติสำหรับวัสดุพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้วต่างๆ เมื่อผสมในยางจะช่วยลดต้นทุนการผลิต เพิ่มสมบัติความเป็นฉนวน (Insulating properties) ลดสมบัติการซึมผ่าน (Permeability) ของอากาศและของเหลว เพิ่มความแข็ง (Stiffness) ให้กับยาง

สำหรับสารตัวเติมแร่ดินเหนียวทั้ง 4 ชนิดนี้ เมื่อทำการตรวจสอบราคาแล้ว พบว่า

แร่ดินเหนียว montmorillonite	ราคากิโลกรัมละ	40	บาท
แร่ดินเหนียว kaolinite	ราคากิโลกรัมละ	15	บาท
แร่ดินเหนียวขัดสี	ราคากิโลกรัมละ	12	บาท
แป้งทัลคัม	ราคากิโลกรัมละ	7	บาท

จะเห็นได้ว่า แร่ดินเหนียว montmorillonite มีราคาแพงที่สุด เนื่องจาก กระบวนการทำให้บริสุทธิ์ที่ซับซ้อนและมักพบตามแหล่งภูเขาไฟ ซึ่งพบได้น้อยในประเทศไทย ส่วนแร่ดินเหนียว kaolinite และแร่ดินเหนียวขัดสีนั้น ราคาอยู่ในระดับปานกลาง เนื่องจากสามารถพบได้มากในประเทศ แม้ว่าแป้งทัลคัม จะนำเข้าจากประเทศจีน แต่ก็มีราคาถูกที่สุด เนื่องจาก กระบวนการทำให้บริสุทธิ์ที่ไม่ยุ่งยากและมีปริมาณมากในธรรมชาติ

2.7 การปรับสภาพพื้นผิวสารตัวเติมแร่ดินเหนียว

เนื่องจากสารเคมีที่ใช้ปรับสภาพพื้นผิวของแร่ดินเหนียว เรียกว่า coupling agent โดยชนิดของ coupling agent ที่เหมาะสมกับการใช้งานขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นผิวของสารตัวเติม ดังนี้

2.7.1 การปรับสภาพผิวของแร่ดินเหนียว Montmorillonite

แร่ดินเหนียว montmorillonite มีประจุของ alkali ที่บริเวณระหว่างชั้นแร่ดินเหนียว (interlayer) เป็นผลให้ montmorillonite เป็น hydrophilic จึงไม่สามารถเข้ากันได้กับสารที่เป็น organophillic อย่างออร์แกนนิคพอลิเมอร์ได้ ดังนั้น จึงต้องปรับสภาพแร่ดินเหนียวให้เป็น organophillic clay โดยทำการแลกเปลี่ยนประจุกับ coupling agent

$$X \cdot clay \; + Y^{+} \leftrightarrow Y \cdot clay \; + \; X^{+}$$

เมื่อ X^{+} เป็นไอออนของ clay และ Y^{+} เป็น electrolyte ของ coupling agent โดยค่าที่แสดงถึงปริมาณประจุที่แลกเปลี่ยนได้ เรียกว่า Cation Exchange Capacity (CEC)

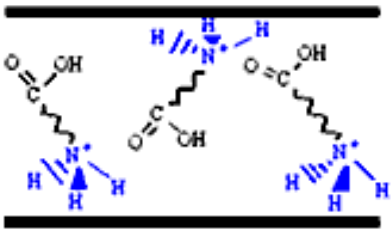
โดยหลักการทำงานของ coupling agent แบบแลกเปลี่ยนประจุชนิดต่างๆ 2 ชนิด (Kornmann,1999) ได้แสดงไว้ ดังนี้

(a) Amino Acids

ประกอบด้วยกลุ่ม Amino (—NH_2) และกลุ่มของ Acidic Carboxyl (—COOH) อยู่คนละขั้ว ดังรูปที่ 2.10 โดยส่วนที่เป็นกลุ่มของแอมโมเนียจะทำปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ Ammonium ion (NH_3^{+}) ซึ่งเป็นกลุ่มที่จะแลกเปลี่ยนกับ exchangeable cation ที่บริเวณระหว่างชั้นของแร่ดินเหนียว montmorillonite ในขณะที่กลุ่มของ –COOH จะเป็นส่วนที่ทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ วิธีนี้นิยมใช้กับพอลิเมอร์ที่มีขั้วบ้าง

รูปที่ 2.10

ลักษณะโครงสร้างของ Amino Acids



(b) Alkylammonium ion

มีสูตรเคมีพื้นฐาน คือ $CH_3—(CH_2)_n—NH_3^+$ โดย $1 < n < 18$ (Lan et al., 1995) พบว่าเมื่อ n มีค่ามากกว่า 8 แล้วจะทำให้ความเป็น organophillic ของแร่ดินเหนียวเพิ่มขึ้น และช่วยให้เกิดพอลิเมอร์คอมโพสิตได้ดีขึ้นด้วย ซึ่งหลักการใกล้เคียงกับ Amino Acid โดยกลุ่มของ Ammonium ion จะแลกเปลี่ยนกับ exchangeable cation ที่ interlayer ของแร่ดินเหนียว montmorillonite ในขณะที่กลุ่มของ CH_3 จะเป็นส่วนที่ทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้ว

Arroyo และคณะ, 2003 ได้ศึกษาผลของการใช้ octadecylamine ในการปรับปรุงสภาพผิวของแร่ดินเหนียว montmorillonite ต่อคุณสมบัติของยางธรรมชาติ พบว่า เมื่อใช้แร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ปรับสภาพแล้ว ที่เรียกว่า ออแกนโนเคลย์ (Organoclay) ในปริมาณ 10 ส่วนในยาง 100 ส่วน ทำให้ความทนทานต่อแรงดึงยืด (Tensile Strength) ของยางคอมพอสิทดีกว่ายางที่ผสมกับเขม่าดำปริมาณ 40 phr

Magaraphan และคณะ, 2003 ได้ศึกษาการปรับสภาพผิวของแร่ดินเหนียว montmorillonite ด้วย primary amine และ quaternary amine ซึ่งมีความยาวของโซ่คาร์บอน 12 ถึง 18 ตัว และสามารถทำให้เกิดนาโนคอมพอสิทแบบ exfoliated ของยางธรรมชาติในสารละลายโทลูอีนได้อย่างสมบูรณ์ เมื่อใส่แร่ดินเหนียว montmorillonite ในปริมาณต่ำกว่า 10 phr (Part per hundred of rubber – phr) โดย primary amine สามารถทำให้เกิดการกระจายตัวของแร่ดินเหนียวได้

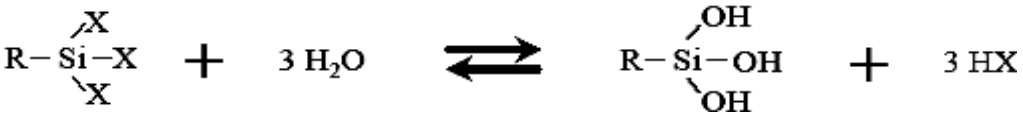
ดีกว่า quaternary amine และเมื่อความยาวของโซ่คาร์บอนเพิ่มขึ้นจะทำให้การกระจายตัวของแร่ดินเหนียวดีขึ้น ซึ่งการกระจายตัวที่ดีขึ้นทำให้คุณสมบัติเชิงกลดีขึ้นด้วย

2.7.2 การปรับสภาพผิวของแร่ดินเหนียว Kaolinite และแร่ดินเหนียวขัดสี

ส่วนแร่ดินเหนียว kaolinite และแร่ดินเหนียวขัดสี นั้น แม้ว่าระหว่างชั้นของแร่ดินเหนียวจะไม่มีไอออนอยู่ระหว่างชั้น แต่พื้นผิวของแร่ดินเหนียว kaolinite มีหมู่ silinol อยู่ ทำให้พื้นผิวมีความมีขั้วสูง ไม่สามารถเข้ากับพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้วเช่นกัน โดยมากการปรับสภาพผิวของแร่ดินเหนียว kaolinite จะใช้ coupling agent ประเภท silane (Silane Coupling Agent) ดังนี้

รูปที่ 2.11

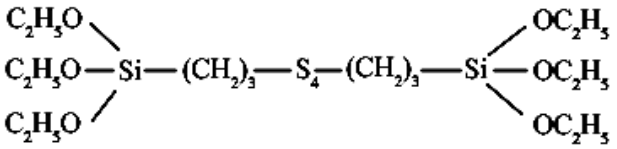
ปฏิกิริยา Hydrolysis ของ Silane Coupling Agent



โดยมีสูตรโครงสร้างทางเคมี เป็น $R–SiX_3$ โดย R คือ หมู่ของ organofunction และ X คือ หมู่ของ hydrolyze ซึ่งสามารถเปลี่ยนเป็นกลุ่ม silanols ในกระบวนการ Hydrolysis ได้ โดย silane สามารถทำปฏิกิริยากับกลุ่ม hydroxyl ที่บริเวณผิวหน้าและขอบของชั้นแร่ดินเหนียวได้ดี สำหรับแร่ดินเหนียวแล้วพบว่า กลุ่มของ hydroxyl อาจพบได้ที่ผิวระหว่างชั้น (interlayer) แต่จะพบมากบริเวณขอบของชั้นของแร่ดินเหนียวและหมู่ของ organofunction จะเป็นส่วนที่ทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ ในงานวิจัยนี้เราใช้ silane-69 เป็นตัว coupling agent ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมี ดังนี้

รูปที่ 2.12

โครงสร้างของ Bis(3–triethoxysilyllpropyl)–tetrasulfane (Si–69)



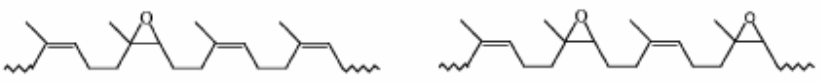
สุทธินี เนตรพุกกณะ, 2548 ได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติโดยวิธีนาโนเทคโนโลยี ด้วยการปรับสภาพผิวของสารตัวเติมโดยใช้ตัวประสาน silane (Silane–69) ลงไปบดผสมกับสารตัวเติม หรือที่เรียกว่า Melt Mixing และการปรับสภาพผิวทางเคมีด้วย silane บนผิวของ layered–silicate clays ซึ่งพบว่าวิธีการปรับสภาพผิวทางเคมีด้วย silane บนผิวของแร่ดินเหนียวสามารถเสริมแรงให้กับยางได้ดีกว่าวิธีการนำ silane มาบดผสมกับแร่ดินเหนียว (Melt Mixing)

2.8 ยาง Epoxidised Natural Rubber (ENR)

ยาง Epoxidised Natural Rubber (ENR) นั้น เป็นยางที่ปรับสภาพโดยการเติมออกซิเจนเข้าไปในโมเลกุลของยางตรงบริเวณพันธะคู่เกิดเป็นวงแหวนอีพ๊อกไซด์ โดยผ่านปฏิกิริยาอีพ๊อกซิเดชั่น (Epoxidation) เพื่อให้ยางมีความมีขั้วเพิ่มขึ้น ตั้งแต่อดีตเรื่อยมา ได้มีการนำมาทำวิจัยกันมากมายเกี่ยวกับการใช้ยาง ENR (Gelling, I.R., 1985, Sadequl, Ishiaku, Ismail, & Poh, 1998, Johnson & Thomas, 1999 และ 2000, Klinkklai et al,2003, Teh P.L. et al., 2004, Klinkklai et al.,2006 และ Saito, Klinklai, & Kawahara, 2007) ในอดีตยางชนิดนี้ จะต้องเตรียมขึ้นเอง แต่ทว่าในปัจจุบันสามารถหาซื้อได้แล้ว ยาง ENR มีลักษณะเป็นสีน้ำตาล เป็นยางธรรมชาติที่ปรับสภาพโครงสร้าง โดยใช้สารเคมีประเภทกรดเปอร์ออกซี่ (Peroxy acid) (เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังสี, 2543) ส่วนใหญ่ จะเป็นยาง Epoxidised Natural Rubber ที่มีองค์ประกอบของ % Epoxidised เป็น 25% (ENR–25) และ 50% (ENR–50) (Glasse et al., 2002) แสดงในรูปที่ 2.13

รูปที่ 2.13

โครงสร้างทางเคมีของยาง 25% (ENR–25) และ 50% (ENR–50) Epoxidised Natural Rubber



ENR-25 ENR-50

สมบัติที่สำคัญของยาง ENR คือ

1. ยาง ENR ที่มีออกซิเจนอยู่ในโครงสร้างโมเลกุล ทำให้ยางเกิดความมีขั้วขึ้น สามารถทนทานต่อน้ำมันได้เช่นเดียวกับยางไนไตร์

2. สามารถทนทานต่อโอโซนและการซึมผ่านของอากาศดี ใกล้เคียงกับยางบิวไทล์ เพราะพันธะคู่ในโครงสร้างยางธรรมชาติมีปริมาณน้อยลงและมีกลุ่มของอิพ๊อกไซด์เกิดขึ้นแทนที่พันธะคู่ ทำให้โมเลกุลของยางเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น

3. ผลิตภัณฑ์ยางที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน มีความต้านทานต่อความร้อนไม่ดี ยางจะมีความแข็งเพิ่มขึ้น เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลยางตรงตำแหน่งที่มีออกซิเจนมารวมตัวเป็นวงแหวนไม่แข็งแรง วงแหวนจะเปิดออกและเกิดการเชื่อมโยงแบบอีเทอร์พันธะขึ้น (Ether crosslink)

การใช้งานของยาง ENR คือ

1. ใช้ในอุตสาหกรรมรองเท้า โดยทำหน้าที่เป็นกาวหรือสารยึดติด
2. ใช้ในอุตสาหกรรมการทำสี ทำให้เกิดการยึดติดดี
3. ใช้ในอุตสาหกรรมยางรถยนต์ ทำให้ทนทานต่อการซึมผ่านของอากาศดี
4. ใช้เป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างยางและพลาสติก เช่น พีวีซี

Teh และคณะ, 2004 พบว่าการการเติมยาง ENR ซึ่งทำให้ยางมีขั้วมากขึ้น โดยใช้ยาง ENR ที่มี % Epoxidised เป็น 25%, ENR–25 และ 50%, ENR–50 ลงไปบดผสมรวมกับยางแท่ง โดยใช้ยาง ENR ปริมาณ 5 และ 10 phr และใช้ออแกนโนเคลย์ ปริมาณ 2 phr ซึ่งผลการทดลองเป็น ดังนี้

1. การเติมยาง ENR จะทำให้ เวลาที่ยางเริ่มคงรูปและเวลาในการขึ้นรูปลดลง รวมทั้งการเติมออแกนโนเคลย์ ก็เป็นการเร่งให้ขึ้นรูปได้เร็วขึ้นเช่นกัน

2. การกระจายตัวของออแกนโนเคลย์ เกิดขึ้นได้ดีในยาง ENR–50 แต่ในยาง ENR–25 นั้น ออแกนโนเคลย์เกิดการจับตัวเป็นก้อน (Clay aggregation)

3. ยางคอมพอสิทที่มี ENR–50 เป็นตัวประสาน ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) และโมดูลัสที่ 100% และ 300% ดีกว่าที่ใช้ยาง ENR–25 เป็นตัวประสาน

บทที่ 3

วิธีการวิจัย (METHODOLOGY)

ในบทนี้จะกล่าวถึงสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย, การเตรียมสารตัวเติม รวมทั้ง การทดสอบคุณลักษณะเฉพาะของสารตัวเติม, การผลิตยางผสมและการทดสอบคุณสมบัติต่างๆของยางผสมที่เตรียมได้

3.1 สารเคมี

สารเคมีที่จำต้องใช้ในงานวิจัยมีดังนี้

1. ยางธรรมชาติเกรด STR–5L (Natural Rubber, NR) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ย่งไทยการยาง จำกัด

2. ยางโบรโมบิวไทล์ (Bromobutyl Rubber, BIIR) ซึ่งมี % by weight of Br = 2 ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท มัลติเคมิ-คอลเอ็นจิเนียร์ริง จำกัด

3. ยางอีพอกซีไดส์ (Epoxidised Natural Rubber, ENR) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท แซน-แทป อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด

4. แร่ดินเหนียว Montmorillonite ประเภทผ่านการทำให้บริสุทธิ์แล้ว (Purified Clay) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท คุนิมิน จำกัด ประเทศญี่ปุ่น

5. แร่ดินเหนียว Kaolinite ประเภทผ่านการทำให้บริสุทธิ์แล้ว (Purified Clay) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท Kentucky-Tennessee Clay ประเทศสหรัฐอเมริกา

6. แร่ดินเหนียวขัดสี (Bleaching Clay) ชนิด classic 1B ของบริษัท สยามไทโก มาร์เก็ตติ้ง จำกัด ได้ความอนุเคราะห์จากบริษัท น้ำมันพืชปทุม จำกัด

7. Octadecylamine ($C_{18}H_{39}N$) ซื้อจากบริษัท ซัคเซส เคมิคอล จำกัด

8. Bis(3–triethoxysilylpropyl)–tetrasulfane (Silane - 69) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เจเจ เดกุสซา เคมิคอล จำกัด

9. กรดไฮโดรคลอริค และ กรดอะซิติค ซื้อจากบริษัท ซัคเซส เคมิคอล จำกัด

10. ซิลิกา (Hi–Silica 255s) ได้รับความอนุเคราะห์จากสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร

11. กรดสเตียริกและซิงค์ออกไซด์ ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท เพชรไทยเคมีภัณฑ์ จำกัด

12. ฟีนอลิก เรซิน (Phenolic Resin), น้ำมันสนจีน (Paraffinic Oil), พาราฟินแวกส์ (Paraffin Wax) และ แป้งทัลคัม (Talcum) ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท เพชรไทยเคมีภัณฑ์ จำกัด

13. ไดเอธิลีนไกลคอล (Diethylene glycol, DEG) ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท ทีโอซี ไกลคอล จำกัด

14. Dibenzothaizole Disulphide (MBTS) และ Tetramethyl Thiuramdisulphide (TMTD) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท มัลติเคมิคอลเอ็นจิเนียร์ริง จำกัด

15. กำมะถัน (Sulfur) ซื้อจากองค์การค้าคุรุสภา (ศึกษาภัณฑ์พาณิชย์)

3.2 ขั้นตอนการทดลอง

3.2.1 การปรับสภาพผิวของแร่ดินเหนียว Montmorillonite ด้วย Octadecylamine ($C_{18}H_{39}N$) (Arroyo et al., 2003)

การปรับสภาพผิวของแร่ดินเหนียวด้วย $C_{18}H_{39}N$ โดยใช้วิธี cation–exchange ด้วย alkylammonium ion ตามปฏิกิริยาด้านล่าง

$$Na^{+} - \text{clay} + \text{R} - \text{NH}_3^{+} \quad \leftrightarrow \quad \text{R} - \text{NH}_3^{+} \cdot \text{clay} + Na^{+}$$

มีขั้นตอนดังนี้

1. ปั่นแร่ดินเหนียว (20 กรัม) ในน้ำกลั่น 1,000 มิลลิลิตร เป็นเวลา 1 วัน ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อให้แร่ดินเหนียวบวมตัวในน้ำ

2. ปั่นแร่ดินเหนียวต่อที่อุณหภูมิ 80°C ซึ่งเป็นการให้ความร้อนเบื้องต้น (Preheat) ก่อนการทำปฏิกิริยากับ octadecylammonium ion ในขณะเดียวกันทำการเตรียมสารละลายร่วม ซึ่งเป็น

การเปลี่ยน octadecylamine ($C_{18}H_{39}N$) ให้เป็น octadecylammonium ion โดยการทำปฏิกิริยาระหว่าง octadecylamine (7.7 กรัม หรือ 28 มิลลิโมล) กับกรดไฮโดรคลอริก (2.9 มิลลิลิตร) ในน้ำ 500 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 30 นาที

3. ผสมสารละลายของ octadecylammonium ion ลงในสารละลายของแร่ดินเหนียวปั่นอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

4. ปั่นต่ออีก 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง

5. แยกตะกอนออกมาโดยใช้เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge)

6. ล้างคลอไรด์ไอออนออกโดยการล้างด้วยน้ำร้อนอุณหภูมิ 80°C 3 ครั้ง

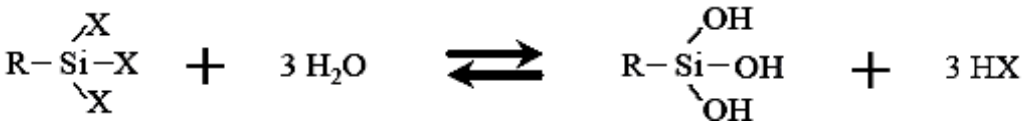
7. นำตะกอนดังกล่าวเข้าไปอบในเครื่องอบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.2.2 **การปรับสภาพผิวของแร่ดินเหนียว Kaolinite และ แร่ดินเหนียวขัดสี ด้วย Silane-69** (สุทธินี เนตรพุกกณะ, 2548)

การปรับสภาพผิวของแร่ดินเหนียวด้วย silane–69 สามารถทำได้ 2 วิธี คือ 1) การปรับสภาพผิวโดยการบดผสม ทำได้โดยการใส่ตัวประสาน silane–69 ลงไปบดผสมร่วมกับแร่ดินเหนียว โดยเรียกวิธีนี้ว่า Melt mixing และ 2) การปรับสภาพผิวทางเคมีด้วย silane–69 บนผิวของแร่ดินเหนียว โดยเรียกวิธีนี้ว่า Silylation method โดยแบบที่ 2 นี้มีขั้นตอนการทดลอง คือ

1. ปั่นแร่ดินเหนียว (20 กรัม) ในน้ำกลั่น 1,000 มิลลิลิตร เป็นเวลา 1 วัน ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อให้แร่ดินเหนียวบวมตัวในน้ำ

2. เตรียมสารละลายร่วม เอธานอล 95% โดยน้ำหนัก ในน้ำกลั่น แล้วเติม silane–69 ในปริมาณ 8% ของน้ำหนักแร่ดินเหนียว ปั่นอย่างต่อเนื่องเพื่อทำปฏิกิริยาไฮโดรไลเซชั่น (Hydrolyzation) ดังนี้



3. หยดกรดอะซิติกลงไปเพื่อเร่งปฏิกิริยาและเพื่อปรับ pH ของปฏิกิริยาให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสม จนกระทั่งสารละลายมีค่า pH 4.5 – 5.5 ปั่นทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง

4. จากนั้นนำสารละลายที่ได้มาผสมกับสารแขวนลอยของแร่ดินเหนียว เพื่อทำปฏิกิริยา Silylation ที่อุณหภูมิห้อง โดยคนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

5. แยกตะกอนออกมาโดยใช้เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge)

6. นำตะกอนดังกล่าวเข้าไปอบในเครื่องอบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 110ºC เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.2.3 การทดสอบลักษณะของสารตัวเติม

วิธีการที่ใช้ในการทดสอบคุณลักษณะเฉพาะของสารตัวเติมนั้น ประกอบด้วย

1. X–Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) ใช้วัดปริมาณแร่ธาตุที่เป็นองค์ประกอบคร่าวๆ ของแร่ดินเหนียวที่ยังไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพผิว หลักการของเทคนิค XRF คือ เมื่อรังสี X ที่มีพลังงานสูง ไปกระทบชิ้นงาน จะทำให้ชิ้นงานปล่อย photon ออกมา (Fluoresced) โดย photon ที่ถูกปล่อยออกมาจากธาตุต่างชนิดกันในชิ้นงาน จะมีความยาวคลื่นและพลังงานต่างกัน และปริมาณของ photon ที่เปล่งออกมาขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุนั้นในสารนั้นๆ ด้วย

งานวิจัยนี้ ใช้เครื่อง XRF ยี่ห้อ Philips PW2404 ทดสอบที่ตึกขจัดกากกัมมันตรังสี สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ดังแสดงตามรูปที่ 3.1

2. Thermogravimetric Analyzer (TGA) ใช้ในการตรวจสอบปริมาณ coupling agent บนพื้นผิวของแร่ดินเหนียวที่ได้รับการปรับสภาพผิวแล้วหรือเรียกว่า ออแกนโนเคลย์ (Organoclay) โดยอาศัยหลักการที่ว่า สารแต่ละชนิดมีจุดเดือดและจุดสลายตัวที่แตกต่างกัน ดังนั้น เมื่อให้ความร้อนกับวัสดุตัวอย่างแล้วน้ำหนักของวัสดุจะหายไปเมื่อผ่านจุดเดือดหรือจุดสลายตัวของสารนั้นๆ

รูปที่ 3.1

เครื่อง XRF

รูปที่ 3.2

เครื่อง TGA – 50 Thermogravimetric Analyzer

งานวิจัยนี้ ใช้เครื่อง TGA – 50 Thermogravimetric Analyzer ของ Shimadzu ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ทดสอบที่อุณหภูมิตั้งแต่อุณหภูมิห้องถึง 900ºC ใช้อัตราการให้ความร้อนเป็น 5ºC ต่อนาที และให้ก๊าซไนโตรเจนไหลผ่านด้วยอัตรา 20 มิลลิลิตร ต่อนาที

3. X-Ray Diffraction (XRD) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 เป็นเครื่องที่ใช้ศึกษาความเป็นผลึกหรือความเป็นระเบียบของโครงสร้าง (Crystallinity) ของวัสดุและตรวจสอบระยะห่างระหว่างชั้นภายในของแร่ดินเหนียว โดยวัดจากความกว้างของ d – spacing ตามลักษณะตามรูปที่ 3.4 ด้วยการคำนวณด้วย Bragg's Law ดังนี้ (Kornmann, 1999)

$$n\lambda = 2d \cdot \sin\theta$$

เมื่อ n = ลำดับของการตกกระทบ

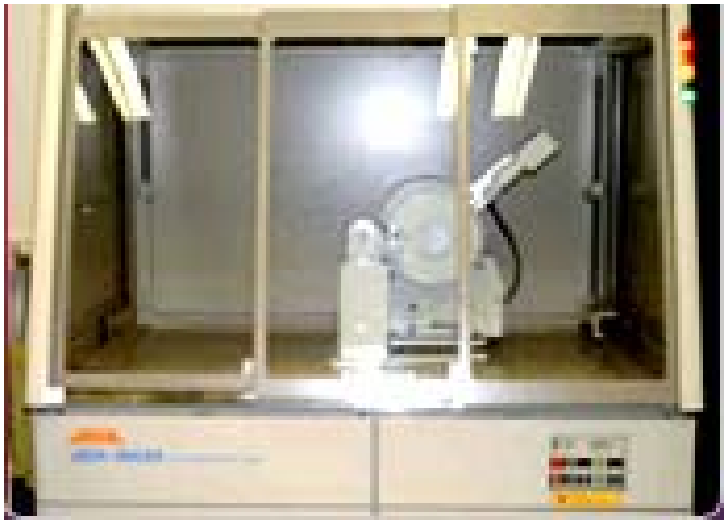
λ = ความยาวคลื่นของ X – rays

d = Lattice Spacing (d – Spacing)

θ = มุมที่ใช้ในการตกกระทบ

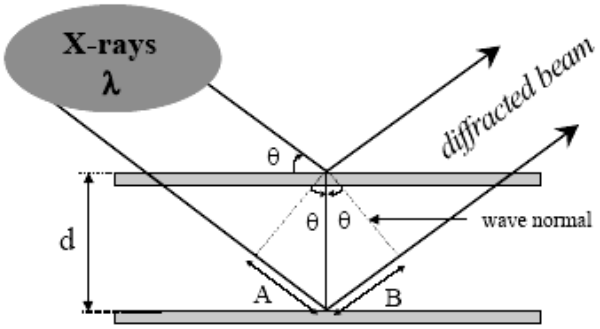
รูปที่ 3.3

เครื่อง X–Ray Diffractometer (XRD)



รูปที่ 3.4

ลักษณะการวัดของเครื่อง X–Ray Diffractometer (XRD)

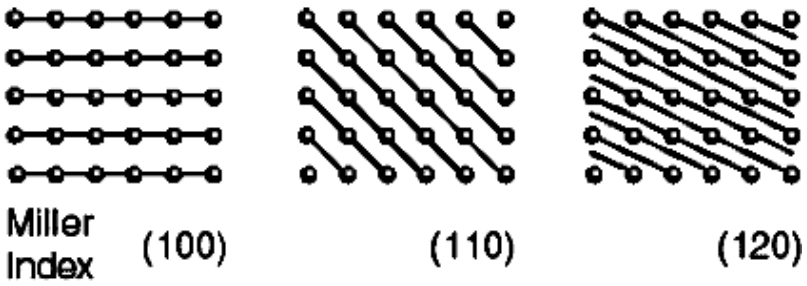


*ที่มา: Xavier Kornmann, Synthesis and Characterization of Thermoset-Clay Nanocomposites, 1999

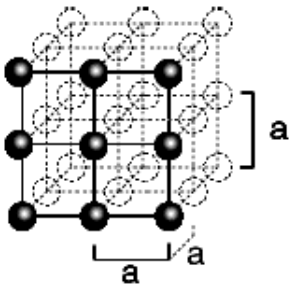
รูปที่ 3.5

(ก.) แสดงลักษณะของระนาบตาม Miller Index (ข.) แสดงระนาบสามมิติของวัสดุ

(ก.)



(ข.)



ที่มา: http://www.uiowa.edu/~c004020/exp4/exp.pdf

โดย d–spacing ที่ได้จากการวัดข้างต้นเป็นระยะที่ได้จากการสะท้อนของรังสีในระนาบ d_{001} ซึ่งกำหนดตาม Miller Index (http://www.uiowa.edu) ดังรูปที่ 3.5 (ก.) และ (ข.) โดยการแสดงระนาบต่างๆ ของ miller index นั้นแสดงด้วยสัญลักษณ์ (h k l) โดยใช้หลักการคล้ายคลึงกับการใช้สัญลักษณ์ของแกน xyz นั่นเอง และ peak ที่ได้จากเครื่อง XRD ที่ตำแหน่งต่างๆ จะแสดงถึงระยะที่ได้จากการสะท้อนของรังสีในระนาบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.6

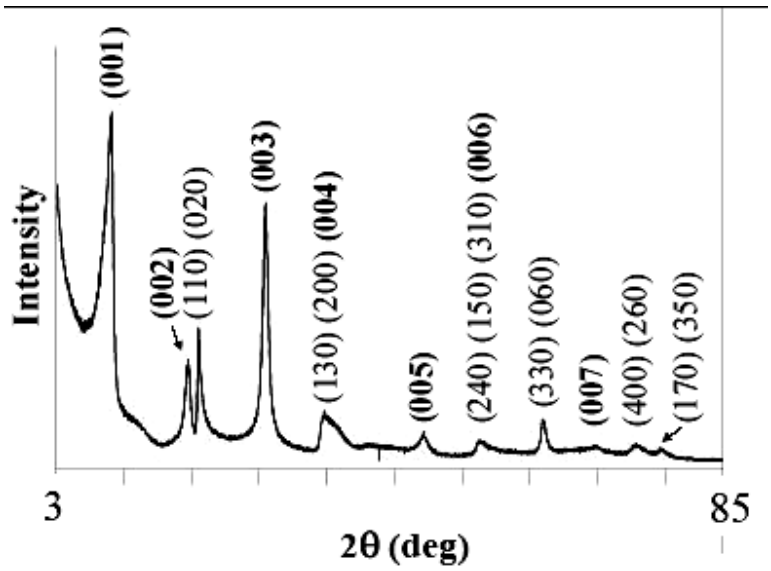
งานวิจัยนี้ ใช้เครื่อง XRD ยี่ห้อ JEOL – JDX 3530 ซึ่งใช้ CuKα ในการแผ่รังสี โดยมีช่วงการวัดตั้งแต่ $2\theta = 2 - 20^{\circ}$ โดย Step size เป็น 0.03 ทดสอบที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

4. <u>Fourier Transform Infrared Analyzer (FTIR)</u> ดังแสดงในรูปที่ 3.7 เป็นเป็นอุปกรณ์ซึ่งใช้หลักการดูดกลืนแสงของสเปกตรัมการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงแสงอินฟราเรด โดยวัดความเข้มของแสงที่ถูกดูดซับที่ความยาวคลื่นต่างๆ กัน ซึ่งใช้เพื่อศึกษาโครงสร้างทางเคมีของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ของสารตัวเติม

งานวิจัยนี้ ใช้เครื่อง FTIR Spectrometer รุ่น Perkin Elmer System 2000 ของศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำหรับแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้เป็นแสงอินฟราเรดช่วงกลาง ความยาวคลื่นตั้งแต่ 4,000 – 400 cm^{-1} มี resolution ที่ 4 cm^{-1} และใช้ detector ชนิด Triglycine Sulphate (TGS)

รูปที่ 3.6

ลักษณะผลของ XRD ตาม Miller Index



ที่มา: Xavier Kornmann, Synthesis and Characterization of Thermoset-Clay Nanocomposites, 1999

รูปที่ 3.7

เครื่อง Fourier Transform Infrared (FTIR)

3.2.4 การทดสอบความเข้ากันได้ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางโบรโมบิวไทล์

การทดสอบความเข้ากันได้ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางโบรโมบิวไทล์ สามารถทำได้หลายวิธี เช่น DSC (Differential Scanning Calorimeter), DMA (Dynamic Mechanical Analysis), SEM (Scanning Electron Microscope) เป็นต้น แต่ในที่นี้เลือกใช้วิธี DMA (Dynamic Mechanical Analysis) ทดสอบโดยใช้เครื่อง Dynamic mechanical measurements ดังแสดงในรูปที่ 3.8

เครื่อง Dynamic mechanical measurements เป็นเครื่องวิเคราะห์เชิงความร้อน โดยการวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารตัวอย่าง เครื่อง Dynamic mechanical measurements มีความสำคัญอย่างมากต่อการวิเคราะห์สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ เช่น เซรามิกส์ ดินเหนียว โลหะ และสินแร่ เป็นต้น คุณสมบัติที่วิเคราะห์ ได้แก่ ปริมาณผลึก จุดหลอมเหลว ศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของตัวอย่างจากการวิเคราะห์ปฏิกิริยา Decarboxylation และ Dehydration รวมทั้ง Glass Transition (T_g) ซึ่งจะเป็นการบ่งบอกได้ว่ายางทั้งสองชนิดที่นำมาบดผสมสามารถเข้ากันได้ จะได้ peak ของ T_g เพียง 1 peak เท่านั้น

เครื่อง Dynamic mechanical measurements ที่ใช้ยี่ห้อ NETZSCH ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยทำการทดสอบกับตัวอย่างของยางธรรมชาติและยางโบรโมบิวไทล์ ที่บดผสมกันในอัตราส่วน 0:100, 25:75, 50:50, 75:20 และ 100:0 ตามลำดับ ในเครื่อง Brabender (Internal Mixer) ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลาประมาณ 10 นาที นำยางผสมที่ได้ไปอัดเป็นแผ่น แล้วตัดชิ้นตัวอย่างทดสอบที่มีขนาด 3 x 3 x 3 มิลลิเมตร ทดสอบที่ความถี่ 1 Hz และแอมพลิจูด 60 μm อัตราการให้ความร้อนเป็น 2°C ต่อนาที ตั้งแต่ –120°C ถึง –5°C

รูปที่ 3.8

เครื่อง Dynamic mechanical measurements

3.2.5 การออกสูตรยาง

งานวิจัยนี้ สนใจการปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางโบรโมบิวไทล์ โดยปรับปรุงสูตรของยางในลูกฟุตบอลที่ได้รับจากบริษัท มัลติเคมิ–คอลเอ็นจิเนียร์ริง จำกัด ดังแสดงในภาคผนวก ข. ให้มีความเหมาะสมและง่ายต่อการเปรียบเทียบของสารตัวเติมให้มากขึ้น รวมทั้งสูตรใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน โดยแสดงในตารางที่ 3.1 ซึ่ง phr (Parts per hundred of rubber) หมายถึง ปริมาณสารที่ใส่ต่อปริมาณยางผสมทั้งหมด 100 ส่วน (ยางธรรมชาติรวมกับยางโบรโมบิวไทล์) ดังนี้

ตารางที่ 3.1

สูตรยาง NR/BIIR ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

สูตร	A		B	
ยางธรรมชาติ STR 5L (Natural Rubber, NR)	25	phr	25	phr
ยางโบรโมบิวไทล์ (Bromobutyl Rubber, BIIR)	75	phr	75	phr
ยางอีพอกซีไดส์ (Epoxidised Natural Rubber, ENR)	**0**	**phr**	**10**	**phr**
สารตัวเติม (Filler)*	10	phr	10	phr
กรดสเตียริก (สารกระตุ้น)	3	phr	3	phr
ซิงค์ออกไซด์ (สารกระตุ้น)	2	phr	2	phr
ซิลิกา	40	phr	40	phr
ฟินอลิก เรซิน (สารช่วยในกระบวนการผลิต)	2	phr	2	phr
น้ำมันสนจีน (สารทำให้ยางนิ่ม)	7.5	phr	7.5	phr
พาราฟินแวกส์ (สารทำให้ยางนิ่ม)	2.5	phr	2.5	phr
ไดเอธิลีน ไกลคอล (สารตัวเร่งปฏิกิริยา)	3.5	phr	3.5	phr
MBTS (สารตัวเร่งปฏิกิริยา)*	2	phr	2	phr
TMTD (สารตัวเร่งปฏิกิริยา)**	0.8	phr	0.8	phr
ซัลเฟอร์ (สารทำให้ยางคงรูป)	1	phr	1	phr

สารตัวเติมที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ แป้งทัลคัม, แร่ดินเหนียว montmorillonite, แร่ดินเหนียว kaolinite และแร่ดินเหนียวขัดสี (Bleaching clay) รวมทั้งสารตัวเติมทั้งสามชนิดที่ได้รับการปรับสภาพผิวแล้ว

MBTS* = Dibenzothaizole Disulphide

TMTD** = Tetramethyl Thiuramdisulphide

3.2.6 การบดผสมยาง

1. บดผสมยางในเครื่อง Two-roll Mill ซึ่งเป็นเครื่องบดผสมระบบเปิด ของบริษัท Kodaira Seisakkusho จำกัด รุ่น R11 – 3FF ที่สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร ดังแสดงในรูปที่ 3.9 อุณหภูมิเริ่มต้น 70°C โดยมีลำดับการผสมคือ อันดับแรกจะนำยางทั้งสอง หรือ สามชนิดบดให้นิ่ม ใช้เวลาประมาณ 5 – 10 นาที เนื่องจากยางทั้งสามมีความหนืดมูนนี่ (Mooney Viscosity) ที่ไม่เท่ากัน ต้องใช้ยางธรรมชาติ (และยาง ENR) ก่อนแล้วตามด้วยยางโบรโมบิวไทล์

2. เติมสารกระตุ้น (Activator) คือ กรดสเตียริกและซิงค์ออกไซด์ผสมจนเข้ากันได้ดี เห็นได้จากเนื้อยางมีสีขาวเสมอกัน ใช้เวลาประมาณ 3 นาที

3. ค่อยๆเติมสารตัวเติม คือ สารตัวเติมแร่ดินเหนียวต่างๆ ซึ่งเติมไดเอธิลีน ไกลคอล เอาไว้ก่อนแล้วและซิลิกา พร้อมกับการเติมสารทำให้ยางนิ่ม (Softener) คือ น้ำมันสนจีนและพาราฟิน แวกส์ รวมทั้ง สารช่วยในกระบวนการผลิต (Processing Aid) คือ ฟินอลิก เรซิน ใช้เวลาประมาณ 10 นาที

4. เติมสารตัวเร่ง (Accelerator) คือ MBTS และ TMTD แล้วจึงเติมซัลเฟอร์ลงไป บดผสมให้เข้ากัน โดยจะต้องใช้เวลาไม่มากนัก เพื่อป้องกันการเกิดการเชื่อมโยงร่างแหก่อนเวลาขึ้นรูป ใช้เวลาประมาณ 2 นาที

รูปที่ 3.9

เครื่อง Two-roll Mill

3.2.7 **การทดสอบสมบัติการคงรูป** (Cure Characteristic)

การทดสอบสมบัติการเชื่อมโยง สามารถที่จะทำได้โดยใช้เครื่องวัดการเชื่อมโยงของยาง (Curemeters for rubber compounds) 2 ชนิด คือ

1. เครื่องวัดการไหลแบบจานสั่น (Oscillating Disc Rheometers, ODR) เป็นเครื่องที่สามารถใช้วัดการเชื่อมโยงของยางได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ จึงเป็นเครื่องมือทดสอบการเชื่อมโยงที่เป็นที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมและห้องปฏิบัติการทดสอบยางทั่วไป เพื่อใช้ในการหาสภาวะในการเชื่อมโยงที่เหมาะสม หาเวลาที่ใช้ในขบวนการผลิตยาง และใช้ในการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ยาง

2. เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไร้จานหมุน (Rotorless curemeters) บางครั้งอาจเรียกว่า Moving Die Rheometers, MDR เป็นเครื่องวัดการเชื่อมโยงชนิดใหม่ที่มีการถ่ายเทอุณหภูมิรวดเร็ว เนื่องจากใช้ตัวอย่างเล็กและบางกว่า เป็นผลให้สามารถทดสอบการเชื่อมโยงได้เร็วกว่า นอกจากนั้นเครื่องชนิดนี้ ไม่มีข้อผิดพลาดของการทดสอบเนื่องจากแรงเสียดทานของจานหมุน จะให้ข้อมูลการทดสอบที่ถูกต้องแม่นยำกว่า เช่น ค่ามอดูลัสสูญเสีย (Loss modulus, E'') อัตราการเชื่อมโยง (Cure rate) และ Phase angle

ในงานวิจัยนี้ สมบัติการคงรูปของยางทดสอบโดยใช้เครื่อง Rheometer MDR 2000 (Moving Die Type) ของ Monsanto รุ่น MDR 2000 ที่สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร โดยใช้เวลาในการทดสอบ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 180ºC เพื่อหาค่าแรงบิด (Torque) สูงสุด และเวลาที่เหมาะสมในการขึ้นรูป (optimum cure time – t_{90}) โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D5289 ดังแสดงในรูปที่ 3.10

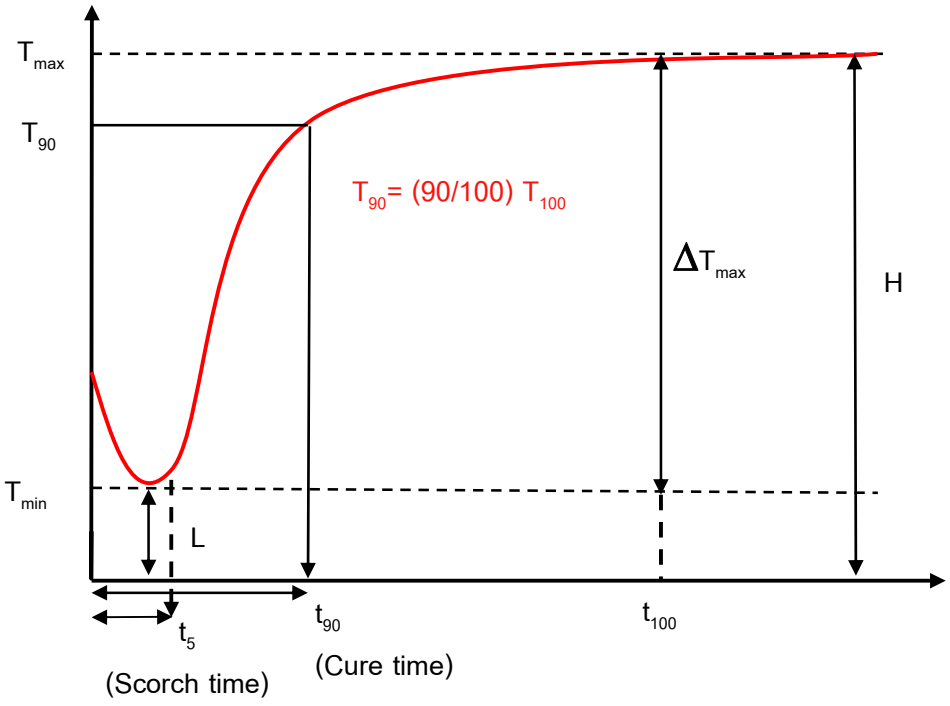
ส่วนใหญ่เวลาที่เหมาะสมในการขึ้นรูป เป็นเวลาที่ยางมีความแข็งแรงสูงขึ้นเพียง 90%, 95% หรือ 98% ของความแข็งแรงสูงสุด สำหรับงานวิจัยนี้ ยางบดผสมที่ใช้สารตัวเติมในกลุ่มแร่ดินเหนียว จะใช้เวลาในการขึ้นรูปที่ 90% ของความแข็งแรงสูงสุด (t_{90}) ดังแสดงในรูปที่ 3.11

รูปที่ 3.10

เครื่อง Moving Die Rheometer

รูปที่ 3.11

ลักษณะการคงรูปของยาง



โดย ΔT_{max} = ผลต่างของแรงบิดสูงสุด (T_{max}) และแรงบิดต่ำสุด (T_{min})

t_{100} = เวลาในการขึ้นรูปที่แรงบิดมีค่าสูงสุด (T_{max})

t_{90} = เวลาในการขึ้นรูปที่แรงบิดมีค่าสูงกว่าค่าแรงบิดต่ำสุด (T_{min}) เป็น 90% ของ T_{100}

t_5 = เวลาในการขึ้นรูปที่แรงบิดสูงกว่าแรงบิดต่ำสุด (T_{min}) 5% = scorch time

3.2.8 **ขั้นตอนการขึ้นรูป**

การขึ้นรูปของยางคอมโพสิตแบ่งเป็น 2 ชนิด ตามลักษณะของการทดสอบ โดยใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปที่ 180°C และเวลาในการขึ้นรูปใช้ตามผลการทดลองที่ได้จากการทดสอบสมบัติการคงรูป ดังนี้

1. การขึ้นรูปสำหรับการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) การทดสอบความแข็งกด (Hardness Test) การทดสอบยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (Compression Set Test) และการทดสอบการซึมผ่านของก๊าซ (Gas Permeability Test) ใช้เครื่องอัดยางคงรูป (Compression Molding) ของโรงงานชัยเจริญการช่าง ที่สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร ดังแสดงในรูปที่ 3.12

2. การขึ้นรูปสำหรับการทดสอบความทนทานต่อการสึกหรอ (Abrasion Test) ใช้เครื่องอัดยางคงรูป ของ Wabash MPI รุ่น V75H – 18 – BPX ที่สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร ดังแสดงในรูปที่ 3.13

รูปที่ 3.12

เครื่องอัดยางคงรูป สำหรับการทดสอบแรงดึง การทดสอบความแข็งกด การทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด และการทดสอบการซึมผ่านของก๊าซ

รูปที่ 3.13

เครื่องอัดยางคงรูป สำหรับการทดสอบความทนทานต่อการสึกหรอ

3.2.9 **การทดสอบคุณสมบัติของยางคอมพอสิท**

การทดสอบยางเป็นสิ่งจำเป็นที่สุดอย่างหนึ่งในอุตสาหกรรมยาง ทั้งอุตสาหกรรมผลิตยางดิบ ได้แก่ ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ รวมทั้งอุตสาหกรรมแปรรูปผลิตภัณฑ์ยาง การทดสอบสมบัติต่างๆ ของยาง จะทำให้สามารถควบคุมคุณภาพของวัตถุดิบ (Incoming materials) ควบคุมวัสดุขณะผลิต (In-process materials) ควบคุมกระบวนการผลิตและควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ยาง (Finished goods) นอกจากการควบคุมคุณภาพ (Quality control, QC) แล้ว การทดสอบยางยังมีประโยชน์อย่างมากต่องานวิจัยและพัฒนา (Research and Development, R&D) เพื่อให้ได้ขบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์ยางที่มีคุณภาพดี สมบัติสม่ำเสมอ เหมาะสมกับการใช้งาน และเป็นที่ต้องการของผู้บริโภค

3.2.9.1 **การทดสอบการดึงยืด (Tensile Tests)**

ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) โมดุลัสแรงดึง (Tensile modulus) และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด (% Elongation) นับเป็นหนึ่งในสมบัติที่สำคัญที่สุดของวัสดุต่างๆ และมีความจำเป็นที่จะต้องทดสอบสำหรับวัสดุพอลิเมอร์ การทดสอบแรงดึง คือ การวัดความสามารถของวัสดุหนึ่งที่จะทนทานต่อแรงดึงยืดออกจากกัน ก่อนที่จะฉีกขาด แตกหัก หรือเสียสภาพ

ค่ามอดูลัสแรงดึง จะเป็นค่าที่บอกถึงความแข็ง (Stiffness) ของวัสดุ สามารถหาได้จากความชันของกราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curve) การทดสอบแรงดึงทำได้โดยการยึดชิ้นงานตัวอย่างที่ขนาดและรูปร่างตามมาตรฐาน โดยที่จับ (Grips) สองชุด ที่จับข้างหนึ่งถูกยึดให้อยู่กับที่และอีกข้างจะเคลื่อนที่ โดยมีเซลล์วัดแรง (Load cells) เป็นตัววัดและควบคุมแรงที่กระทำกับชิ้นงานตัวอย่าง โดยมากแล้วชิ้นงานตัวอย่างมีรูปร่างคล้ายดัมเบลล์ (Dumb-bell) ดังแสดงในรูปที่ 3.14 เพื่อให้ชิ้นงานตัวอย่างเกิดการขาดที่บริเวณตรงกลางของตัวอย่างห่างจากบริเวณที่จับ

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ ต้องเป็นเครื่องมือที่สามารถดึงยาง โดยให้อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับยึดชิ้นตัวอย่างเคลื่อนที่ออกจากกันด้วยความเร็วสม่ำเสมอ ตามมาตรฐานกำหนดความเร็ว 500 มิลลิเมตร/นาที สามารถวัดค่าแรงผิดพลาดได้ไม่เกิน ± 2% และจะต้องแสดงค่าแรงสูงสุดในการ

ดึงยางจนขาดได้ นอกจากนั้น เครื่องดึงควรมีอุปกรณ์ที่สามารถวัดความยืดของยาง (Extensometer) ได้ทุกๆ ความยืดของยาง 10%

ในงานวิจัยนี้ การทดสอบการดึงยืดใช้แบบที่ 3 (Type 3) ดังแสดงในรูปที่ 3.12 เป็นแบบที่มีขนานเล็กที่สุด ตามมาตรฐาน ISO 37 – 1977 (E) โดยได้รับความอนุเคราะห์การตัดชิ้นงานตัวอย่างที่สถาบันวิจัยยาง กรมวิชา การเกษตร และทำการทดสอบทั้งหมด 5 ตัวอย่างต่อหนึ่งสูตรยาง ด้วยเครื่อง mini-tech ของภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.15

3.2.9.2 **การทดสอบความแข็งกด** (Hardness Test)

ความแข็งกด (Hardness) หมายถึง การต้านทานต่อแรงกระทำที่กดลงบนผิวหน้าของชิ้นงาน โดยที่แรงกระทำนั้นไม่ทำลายชิ้นงานตัวอย่าง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วความแข็งนี้จะอธิบายในรูปของค่าเปรียบเทียบมากกว่าที่จะเสนอเป็นหน่วยจริง

การวัดความแข็งกด สามารถหาได้ 2 แบบ คือ

1. ความแข็งกดแบบดูโรมิเตอร์ (Durometer Hardness) เครื่องมือที่ใช้วัดความแข็งกด คือ ดูโรมิเตอร์ (Durometer) มักมีขนาดเล็ก กระทัดรัด สะดวกในการใช้งาน นิยมใช้และเป็นที่รู้จักแพร่หลายทั่วโลก มักใช้แรงสปริงในการกด (Spring-loaded Durometer) สเกลสำหรับเครื่องวัดความแข็งกดแบบดูโรมิเตอร์ คือ 0 ถึง 100 ค่าความแข็งกด 0 คือ ความแข็งของของเหลว และค่าความแข็งกด 100 คือ ความแข็งของวัสดุแข็งมากไม่ยุบตัว เช่น กระจก ดูโรมิเตอร์ชนิด A หรือชอร์ A (Type A or Shore A durometer) ใช้วัดพอลิเมอร์อ่อนนิ่ม เช่น ยาง ใช้วัดวัสดุที่มีความแข็งไม่เกิน 90 ถ้าวัสดุมีความแข็งไม่เกิน 90 จะใช้ ดูโรมิเตอร์ชนิด D หรือชอร์ D (Type D or Shore D durometer) ซึ่งมีรูปร่างของหัวกดและความแข็งของสปริงแตกต่างไป

รูปที่ 3.14

ขนาดตัวอย่างที่ใช้ในการวัดสมบัติความทนทานต่อแรงดึง

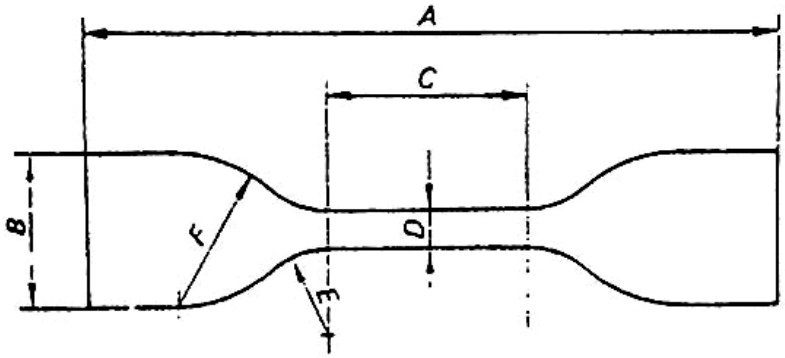


FIGURE 1 – Die

TABLE – Dimensions of test piece

Dimension		Type 1	Type 2	Type 3
		mm	mm	mm
A	Overall length (minimum)	115	75	35
B	Width of ends	25 ± 1	12,5 ± 1,0	6 ± 0,5
C	Length of narrow parallel portion	33 ± 2	25 ± 1	12 ± 0,5
D	Width of narrow parallel portion*	$6,0^{+0,4}_{0}$	4,0 ± 0,1	2 ± 0,1
E	Small radius	14 ± 1	8,0 ± 0,5	3 ± 0,1
F	Large radius	25 ± 2	12,5 ± 1,0	**3 ± 0,1
	Thickness	2 ± 0,2	2 ± 0,2	1 ± 0,1

* The variation within any one die shall not exceed 0,05 mm.

** Centre of circle on the centre line of dumb-bell.

ที่มา: มาตรฐาน ISO 37 – 1977 (E)

รูปที่ 3.15

เครื่องวัดสมบัติการดึงยืด

รูปที่ 3.16

เครื่อง Durometer Shore A

ข้อเสียของเทคนิคการวัดความแข็งกดด้วยดูโรมิเตอร์ คือ ความไม่แน่นอนของค่าที่วัดได้ ซึ่งขึ้นกับผู้ทำการทดสอบ ค่าที่อ่านได้ยังขึ้นกับอัตราเร็วในการกด และระยะเวลาในการกด ทั้งนี้เนื่องจากการคืนตัวเนื่องจากความยืดหยุ่น (Elastic recovery) และปรากฏการณ์ครีบ (Creep) ของพอลิเมอร์นั่นเอง บางมาตรฐานใช้ค่าที่อ่านได้หลังจากการกดเวลาหนึ่ง เช่น 5 วินาที หรือ 30 วินาที เป็นต้น

2. ความแข็งกดแบบความแข็งกดสากล (International Hardness) ทดสอบใช้โดยการกดของหัวกดกลมให้แรงบิดบนผิวชิ้นงานตัวอย่างด้วยแรงเริ่มต้นเพียงเล็กน้อย แล้วจึงทำการเพิ่มแรงกดขึ้น ระยะที่จมลงในตัวอย่างจะถูกเปลี่ยนเป็นระดับความแข็งของยางแบบสากลหรือไออาร์เอชดี (International Rubber Hardness Degree, IRHD) มีค่าอยู่ในช่วง 0 – 100 โดยที่ 0 หมายถึงค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus) ของยางเป็นศูนย์ และค่า 100 หมายถึง โมดูลัสยืดหยุ่นของยางมีค่าสูงมากไม่สิ้นสุด

ในงานวิจัยนี้ การทดสอบการความแข็งกด ใช้ดูโรมิเตอร์ชนิด A หรือชอร์ A (Type A or Shore A durometer) ดังแสดงในรูปที่ 3.16 ตามมาตรฐาน ASTM 2240 ทำการทดสอบที่สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร ทั้งหมด 5 ตัวอย่างต่อหนึ่งสูตรยาง

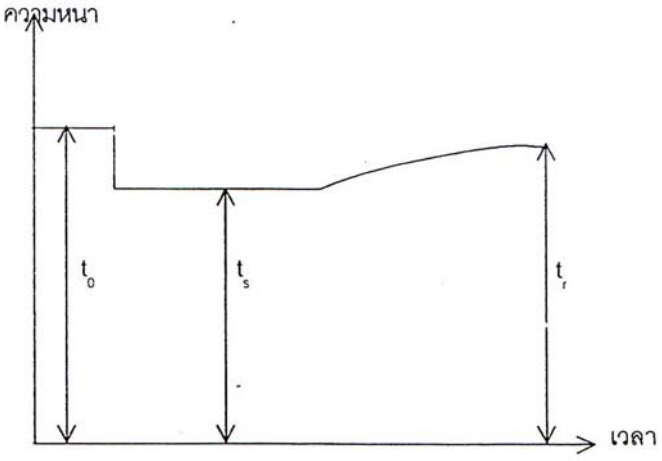
3.2.9.3 **การทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด** (Compression Set Test)

หลักการทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของชิ้นงานตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 3.17 โดยวัดความหนาของชิ้นงานตัวอย่างก่อนทดสอบ (t_0) แล้วนำตัวอย่างเข้าไปวางไว้ระหว่างเครื่องอัด โดยการอัดให้ชิ้นงานตัวอย่างยุบตัวลงจากเดิมตามที่กำหนด (25%) วัดความหนาของชิ้นงานตัวอย่างหลังการใช้แรงอัด (t_s) แล้วให้ชิ้นงานตัวอย่างอยู่ในสภาพมีแรงอัดตามระยะเวลาที่กำหนด ที่อุณหภูมิที่ต้องการแล้วคลายแรงอัด ปล่อยชิ้นงานตัวอย่างคืนตัวที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที แล้ววัดความหนาของชิ้นงานตัวอย่างนั้น (t_r) การคำนวณค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดคิดเป็นร้อยละคำนวณได้ตามสูตร ดังนี้

$$\text{Compression set (\%)} = (t_0 - t_r) / (t_0 - t_s) \times 100$$

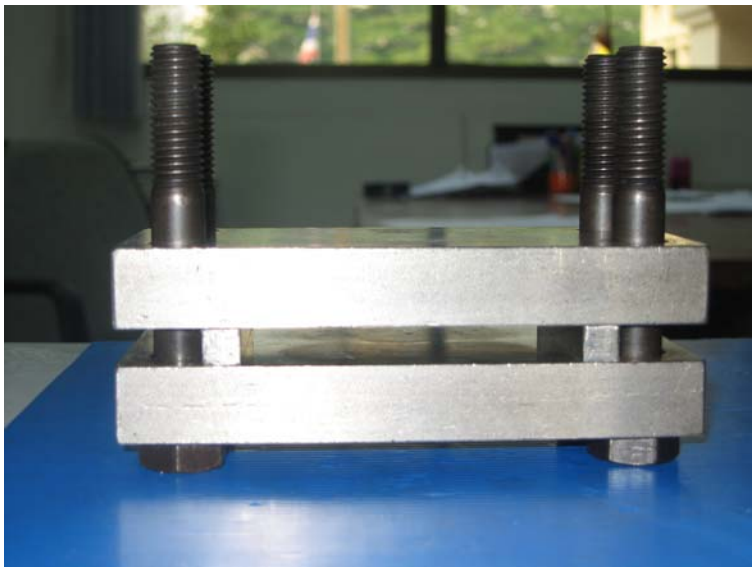
รูปที่ 3.17

กราฟแสดงหลักการทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด



รูปที่ 3.18

เครื่องทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด



ในงานวิจัยนี้ การทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด ตามมาตรฐาน ASTM D395 โดยใช้เครื่องอัด ดังแสดงในรูปที่ 3.18 ทำการทดสอบที่สถาบันวิจัยยางกรมวิชา การเกษตร ทั้งหมด 3 ตัวอย่างต่อหนึ่งสูตรยาง

3.2.9.4 **การทดสอบความทนทานต่อการสึกหรอ** (Abrasion Test)

การทดสอบความทนทานต่อการสึกหรอ เป็นการทดสอบความต้านทานของวัตถุต่อการขัดสีบนผิววัตถุนั้น กล่าวคือ เมื่อผิวหน้าของวัสดุสัมผัสกับผิวหน้าวัตถุอื่นๆ ในขณะที่มีแรงอัดอยู่ด้วย พื้นที่ที่สัมผัสอยู่นั้นจะเพิ่มตามค่าแรงที่ได้รับ ทำให้สัมประสิทธิ์ของความเสียดทานลดลง นอกจากนั้นผิวหน้าที่สัมผัสจริงจะขึ้นอยู่กับลักษณะหรือรูปทรงทางเรขาคณิตของชิ้นงานตัวอย่างด้วย ดังนั้น การวัดความเสียดทานเมื่อมีแรงกระทำในอัตราต่างๆ นิยมใช้ลักษณะผิวหน้าที่ใช้ได้จริงในการทำงาน นั่นคือ สามารถใช้ผลิตภัณฑ์ในการทดสอบได้

ในระหว่างการทดสอบความเสียดทาน อาจเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Slip-stick ซึ่งมีส่วนสัมพันธ์กับความเร็วและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวหน้าทั้งสองที่มีการสัมผัสกัน นอกจากนี้ เมื่อผิวหน้าของชิ้นงานตัวอย่างสัมผัสกับวัตถุอื่นๆ ในระหว่างการใช้งานและเกิดการเสียดสีกันขึ้น ก็จะทำให้เกิดการสึกหรอของผิวหน้า ดังนั้น ในการวัดการสึกหรอจึงใช้การวัดปริมาตรของวัตถุที่ถูกขัดสีออกไปจากผิวเนื้อของชิ้นงานตัวอย่าง ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดไว้

ในงานวิจัยนี้ การทดสอบความทนทานต่อการสึกหรอ ตามมาตรฐาน ASTM D395 โดยใช้เครื่อง Abrasion tester ดังแสดงในรูปที่ 3.19 ทำการทดสอบที่สถาบันวิจัยยางกรมวิชาการเกษตร ทั้งหมด 6 ตัวอย่างต่อหนึ่งสูตรยาง

รูปที่ 3.19

เครื่อง Abrasion Tester

3.2.9.5 การทดสอบการซึมผ่านของก๊าซ (Gas Permeability Test)

สภาพการซึมผ่านของก๊าซ โดยเฉพาะอากาศผ่านยาง มีความสำคัญในกรณีที่ต้องการให้ยางเก็บก๊าซไว้ภายใต้ความดัน ไม่ว่าจะเป็นอุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิสูงก็ตาม ยางบิวไทล์มีอัตราเร็วของการซึมผ่านของก๊าซ (Permeability rate) ต่ำที่สุด ในบรรดายางทั้งหลายและที่อุณหภูมิห้อง ยางซิลิโคนจะมีสภาพการซึมผ่านของก๊าซได้มากกว่ายางบิวไทล์ถึง 1,000 เท่า (เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์, 2537)

วิธีมาตรฐานสำหรับวัดสภาพการซึมผ่านของก๊าซผ่านแผ่นยางบางๆ มี 3 วิธี คือ

วิธีที่ 1 ใช้ก๊าซที่มีความดันสูงอยู่ทางด้านหนึ่งของชิ้นงานทดสอบ และใช้ก๊าซชนิดเดียวกันที่มีปริมาตรเล็กๆคงที่ ณ ความดันบรรยากาศอยู่อีกด้านหนึ่งของชิ้นงานทดสอบ การซึมผ่านของก๊าซจะไปเพิ่มความดันของด้านนี้ (ISO 1399; BS 903, Part A17)

วิธีที่ 2 ทำการทดสอบเช่นเดียวกับวิธีที่ 1 แต่ก๊าซทางด้านที่สองจะถูกเก็บรักษาให้ความดันคงที่ ดังนั้น ปริมาตรของก๊าซจะเพิ่มขึ้น (ISO 2782; BS 903, Part A30)

วิธีที่ 3 ใช้ก๊าซทดสอบ (เช่น H_2) ทางด้านหนึ่งของชิ้นงานทดสอบ และก๊าซอื่น (เช่น อากาศ) อยู่อีกด้านหนึ่ง ณ ความดันบรรยากาศทั้ง 2 ด้าน ความเข้มข้นของก๊าซทดสอบซึ่งซึมผ่านเข้าไปในอีกก๊าซจะถูกวัดไว้เป็นระยะเวลาหนึ่ง

สภาพการซึมผ่านของก๊าซคำนวณจาก steady state rate ของความดันซึ่งเพิ่มขึ้นในวิธีที่ 1 หรือของปริมาตรซึ่งเพิ่มขึ้นในวิธีที่ 2 หรือการเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซทดสอบในวิธีที่ 3 นอกจากนี้ ยังสามารถใช้ gas chromatography หรือ mass spectrometer ในการตรวจสอบ ซึ่งนิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะที่ต้องการความละเอียดสูง หรือต้องการความว่องไวสูง เมื่อมีความแตกต่างของความดันไม่มากนัก วิธีนี้สามารถใช้กับไอน้ำได้อีกด้วย

ในงานวิจัยนี้ การทดสอบการซึมผ่านของก๊าซ (Gas Permeability) ตามมาตรฐาน ASTM D 3985 เป็นการวัดอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ประเภทฟิล์มพลาสติกชนิดอื่นๆ โดยใช้เครื่องวัดการซึมผ่านของก๊าซ ที่ศูนย์การบรรจุหีบห่อไทย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ดังแสดงในรูปที่ 3.20 เป็นบริเวณด้านนอกของตัวเครื่องทั้งหมด และรูปที่ 3.21 เป็นบริเวณที่ไว้สำหรับใส่ตัวอย่างในการทดสอบ ซึ่งจะทำการทดสอบทั้งสองแผ่นพร้อมๆ กัน แล้วนำค่าที่ได้ทั้งจากทั้งสองแผ่นมาหาค่าเฉลี่ย

3.2.9.6 **การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค**

การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคระหว่างยางธรรมชาติกับยางโบรโมบิวไทล์ที่มีสารตัวเติมเป็นแร่ดินเหนียวชนิดต่างๆ ทำโดยการถ่ายภาพ SEM micrograph บนพื้นผิวแตกหัก (Fracture surface) ของยางคอมพอสิทหลังจากทดสอบสมบัติการดึงยืดโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของยางคอมพอสิทด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์ (Energy Dispersive Spectroscopy, EDS) โดยใช้เครื่อง Energy Dispersive Spectroscopy X-Ray (EDX) ที่คณะวิทยาศาสตร์และศูนย์เครื่องมือ คณะเภสัชศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.20

เครื่องทดสอบการซึมผ่านของก๊าซ บริเวณด้านนอกตัวเครื่อง

รูปที่ 3.21

เครื่องทดสอบการซึมผ่านของก๊าซ บริเวณที่วางตัวอย่างทดสอบ

บทที่ 4

ผลของการวิจัย (FINDINGS AND RESULTS)

งานวิจัยนี้ สนใจศึกษาผลของสารตัวเติม, การปรับสภาพผิวของสารตัวเติม รวมทั้งการใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน (Compatibilizer) ที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางโบรโมบิวไทล์ โดยผลของการวิจัยจะแบ่งเป็น 4 ส่วนใหญ่ๆ คือ (1) ลักษณะของสารตัวเติมแร่ดินเหนียวก่อนและหลังการปรับสภาพผิว, (2) ผลของสารตัวเติม, (3) ผลของการปรับสภาพผิวสารตัวเติม และ (4) ผลของตัวประสาน ที่มีต่อสมบัติของยางผสม

4.1 ลักษณะเฉพาะของแร่ดินเหนียว Montmorillonite แร่ดินเหนียว Kaolinite และ แร่ดินเหนียวขัดสี (Bleaching Clay) ก่อนการปรับสภาพผิว

ในส่วนนี้ จะเป็นการศึกษาองค์ประกอบของแร่ดินเหนียว (Clay) ทั้ง 3 ชนิด คือ แร่ดินเหนียว montmorillonite แร่ดินเหนียว kaolinite และแร่ดินเหนียวขัดสี (Bleaching Clay) โดยใช้สมบัติต่างๆ ประกอบด้วย

4.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้นด้วย X – Ray Fluorescence (XRF)

ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบของแป้งทัลคัม แร่ดินเหนียว Montmorillonite แร่ดินเหนียว Kaolinite และแร่ดินเหนียวขัดสี ด้วยเครื่อง XRF พบว่า แป้งทัลคัมมีองค์ประกอบหลักเป็น SiO_2 และ MgO สำหรับแร่ดินเหนียวทั้ง 3 ชนิดนั้น มีองค์ประกอบหลักเป็น SiO_2 และ Al_2O_3 เช่นเดียวกัน ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกับสูตรโครงสร้างทั่วไปของแร่ดินเหนียวแต่ละชนิด แต่มีส่วนประกอบย่อยที่แตกต่างกันที่เห็นได้เด่นชัด คือ แร่ดินเหนียว Montmorillonite มีปริมาณของ Na_2O ที่โดดเด่น เนื่องจากแร่ดินเหนียว Montmorillonite เป็นชนิดที่มี Na^+ อยู่ระหว่างชั้น (Interlayer) ของแร่ดินเหนียวโดย Sodium ion (Na^+) แสดงถึงความสามารถในการบวมน้ำของแร่ดินเหนียว Montmorillonite ในขณะที่ แร่ดินเหนียวขัดสี มี CaO ปรากฏขึ้นซึ่งสอดคล้องกับสูตรโครงสร้างทั่วไปของแร่ดินเหนียวชนิดนี้ อีกทั้งยังมี K_2O (K^+) ในปริมาณสูงพอสมควร ซึ่งคาดว่าเป็นลักษณะเฉพาะของแร่ดินเหนียวประเภท illite (Brady, 1996)

ตารางที่ 4.1

องค์ประกอบเบื้องต้นด้วยเครื่อง XRF ของแป้งทัลคัม แร่ดินเหนียว Montmorillonite แร่ดินเหนียว Kaolinite และแร่ดินเหนียวขัดสี

สารประกอบ	ปริมาณองค์ประกอบธาตุของสารตัวเติม %) by weight)			
	แป้งทัลคัม	แร่ดินเหนียว Montmorillonite	แร่ดินเหนียว Kaolinite	แร่ดินเหนียวขัดสี
SiO_2	61.4	64.33	53.20	75.20
Al_2O_3	0.14	23.95	43.70	18.30
Fe_2O_3	0.03	2.30	1.10	0.85
MgO	38.10	3.53	-	1.60
Na_2O	-	4.65	0.08	0.28
SO_3	-	0.30	0.31	-
CaO	0.31	0.59	0.02	0.07
TiO_2	-	0.18	1.10	0.07
K_2O	-	0.12	0.35	3.60
ZrO_2	-	0.01	-	-
SrO	-	0.01	-	-
P_2O_5	0.02	-	0.10	-
CeO_2	-	-	0.02	-
Cr_2O_3	-	-	0.01	-
MnO	-	-	-	0.01

4.1.2 การวิเคราะห์การสลายตัวเชิงความร้อนด้วย Thermogravimetric Analysis (TGA)

สมบัติการดูดน้ำและลักษณะการสลายตัวของหมู่ hydroxyl ของแร่ดินเหนียวทั้งสามชนิด (แร่ดินเหนียว montmorillonite, แร่ดินเหนียว kaolinite และแร่ดินเหนียวขัดสี) สามารถวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง TGA ดังแสดงในรูปที่ 4.1 จากรูปพบว่า กราฟ TGA ของแร่ดินเหนียว montmorillonite ลดลงอย่างเห็นได้ชัด 2 ช่วง โดยช่วงแรกคือ การระเหยของน้ำในปริมาณค่อนข้างมากภายนอกชั้นโครงสร้างของแร่ดินเหนียว ตั้งแต่ช่วง 100°C ซึ่งสอดคล้องกับ

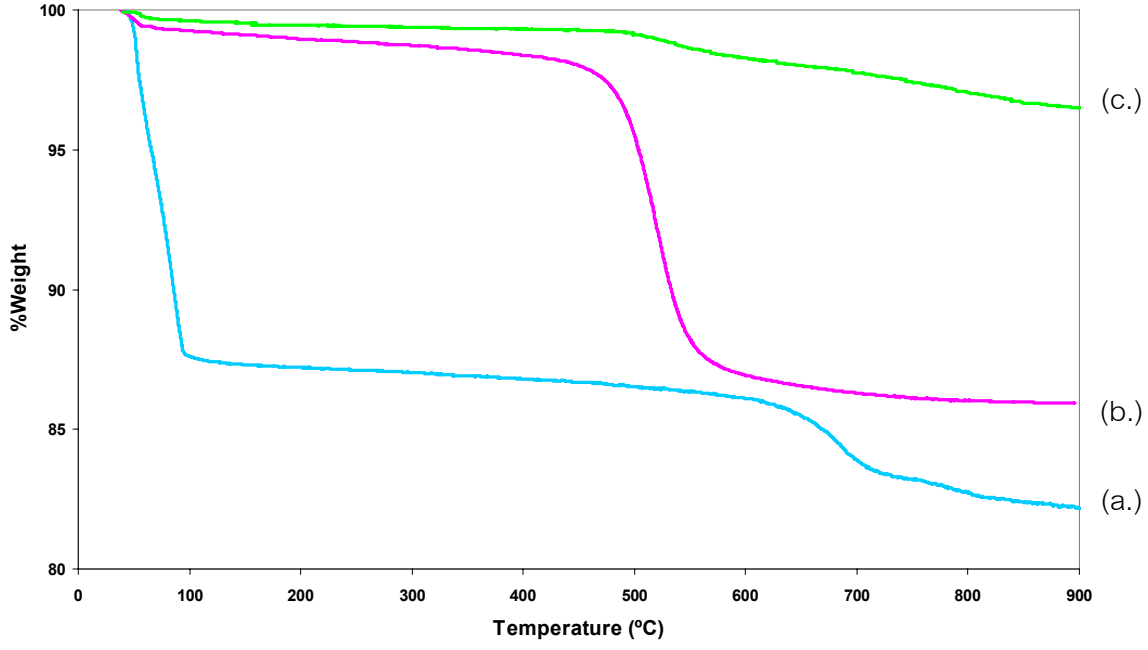
ความสามารถในการดูดน้ำปริมาณมากของแร่ดินเหนียว montmorillonite และช่วงที่สองเป็นการสลายตัวของโครงสร้างอีกครั้งเนื่องจากการสลายตัวของกลุ่ม hydroxyl (OH^-) ของแร่ดินเหนียวที่อุณหภูมิช่วง 600 – 700°C (Grim, 1968) โดยช่วงระหว่างการสูญเสียของน้ำในช่วงแรก พบว่าลักษณะกราฟค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงบริเวณที่เป็นการสลายตัวของ OH^- เนื่องมาจากการค่อยๆ ระเหยของน้ำภายในระยะระหว่างชั้น (Interlayer)

สำหรับ แร่ดินเหนียว kaolinite และแร่ดินเหนียวขัดสี ก็มีลักษณะกราฟใกล้เคียงกัน กล่าวคือ มีการลดลงของกราฟ 2 ช่วงเช่นเดียวกัน ช่วงที่หนึ่งเป็นการลดลงเล็กน้อยของกราฟที่ก่อน 100°C เป็นช่วงการระเหยของน้ำภายนอกของชั้นโครงสร้างของแร่ดินเหนียว ซึ่งเป็นลักษณะของแร่ดินเหนียว kaolinite ที่ดูดน้ำได้น้อยและช่วงที่สองเป็นการสลายตัวของโครงสร้างอีกครั้งเนื่องจากกลุ่ม hydroxyl (OH^-) ของ Clay ที่อุณหภูมิในช่วง 500°C (Shvarzman, 2003)

อย่างไรก็ตาม แร่ดินเหนียวขัดสีนั้น ลักษณะการสลายตัวของกลุ่ม hydroxyl คล้ายกับกราฟของแร่ดินเหนียว kaolinite แต่กราฟของการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยกว่าเท่านั้น กล่าวคือ น้ำหนักค่อยๆ เริ่มลดลงที่อุณหภูมิประมาณ 500°C และค่อยๆ ลดลงเรื่อยๆ อย่างต่อเนื่อง

รูปที่ 4.1

ผล TGA ของ (a.) แร่ดินเหนียว Montmorillonite (b.) แร่ดินเหนียว Kaolinite และ (c.) แร่ดินเหนียวขัดสี

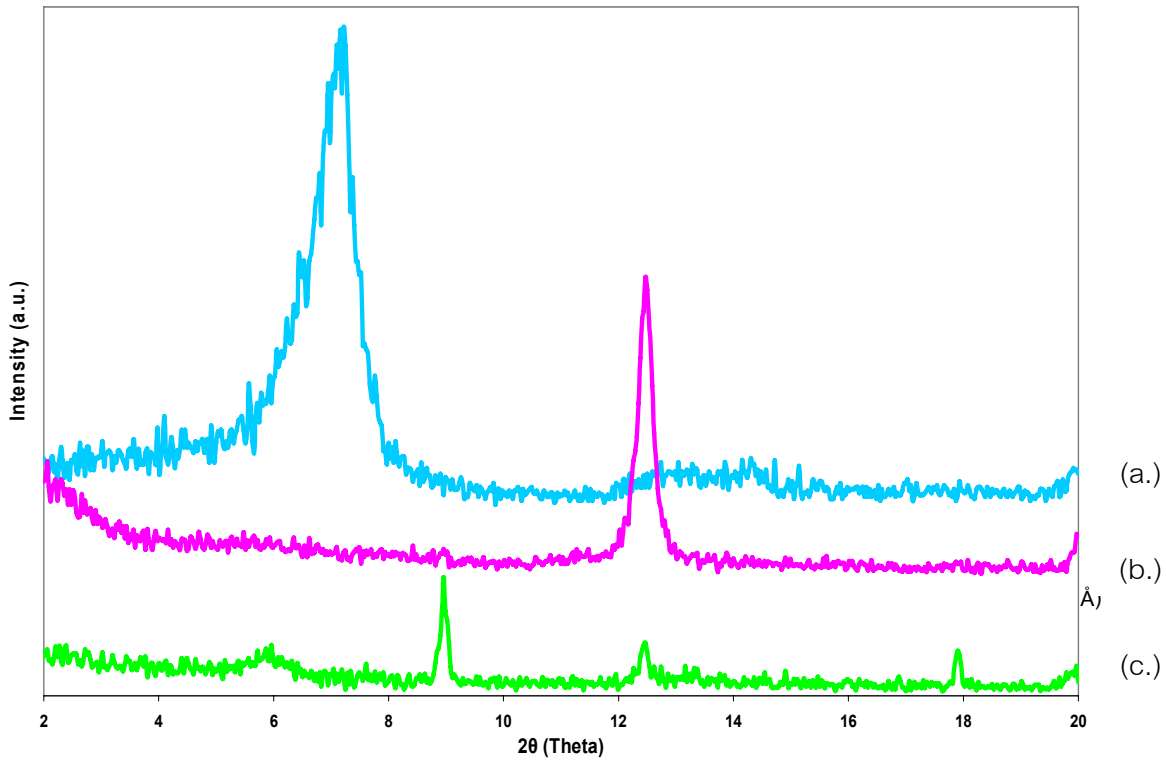


4.1.3 การวิเคราะห์ระยะระหว่างชั้นด้วย X – Ray Diffraction (XRD)

การเปรียบเทียบ diffraction pattern ของแร่ดินเหนียวทั้งสามประเภท โดยใช้เครื่อง XRD ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.2 ด้วยการวัดค่ามุมตกกระทบ (2θ) บนชั้นของแร่ดินเหนียว ตั้งแต่ 2 – 20° พิจารณากราฟของแร่ดินเหนียว montmorillonite พบว่า diffraction peak ซึ่งแสดงถึงค่า d – spacing ที่ 2θ = 7.10° (d = 12.45 Å) และ peak เล็กๆ ที่ 14.27° (d = 6.20 Å) แร่ดินเหนียว kaolinite พบ peak ที่ 2θ = 12.47° (d = 7.09 Å) และแร่ดินเหนียวขัดสี พบ peak ใหญ่ 1 peak ได้แก่ ที่ 2θ = 8.96° (d = 9.86 Å) และ peak เล็กๆ 2 peak ได้แก่ที่ 2θ = 12.48° (d = 7.09 Å) และ17.91° (d = 4.95 Å)

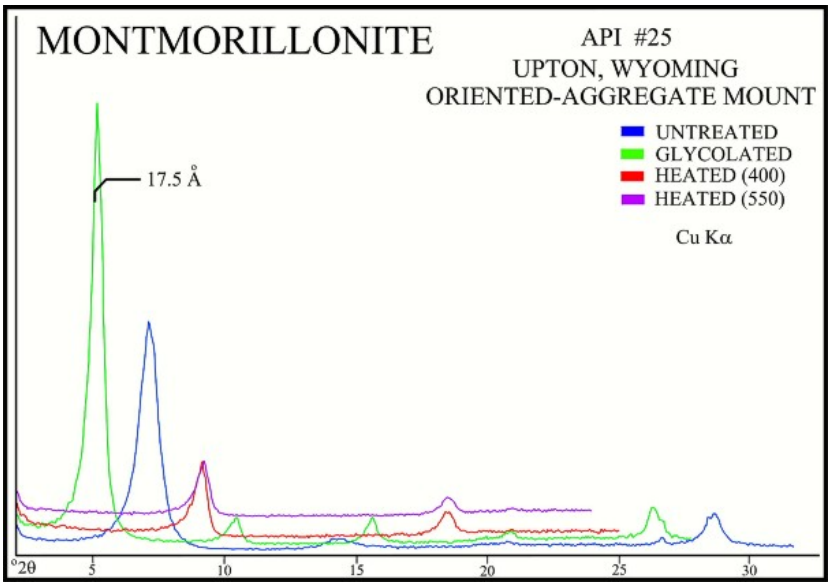
รูปที่ 4.2

ผล XRD ของ (a.) แร่ดินเหนียว Montmorillonite (b.) แร่ดินเหนียว Kaolinite และ (c.) แร่ดินเหนียวขัดสี



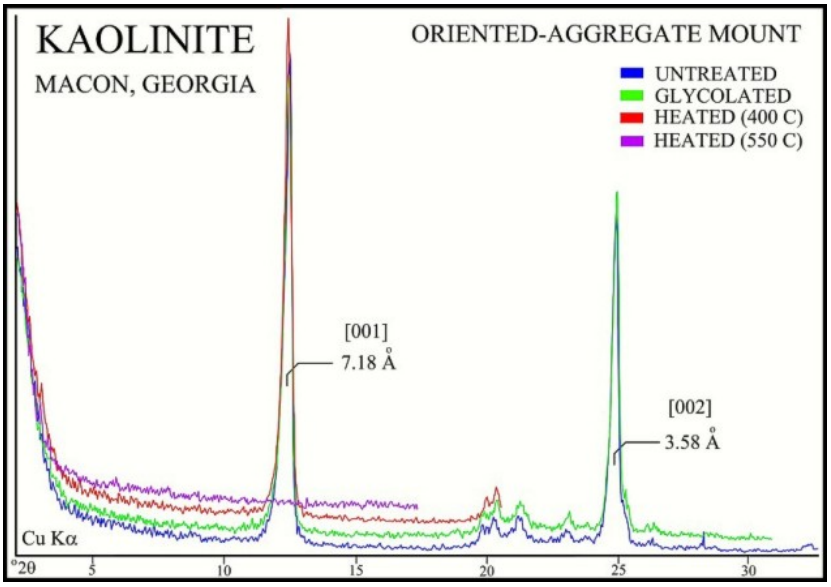
รูปที่ 4.3

XRD pattern ของแร่ดินเหนียว Montmorillonite



รูปที่ 4.4

XRD pattern ของแร่ดินเหนียว Kaolinite



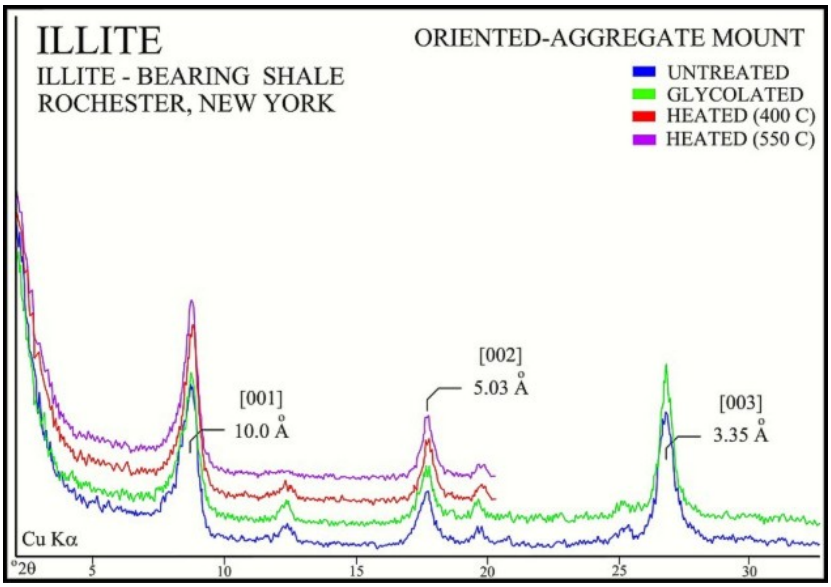
ที่มา : http://pubs.usgs.gov/openfile/of01-041/index.htm

ซึ่งค่า d – spacing นี้จะแสดงถึง ระยะห่างระหว่างชั้นของ clay ด้วยการคำนวณจากค่า 2θ โดยใช้ Bragg's Law (ดังที่ได้กล่าวรายละเอียดไว้ในบทที่ 3) ในการคำนวณหาค่า d – spacing เมื่อเปรียบเทียบ XRD pattern ที่ได้ของแร่ดินเหนียวทั้งสามชนิด พบว่า แร่ดินเหนียว montmorillonite และแร่ดินเหนียว kaolinite มี XRD pattern สอดคล้องกับแร่ดินเหนียว montmorillonite บริสุทธิ์และแร่ดินเหนียว kaolinite บริสุทธิ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 ตามลำดับ กล่าวคือ แร่ดินเหนียว montmorillonite มี peak ที่ 2θ = 12.33° (d = 7.8 Å) และแร่ดินเหนียว kaolinite มี peak ที่ 2θ = 12.33° (d = 7.8 Å)

ในขณะที่แร่ดินเหนียวขัดสี มีลักษณะ pattern เป็นของผสม อย่างน้อยประมาณ 2 ชนิด ที่อาจจะเป็นไปได้ คือ แร่ดินเหนียว illite และแร่ดินเหนียว kaolinite โดย peak ที่ 2θ = 8.96° (d = 9.86 Å) และ 17.91° (d = 4.95 Å) น่าจะเป็นเป็นลักษณะเฉพาะของแร่ดินเหนียว illite ดังที่แสดงตามรูปที่ 4.5 และที่ 2θ = 12.48° (d = 7.09 Å) น่าจะเป็นลักษณะเฉพาะของแร่ดินเหนียว kaolinite ดังที่แสดงตามรูปที่ 4.4

รูปที่ 4.5

XRD pattern ของแร่ดินเหนียว Illite

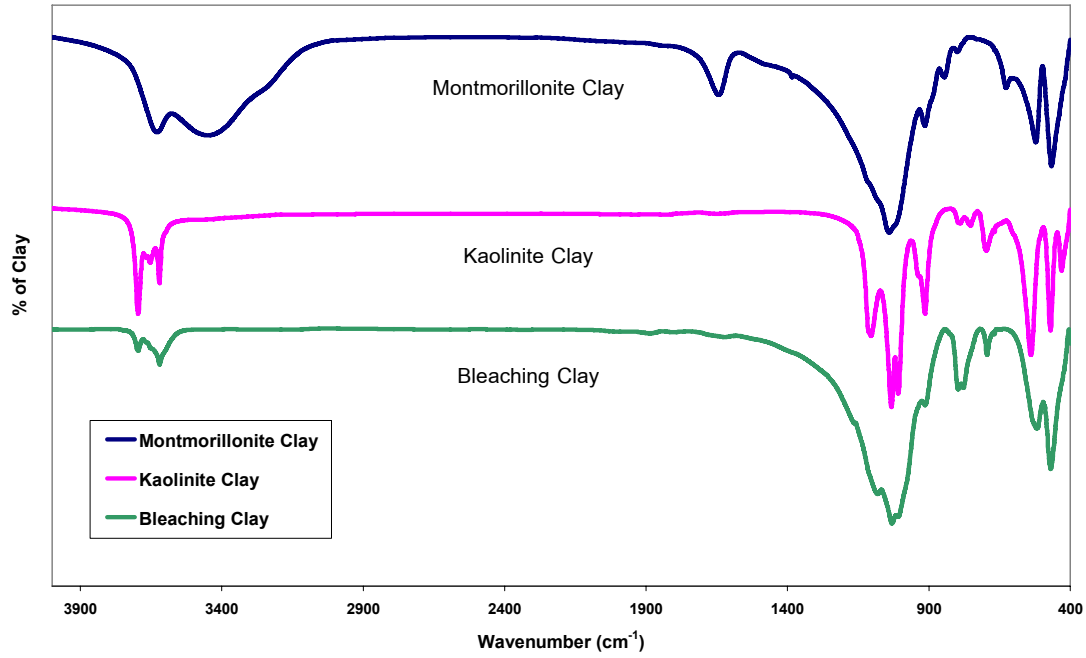


4.1.4 การวิเคราะห์พันธะต่าง ๆ ที่ผิวด้วย Infrared Spectroscopy

เมื่อพิจารณา Infrared absorbance spectrum ของแร่ดินเหนียว montmorillonite, แร่ดินเหนียว kaolinite และแร่ดินเหนียวขัดสี โดยเครื่อง Fourier Transform Infrared (FTIR) ดังรูปที่ 4.6 พบว่า มีลักษณะของสเปกตรัมที่แตกต่างกัน โดยแร่ดินเหนียว montmorillonite มีการดูดซับแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 3,625 cm^{-1} ซึ่งเกิดจากการยืดตัวของพันธะ OH (OH stretching) ของกลุ่ม Hydroxyl ในขณะที่ความยาวคลื่นในช่วงกว้างประมาณ 3,400 – 3,500 cm^{-1} และ 1,600 cm^{-1} เป็นการยืดตัวและเสียรูปเนื่องจากน้ำ (water stretching and deformation) ตามลำดับ และที่ความยาวคลื่นประมาณ 1,050 cm^{-1} เกิดจากการยืดเนื่องจากพันธะ Si – O และยังพบการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 900 cm^{-1} เป็นการเสียรูปเนื่องจากพันธะ Al_2OH (Al_2OH deformation) (Madejová & Komadel, 2001)

รูปที่ 4.6

ผล FTIR ของแร่ดินเหนียว Montmorillonite แร่ดินเหนียว Kaolinite และแร่ดินเหนียวขัดสี



แร่ดินเหนียว kaolinite และแร่ดินเหนียวขัดสีนั้นมีการดูดซับที่ความยาวคลื่นประมาณ 3,700 cm^{-1} และ 3,600 cm^{-1} ซึ่งเกิดจากการยืดตัวเนื่องจากพันธะ OH (OH stretching) ของกลุ่ม Hydroxyl ซึ่งแร่ดินเหนียวขัดสีมีปริมาณที่น้อยกว่า นอกจากนี้ยังพบการดูดซับที่ความยาวคลื่นประมาณ 1,100 cm^{-1} และในช่วงประมาณ 1,000 – 1,050 cm^{-1} ซึ่งเป็นการยืดของพันธะ Si – O แบบตั้งฉากและในระนาบ (perpendicular and in – plane Si – O stretching) ตามลำดับ และพบที่ความยาวคลื่นประมาณ 900 cm^{-1} ที่เป็นการเสียรูปเนื่องจากพันธะ Al_2OH (Al_2OH deformation) ซึ่งแร่ดินเหนียวขัดสีมีปริมาณที่น้อยกว่าเช่นเดียวกัน (Madejová & Komadel, 2001)

4.1.5 การวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของสารตัวเติม

เมื่อทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle Size Distribution, PSD) ของสารตัวเติม ดังแสดงในตารางที่ 4.1 เป็นค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (Average Diameter, $d_{0.5}$) และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของสารตัวเติม (Specific Surface Area) จะเห็นว่า ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแร่ดินเหนียว montmorillonite มีค่าน้อยที่สุด คือ 4.807 μm ทำให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของสารตัวเติมมีค่าสูงที่สุด คือ 25.8520 m^2/g ในขณะที่ แป้งทัลคัม มีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยมากที่สุด คือ 16.657 μm ทำให้ ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของสารตัวเติมมีค่าต่ำที่สุด คือ 3.1788 m^2/g

ตารางที่ 4.2

ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย ($d_{0.5}$) และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของสารตัวเติม

Types of filler	Average Diameter (μm)	Specific Surface Area (m^2/g)
Talc	16.657	3.1788
Montmorillonite Clay	4.807	25.8520
Kaolinite Clay	11.233	21.3169
Bleaching Clay	5.741	4.2205

4.2 ลักษณะเฉพาะของแร่ดินเหนียว Montmorillonite แร่ดินเหนียว Kaolinite และ แร่ดินเหนียวขัดสี (Bleaching Clay) หลังการปรับสภาพผิว

เมื่อแร่ดินเหนียวทั้ง 3 ชนิดที่กล่าวมาแล้ว ได้ผ่านกระบวนการปรับสภาพผิวเพื่อลดความมีขั้ว โดยแร่ดินเหนียว montmorillonite ใช้ octadecylamine (C_{18}) เป็น coupling agent ส่วนแร่ดินเหนียว kaolinite และแร่ดินเหนียวขัดสี ใช้ silane-69 เป็น coupling agent แล้ว ในส่วนนี้ จะทำการทดสอบเพื่อศึกษาโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงไปของแร่ดินเหนียวอีกครั้ง โดยทำการศึกษาปริมาณของ coupling agent ในโครงสร้างของแร่ดินเหนียว และผลของ coupling agent ที่มีต่อลักษณะโครงสร้างของแร่ดินเหนียว ดังนี้

4.2.1 องค์ประกอบและลักษณะเฉพาะของแร่ดินเหนียว Montmorillonite

4.2.1 (a.) การทดสอบการสลายตัวเชิงความร้อนด้วย Thermogravimetric Analysis (TGA)

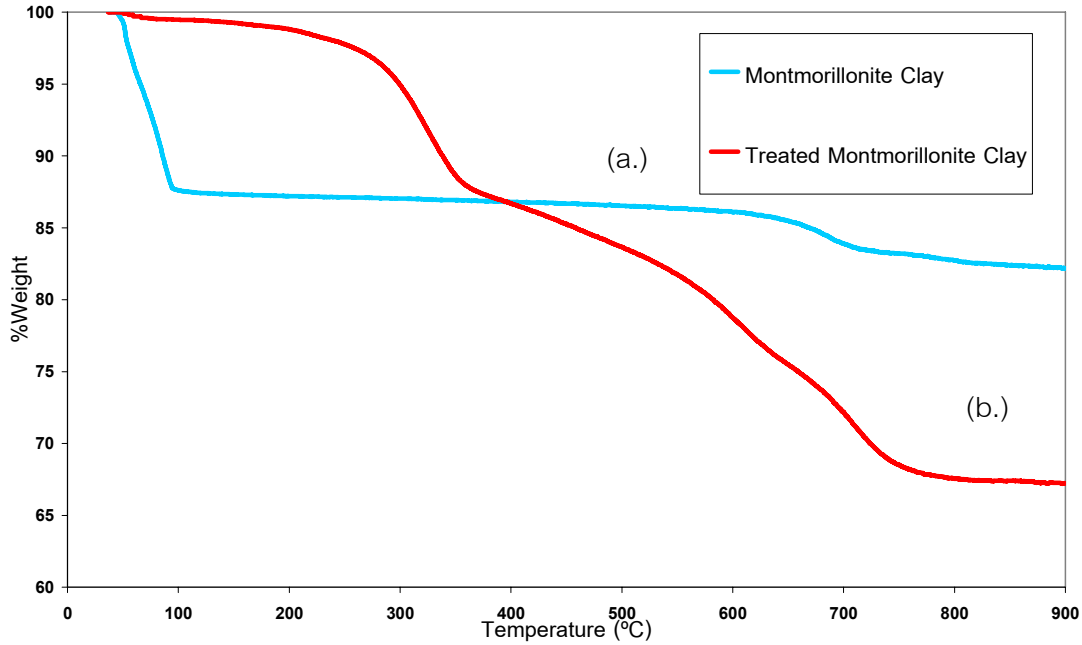
เมื่อทดสอบแร่ดินเหนียว montmorillonite ก่อนและหลังการปรับสภาพผิวแล้วด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analysis (TGA) ได้กราฟ thermogram ดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่า ที่อุณหภูมิประมาณ 100°C ซึ่งเป็นช่วงการระเหยของน้ำ จากนั้นจะเป็นช่วงการสลายตัวของ Octadecylamine (C_{18}) เริ่มต้นที่อุณหภูมิ 150°C ซึ่งกราฟที่ได้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วง คือ ช่วงแรก เป็นช่วงของการสลายตัวของอนุภาค octadecylamine ที่อยู่ภายนอกของชั้นและช่วงที่สอง เป็นช่วงการสลายตัวของอนุภาค octadecylamine ที่อยู่ในระยะระหว่างชั้น (Interlayer) ของแร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ได้รับการปรับสภาพผิว ผลที่ได้นี้ สามารถยืนยันได้ว่า ประจุของ octadecylamine ได้เข้าไปอยู่ในชั้นของแร่ดินเหนียว (Arroyo et al., 2003)

4.2.1 (b.) การทดสอบระยะระหว่างชั้นด้วย X – Ray Diffraction (XRD)

การศึกษาการขยายตัวของแร่ดินเหนียว montmorillonite ก่อนและหลังการปรับสภาพผิวแล้ว โดยใช้เครื่อง X–Ray Diffraction (XRD) ได้แสดงในรูปที่ 4.8 พบว่า เมื่อใช้ Octadecylamine (C_{18}) ปรับสภาพผิว ทำให้ค่า d – spacing ซึ่งบ่งบอกถึงระยะห่างระหว่างชั้น (Interlayer) ของแร่ดินเหนียว montmorillonite ขยายตัวเพิ่มขึ้นจาก 12.45 Å เป็น 19.82 Å ซึ่งน่าจะเป็นผลจากเมื่อหมู่ฟังก์ชั่น NH_3^+ ของ C_{18} แลกเปลี่ยนกับ Na^+ ของแร่ดินเหนียว montmorillonite แล้ว สายโซ่ของหมู่ไฮโดรคาร์บอนใน C_{18} จะผลักให้ชั้นของระยะห่างระหว่างชั้นกว้างขึ้น

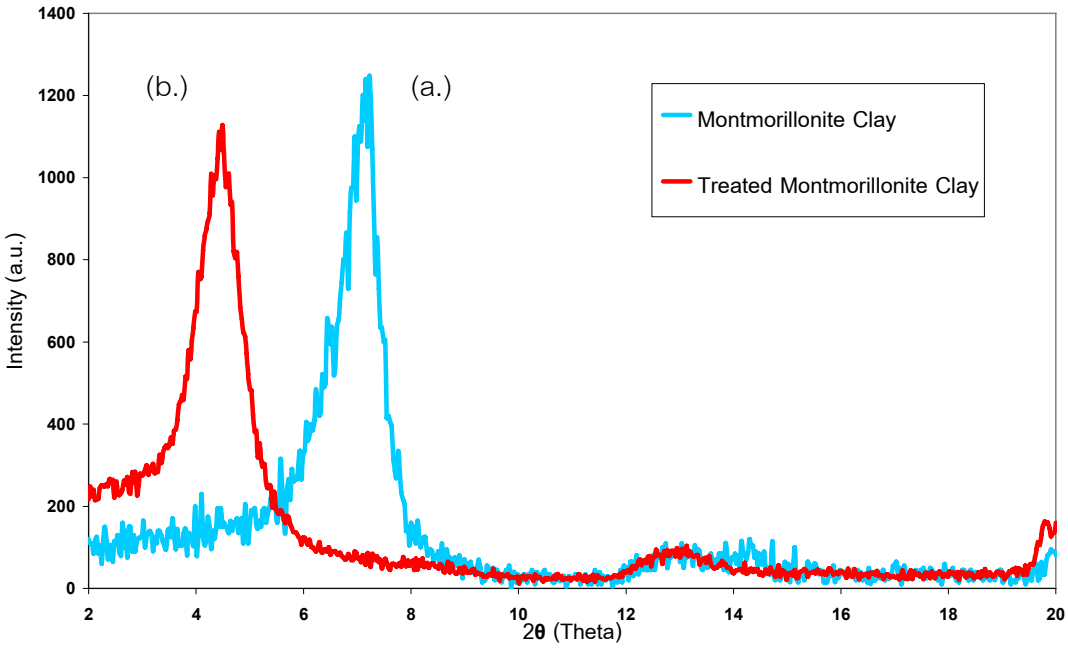
รูปที่ 4.7

ผล TGA ของ แร่ดินเหนียว Montmorillonite (a.) ก่อนและ (b.) หลังการปรับสภาพผิว



รูปที่ 4.8

ผล XRD แร่ดินเหนียว Montmorillonite (a.) ก่อนและ (b.) หลังการปรับสภาพผิว



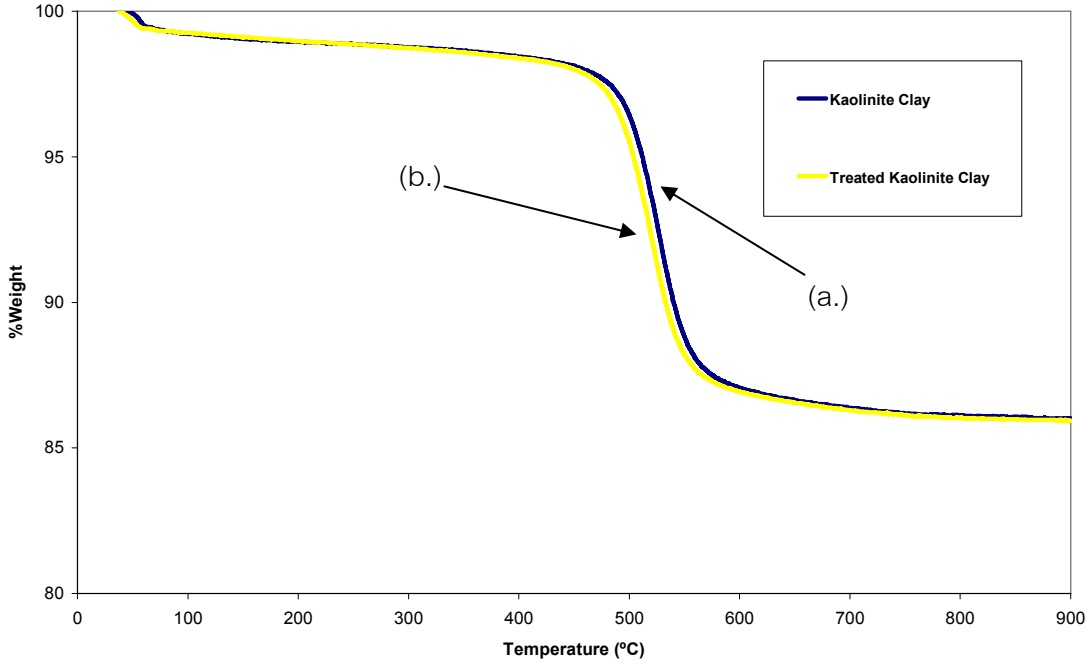
4.2.2 องค์ประกอบและลักษณะเฉพาะของแร่ดินเหนียว Kaolinite

4.2.2 (a.) การทดสอบการสลายตัวเชิงความร้อนด้วย Thermogravimetric Analysis (TGA)

เมื่อทดสอบแร่ดินเหนียว kaolinite ก่อนและหลังการปรับสภาพผิวแล้วด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analysis (TGA) ได้กราฟ thermogram ดังแสดงในรูปที่ 4.9 พบว่าแร่ดินเหนียว kaolinite ที่ได้รับการปรับสภาพผิวด้วย silane-69 นั้นมี thermogram ที่แทบไม่แตกต่างจากแร่ดินเหนียว kaolinite ที่ยังไม่ปรับสภาพผิวเลย ยกเว้นแต่มีช่วงอุณหภูมิของการสลายตัวที่สูงกว่าเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อาจเป็นเพราะว่าหมู่ hydroxyl บนผิวของแร่ดินเหนียว kaolinite ที่สามารถเกิดปฏิกิริยา silylation ได้นั้น มีอยู่ในปริมาณน้อย

รูปที่ 4.9

ผล TGA ของแร่ดินเหนียว Kaolinite (a.) ก่อน และ (b.) หลังการปรับสภาพผิว



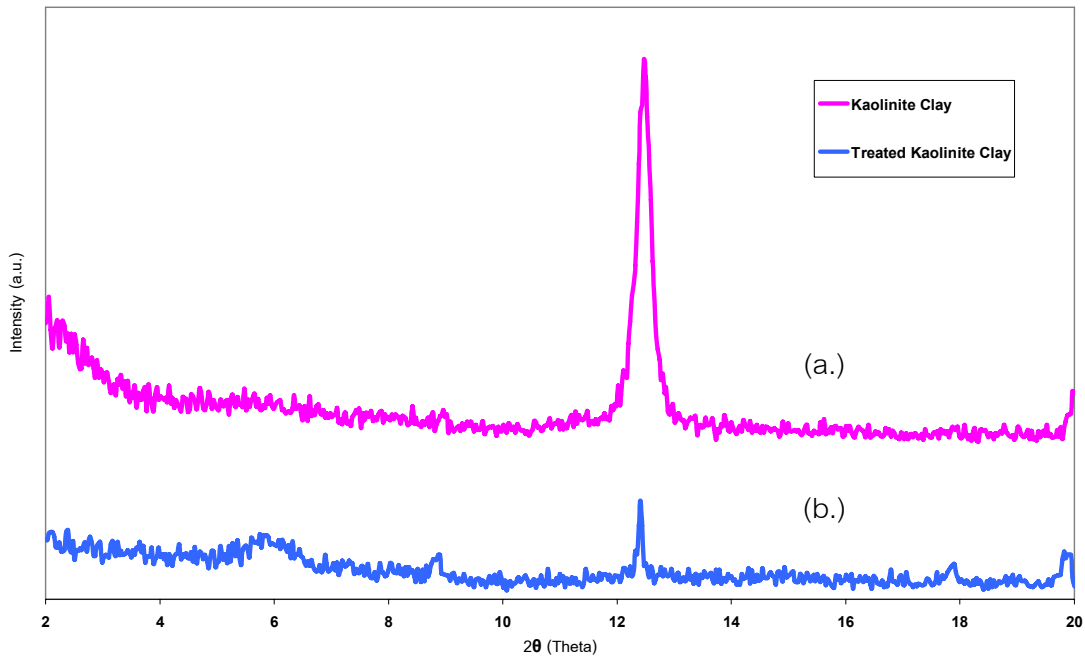
4.2.2 (b.) การทดสอบระยะระหว่างชั้นด้วย X – Ray Diffraction (XRD)

การศึกษาการขยายตัวของแร่ดินเหนียว kaolinite ก่อนและหลังการปรับสภาพผิวแล้ว โดยใช้เครื่อง X–Ray Diffraction (XRD) ได้แสดงในรูปที่ 4.10 พบว่า ค่า d – spacing ของแร่ดินเหนียว kaolinite ก่อนและหลังการปรับสภาพผิว มีค่าที่แทบไม่เปลี่ยนแปลง peak ที่เกิดอยู่ในช่วง d – spacing ประมาณ 7.03° แต่แร่ดินเหนียว kaolinite ที่ได้รับการปรับสภาพผิวนั้น

พบว่า ความเข้มข้นของแสงมีค่าลดต่ำลงอย่างมาก แสดงถึง การกระจายตัวแบบไม่เป็นระเบียบยิ่งขึ้น

รูปที่ 4.10

ผล XRD ของแร่ดินเหนียว Kaolinite (a.) ก่อนและ (b.) หลังการปรับสภาพผิว



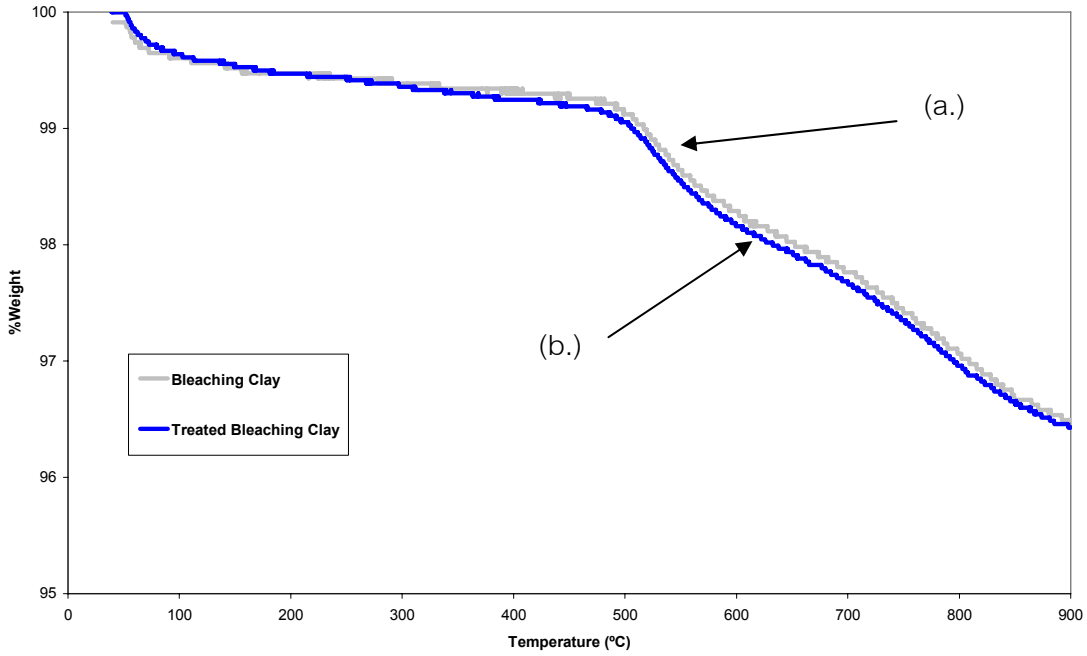
4.2.3 **องค์ประกอบและลักษณะเฉพาะของแร่ดินเหนียวขัดสี** (Bleaching Clay)

4.2.3 (a.) **การทดสอบการสลายตัวเชิงความร้อนด้วย** Thermogravimetric Analysis (TGA)

เมื่อทดสอบแร่ดินเหนียวขัดสี (Bleaching Clay) ก่อนและหลังการปรับสภาพผิว ด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analysis (TGA) ได้กราฟ thermogram ดังแสดงในรูปที่ 4.11 พบว่า ผลที่ได้มีลักษณะคล้ายกับของแร่ดินเหนียว kaolinite กล่าวคือ แร่ดินเหนียวขัดสีที่ได้รับการปรับสภาพผิวด้วย silane-69 นั้นมี thermogram ที่แทบไม่แตกต่างจากแร่ดินเหนียวขัดสีที่ยังไม่ปรับสภาพผิวเลย อาจเป็นเพราะว่าหมู่ hydroxyl บนผิวของแร่ดินเหนียวขัดสี ที่สามารถเกิดปฏิกิริยา silylation ได้นั้น มีอยู่ในปริมาณน้อย

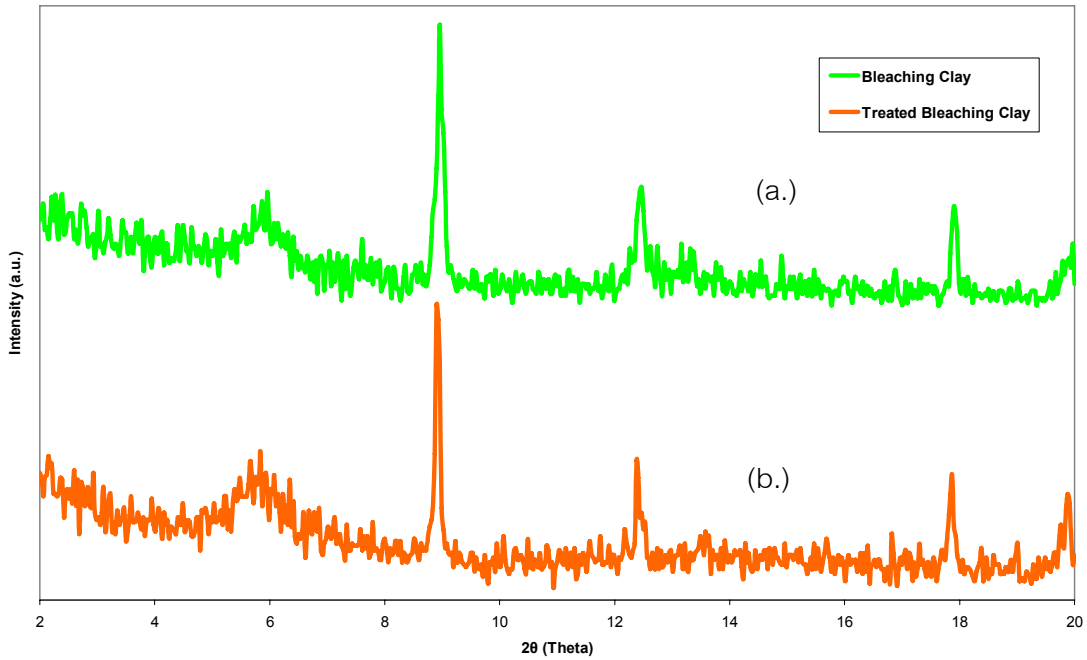
รูปที่ 4.11

ผล TGA ของแร่ดินเหนียวขัดสี (a.) ก่อนและ (b.) หลังการปรับสภาพผิว



รูปที่ 4.12

ผล XRD ของแร่ดินเหนียวขัดสี (a.) ก่อนและ (b.) หลังการปรับสภาพผิว



4.2.3 (b.) การทดสอบระยะระหว่างชั้นด้วย X – Ray Diffraction (XRD)

การศึกษาการขยายตัวของระยะระหว่างชั้น (Interlayer) ของแร่ดินเหนียวขัดสีก่อนและหลังการปรับสภาพผิวแล้ว โดยใช้เครื่อง X–Ray Diffraction (XRD) ได้แสดงในรูปที่ 4.12 พบว่า ค่า d – spacing ของแร่ดินเหนียวขัดสีก่อนและหลังการปรับสภาพผิวนั้น มีค่าที่แทบจะไม่เปลี่ยนแปลง

4.3 การทดสอบความเข้ากันได้ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางโบรโมบิวไทล์

การทดสอบความเข้ากันของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางโบรโมบิวไทล์ ในอัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อยางโบรโมบิวไทล์ (NR : BIIR) คือ 0:100, 25:75, 50:50, 75:25 และ 100:0 โดยใช้วิธี DMA (Dynamic Mechanical Analysis) วัดค่า mechanical loss factor (tan δ) โดยตำแหน่งของ peak นี้ เป็นการแสดงค่า T_g ของยางผสมได้ด้วย [R.G., David, 1998] ดังแสดงในรูปที่ 4.13 เมื่อพิจารณาค่า tan δ ของยางผสม (NR : BIIR = 25:75, 50:50 และ 75:25) พบว่า เมื่อผสมยางโบรโมบิวไทล์ลงในยางธรรมชาติในอัตราส่วนที่มากขึ้น ทำให้ช่วงอุณหภูมิของค่า T_g มีความกว้างมากขึ้น เนื่องจากยางโบโมบิวไทล์ที่นำมาใช้นี้มีช่วงการกระจายตัวของค่า T_g ค่อนข้างกว้าง โดยลักษณะของ peak T_g คล้ายเป็น 2 ช่วง ซึ่งอาจเกิดจากยางธรรมชาติบางส่วนในยางโบรโมบิวไทล์ ทำปฏิกิริยาโบรมิเนชั่น (Bromination) ไม่หมด จากกราฟของยางผสม พบว่า ค่า T_g เฉลี่ยของยางผสมนั้น มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณยางโบรโมบิวไทล์ที่เพิ่มขึ้นด้วย ดังสรุปไว้ในตารางที่ 4.3 โดย peak T_g ของยางผสมมีลักษณะรวมกันเป็น peak เดียว แสดงถึงว่า ยางผสมเข้ากันได้ดีแบบ miscible blend ที่ทุกอัตราส่วนการผสม

รูปที่ 4.14 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า T_g ที่วัดได้จากการเทคนิค DMA กับค่าร้อยละโดยน้ำหนักของยาง NR โดยเปรียบเทียบกับค่า T_g ที่ควรจะได้จากความสัมพันธ์ของ Fox (Roland, 1987) โดยความสัมพันธ์ของ Fox เป็นสมการที่ใช้อธิบายค่า T_g ของพอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันได้ดีในระดับโมเลกุล ดังนี้

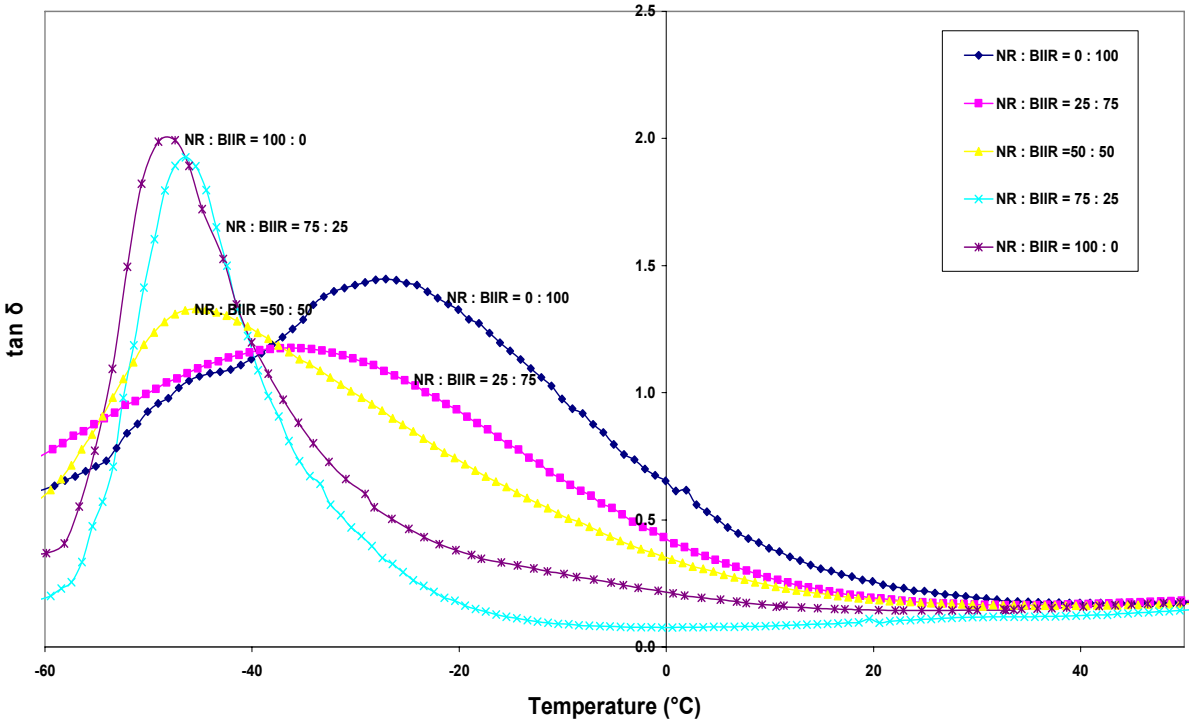
$$\frac{1}{T_{g_b}} = \frac{W_1}{T_{g_1}} + \frac{W_2}{T_{g_2}}$$

เมื่อ W_1 และ W_2 คือ สัดส่วนมวล (mass fraction) ของยางธรรมชาติและยางโบรโมบิวไทล์ ตามลำดับ และ T_{gb}, T_{g1} และ T_{g2} คือค่า T_g ของยางผสม, ยางธรรมชาติและยางโบรโมบิวไทล์ ตามลำดับ จากกราฟ พบว่า ค่า T_g ของยางผสมที่วัดได้มีค่าต่ำกว่าที่คำนวณได้

จากความสัมพันธ์ของ Fox แสดงถึงว่าการเข้ากันได้ของยางธรรมชาติกับยางโบรโมบิวไทล์ ผสมได้อยู่ในระดับไมโครเมตร แต่ไม่เข้ากันได้ถึงระดับโมเลกุล

รูปที่ 4.13

ผล Mechanical loss factor (tan δ) ของยางผสมยางธรรมชาติต่อยางโบรโมบิวไทล์ในอัตราส่วนต่างๆ



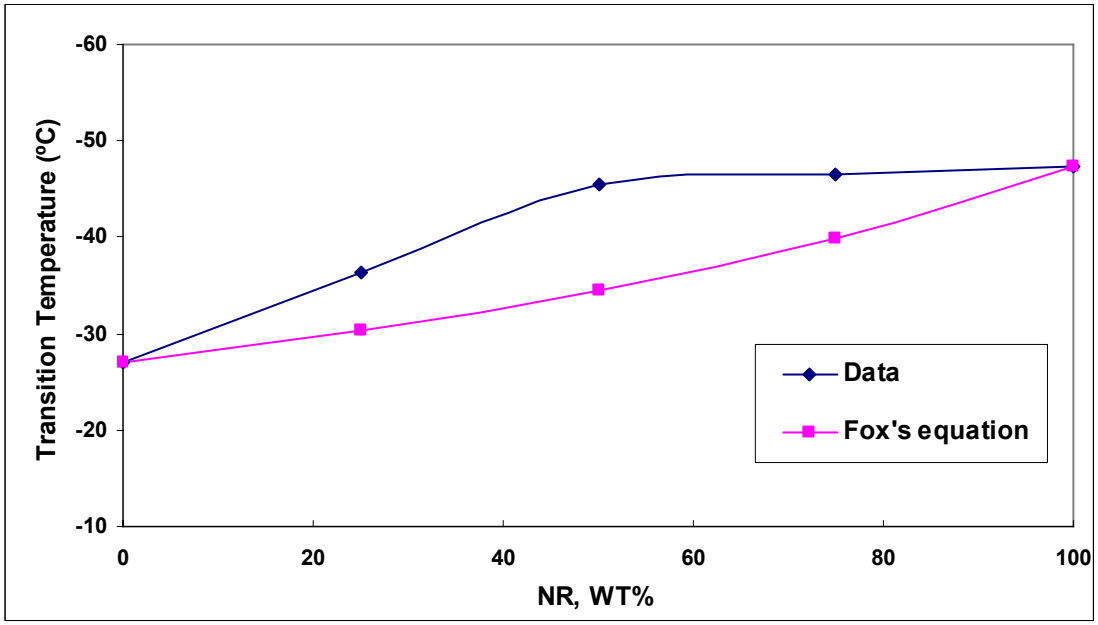
ตารางที่ 4.3

ค่า T_g ของยางผสมของยางธรรมชาติต่อยางโบรโมบิวไทล์ในอัตราส่วนต่างๆ

% NR	T_g
0	-27.0863
25	-36.2597
50	-45.4519
75	-46.4352
100	-47.4343

รูปที่ 4.14

ค่า T_g ของยางผสมยางธรรมชาติต่อยางโบรโมบิวไทล์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่ได้จากการทดลอง เปรียบเทียบกับการคำนวณจากความสัมพันธ์ของ Fox



4.4 ผลของชนิดของสารตัวเติมแร่ดินเหนียวและการปรับสภาพผิวสารตัวเติมต่อสมบัติต่าง ๆของยางคอมพอสิท

ส่วนนี้จะเป็นการศึกษาผลของชนิดของสารตัวเติม รวมทั้ง เมื่อทำการปรับสภาพผิวของสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของยางคอมพอสิท ซึ่งในขั้นตอนการบดผสมนั้น จะเรียกการบดประเภทนี้ว่า “แบบปกติ” คือ สูตร A ในตารางที่ 3.1 แต่ทำการเปลี่ยนชนิดของสารตัวเติมแบบแผ่นที่สนใจ ในปริมาณที่ใส่ 10 phr สารตัวเติมแบบแผ่นที่ศึกษาในสูตรแบบปกติ โดยสัญลักษณ์ที่ใช้มีความหมายถึงสารตัวเติมชนิดต่างๆ ดังนี้

สัญลักษณ์	สารตัวเติม
No Plate–like Filler	ไม่มีการใช้สารตัวเติมแบบแผ่นชนิดใดๆ เลย
Talc	แป้งทัลคัม (Talcum)
Mont.	แร่ดินเหนียว Montmorillonite
Treated Mont.	แร่ดินเหนียว Montmorillonite ที่ปรับสภาพผิวด้วย Octadecylamine
Kaolin	แร่ดินเหนียว Kaolinite

สัญลักษณ์	สารตัวเติม
Treated Kaolin	แร่ดินเหนียว Kaolinite ที่ปรับสภาพผิวด้วย Silane–69
Bleaching	แร่ดินเหนียวขัดสี (Bleaching Clay)
Treated Bleaching	แร่ดินเหนียวขัดสี ที่ปรับสภาพผิวด้วย Silane–69

สมบัติการคงรูป :

เมื่อทำการบดผสมสารเคมีและสารตัวเติมต่างๆแล้ว ก่อนการขึ้นรูปนั้น จะต้องมีการนำไปทดสอบสมบัติการคงรูป (Cure Characteristic) เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการขึ้นรูป โดยได้แรงบิด (Torque) ที่เวลาขึ้นรูปต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และ รูปที่ 4.15 และ 4.16

ตารางที่ 4.4

สมบัติการคงรูปของยางคอมพอสิทแบบปกติ ที่อุณหภูมิ 180°C

Sample	t_2	t_{90}	T_{max}	T_{min}	ΔT
No Plate–like Filler	0.48	2.59	7.06	2.08	4.98
Talc	1.24	3.00	8.95	3.53	5.42
Mont.	1.15	3.29	9.29	3.78	5.51
Treated Mont.	1.13	2.30	8.79	3.50	5.29
Kaolin	1.19	3.29	9.43	4.10	5.33
Treated Kaolin	1.33	5.26	9.50	4.20	5.30
Bleaching	0.55	3.06	11.39	3.90	7.49
Treated Bleaching	1.21	4.20	10.14	3.25	6.89

หมายเหตุ นิยามของ t_2 และ t_{90} เหมือนในรูปที่ 3.9 ในบทที่ 3

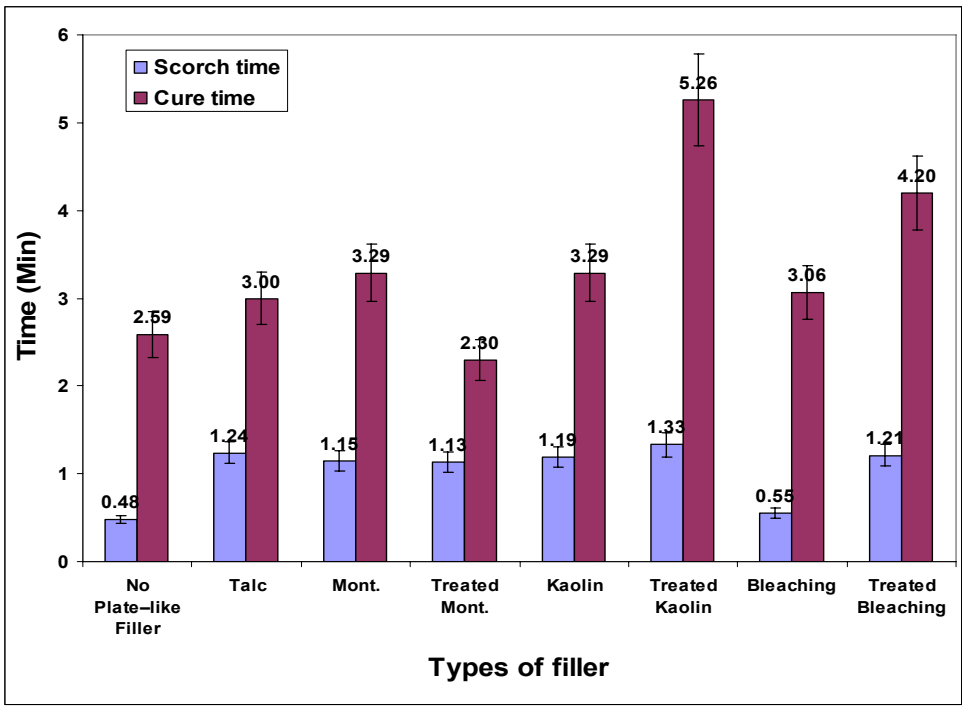
ΔT = ผลต่างระหว่างแรงบิดสูงสุด (Max torque, T_{max}) และ แรงบิดต่ำสุด (Min Torque, T_{min}) มีหน่วยเป็น dNm

เมื่อพิจารณายางคอมพอสิทแบบปกติที่ใช้สารตัวเติมแบบแผ่นชนิดต่างๆ ก่อนทำการปรับสภาพผิว ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.15 พบว่า คอมพอสิทที่ไม่มีการใช้สารตัวเติมแบบแผ่นชนิดใดๆ เลย มีค่าเวลาที่ยางเริ่มคงรูป (Scorch time, t_2) และเวลาในการขึ้นรูป (Cure time, t_{90}) เร็วที่สุดและในกรณีที่มีการใช้สารตัวเติมแบบแผ่น พบว่า แร่ดินเหนียวขัดสี (Bleaching)

มีค่าเวลาที่ยางเริ่มคงรูปค่อนข้างต่ำ อาจจะเป็นผลมาจากการที่มีออกไซด์ของโพแทสเซียม (K_2O) ค่อนข้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเติมชนิดอื่น เนื่องจากโลหะออกไซด์ในแร่ดินเหนียวนั้นจะทำหน้าที่เป็นเหมือนสารเร่งปฏิกิริยาและสารกระตุ้นปฏิกิริยาในกระบวนการวัลคาไนซ์ (Sae–oui, Rakdee, & Thanmathorn, 2002)

เมื่อพิจารณาแร่ดินเหนียวทั้งสามหลังทำการปรับสภาพผิว พบว่า แร่ดินเหนียว montmorillonite (Mont.) เมื่อเปรียบเทียบกับที่ปรับสภาพผิวด้วย octadecylamine แล้ว (Treated Mont.) ปรากฏว่า เวลาที่ยางเริ่มคงรูปและเวลาในการขึ้นรูปมีค่าลดลง หมายความว่าการปรับสภาพผิวสารตัวเติมแร่ดินเหนียว montmorillonite ด้วย octadecylamine นั้น หมู่ ammonium ที่เกิดขึ้น ช่วยทำให้ปฏิกิริยาการคงรูปของยางคอมพอสิทเร็วขึ้น (Mousa & Karger–Kocsis, 2001) สำหรับ แร่ดินเหนียว kaolinite (Kaolin) และแร่ดินเหนียวขัดสี (Bleaching) เมื่อปรับสภาพผิวด้วย Silane-69 แล้ว (Treated Kaolin และ Treated Bleaching) ปรากฏว่า เวลาที่ยางเริ่มคงรูปและเวลาในการขึ้นรูป กลับมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นผิวของสารตัวเติมเหล่านี้มีสารประกอบออกไซด์ (Oxide) ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ เมื่อทำการปรับสภาพผิวด้วย Silane-69 ทำให้สารประกอบนี้ถูกปกคลุม ทำให้ไม่สามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาได้ เวลาที่ยางเริ่มคงรูปและเวลาในการขึ้นรูปจึงเพิ่มขึ้น

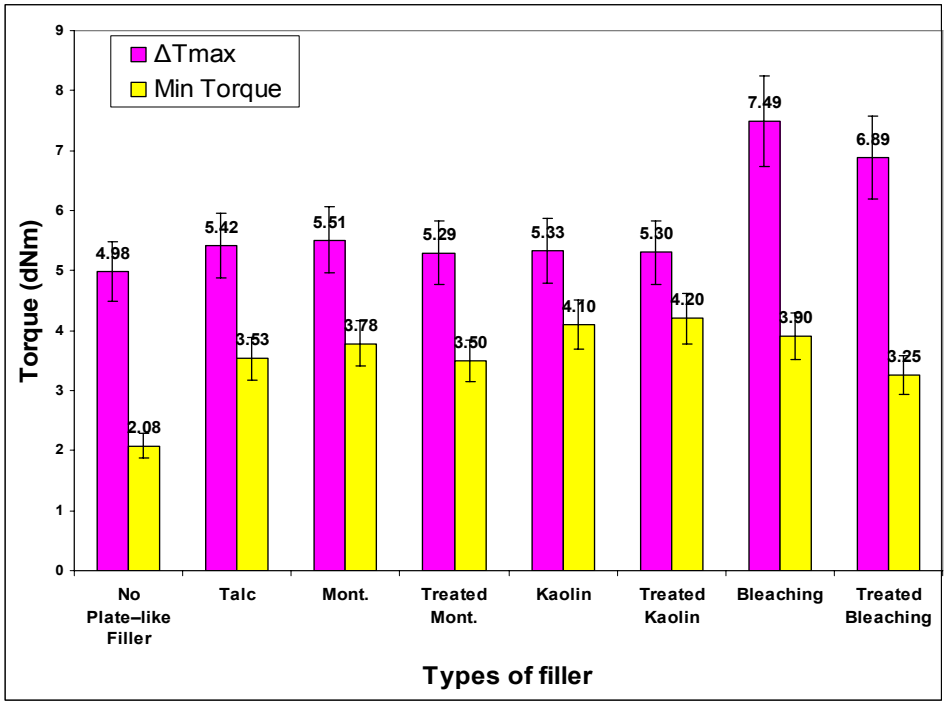
รูปที่ 4.15
ผลเวลาที่ยางเริ่มคงรูปและเวลาในการขึ้นรูปของยางคอมพอสิทแบบปกติ



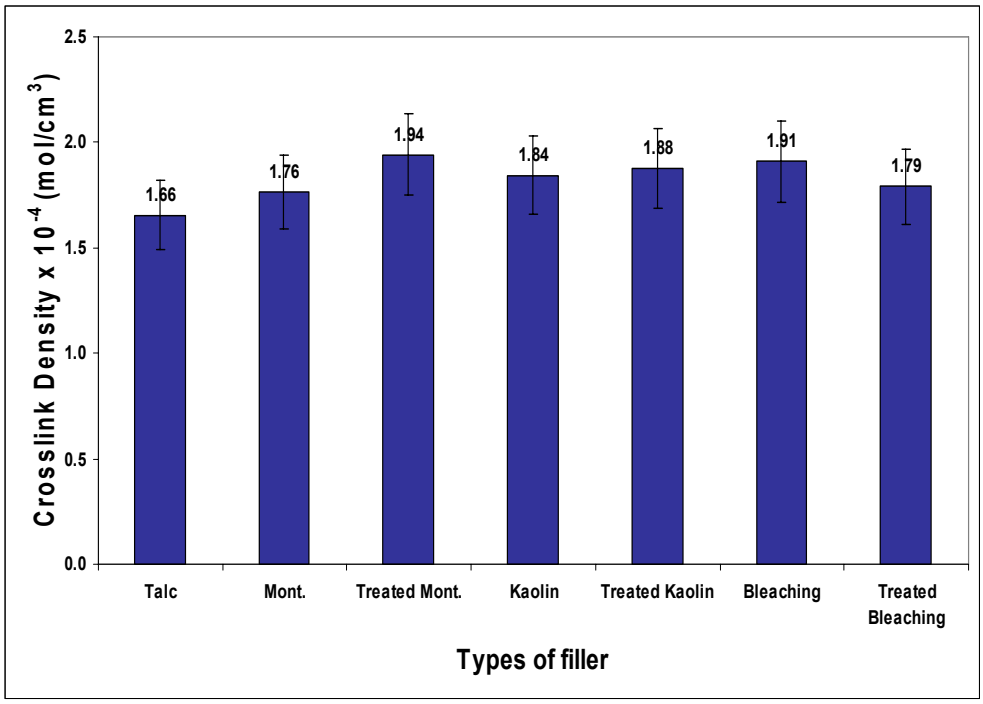
รูปที่ 4.16 แสดงผลของค่าแรงบิดต่ำสุด (T_{min}) และผลต่างของค่าแรงบิดสูงสุดกับต่ำสุด (ΔT_{max}) ของยางคอมพอสิทแบบปกติ ค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum Torque) มีความสัมพันธ์กับค่าความหนืด (Viscosity) ของยางคอมพอสิทก่อนเกิดโครงสร้างแบบเชื่อมโยง (Ismail & Leong, 2001) ส่วนค่าผลต่างของแรงบิด (ΔT_{max}) แปรผันตรงกับความหนาแน่นของโครงสร้างร่างแห (Crosslinking density) ภายในยาง (Ramesan, Mathew, Kuriakose, & Alex, 2001) จะเห็นได้ว่า ยางคอมพอสิทที่มีสารตัวเติมเป็นแร่ดินเหนียวขัดสี (Bleaching) มีค่า ΔT_{max} สูงสุด แสดงว่า คอมพอสิทของสารตัวเติมชนิดนี้ มีความหนาแน่นของโครงสร้างร่างแห (Crosslinking density) ภายในยางมากด้วย เมื่อเปรียบเทียบกับคอมพอสิทของสารตัวเติมอื่น ทั้งนี้อาจเกิดจากโลหะออกไซด์ที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาการเกิดร่างแหที่มีอยู่บนพื้นผิวของแร่ดินเหนียวขัดสีในปริมาณที่มากและสังเกตว่าเมื่อมีการปรับสภาพผิวสารตัวเติมแล้ว (Treated Bleaching) พบว่า มีค่า ΔT_{max} ลดลง แสดงถึงการเกิดโครงสร้างร่างแหในปริมาณที่ลดลง โดยคาดว่าจะเกิดจากสาเหตุเดียวกับการที่เวลาในการขึ้นรูปสูงขึ้น

รูปที่ 4.16

ผลของค่าแรงบิดต่ำสุด (T_{min}) และผลต่างของค่าแรงบิดสูงสุดกับต่ำสุด (ΔT_{max}) ของยางคอมพอสิทแบบปกติ



รูปที่ 4.17
ผลค่าปริมาณของโครงสร้างแบบเชื่อมโยงของยางคอมพอสิทแบบปกติ



รูปที่ 4.17 แสดงค่าความหนาแน่นของโครงสร้างร่างแห เมื่อทำการคำนวณหาโดยวิธีการวัดการบวมตัวในตัวทำละลาย (Solvent-swelling measurement) เมื่อเปรียบเทียบกับค่าผลต่างของค่าแรงบิด (ΔT_{max}) ในรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ว่าผลที่ได้ค่อนข้างสอดคล้องกัน

<u>สมบัติการดึงยืด</u> :

สมบัติการดึงยืดของยางคอมพอสิท ในที่นี้แสดงค่าความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength), ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) และโมดูลัส (Modulus) ที่ความเครียด (Strain) เท่ากับ 100% และ 300% ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบระหว่างชนิดของสารตัวเติมและผลที่ได้รับจากการปรับสภาพผิวเทียบกับสูตรที่ไม่มีการใช้สารตัวเติมแบบแผ่นชนิดใดๆ และสูตรที่ใช้สารตัวเติมแป้งทัลคัม ซึ่งสมบัติการดึงยืดของยางคอมพอสิทโดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของสารตัวเติมในยางคอมพอสิทและความหนาแน่นของโครงสร้างร่างแหภายในยาง

จากรูปที่ 4.18 – 4.21 พบว่ายางคอมพอสิทที่ใช้สารตัวเติมแบบแผ่นจะมีค่าความสามารถในการดึงยืดที่น้อยลง (ดูจากค่าการยืดตัว ณ จุดขาด) รวมทั้ง จะมีค่าโมดูลัสที่มี %

ของค่าการดึงยืดสูงๆ น้อยลงเช่นเดียวกัน เมื่อพิจารณาในส่วนของยางคอมพอสิทที่มีสารตัวเติมเป็นแร่ดินเหนียว montmorillonite พบว่า ก่อนการปรับสภาพผิวของสารตัวเติม (Mont.) มีค่าความทนทานต่อแรงดึงที่สูงกว่าคอมพอสิทที่ไม่มีการใช้สารตัวเติมแบบแผ่น (No Plate–like Filler) และที่ใช้แป้งทัลคัม(Talc) ในขณะที่ ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดและค่ามอดูลัสที่ 100% ต่ำกว่าและกลับมาสูงกว่าสำหรับค่ามอดูลัสที่ 300% เมื่อทำการปรับสภาพผิวของสารตัวเติม (Treated Mont.) ทำให้ ค่าโมดูลัสของยางคอมพอสิทเพิ่มสูงขึ้นมาก ถึงแม้ว่าจะมีปริมาณของโครงสร้างร่างแหที่ต่ำกว่าสารตัวเติมแร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ไม่มีการปรับสภาพผิว (Mont.) เล็กน้อย และส่งผลให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงและค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของยางคอมพอสิท มีค่าลดลงกว่าคอมพอสิทที่ไม่มีการใช้สารตัวเติมแบบแผ่น รวมทั้ง คอมพอสิทที่ใช้สารตัวเติมแร่ดินเหนียว montmorillonite ก่อนการปรับสภาพผิวและแป้งทัลคัม การเพิ่มขึ้นของโมดูลัสนี้อาจเกิดจากการกระจายตัวที่ดีขึ้นของแร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ได้รับการปรับสภาพผิวแล้วในยางผสม

เมื่อพิจารณายางคอมพอสิทที่มีสารตัวเติมเป็นแร่ดินเหนียว kaolinite พบว่าก่อนการปรับสภาพผิวของสารตัวเติม (Kaolin) มีลักษณะเช่นเดียวกับสารตัวเติมแร่ดินเหนียว montmorillonite เมื่อทำการปรับสภาพผิวของสารตัวเติมแล้ว (Treated Kaolin) ทำให้ ค่าความทนทานต่อแรงดึง, ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด รวมทั้ง ค่ามอดูลัสที่ 100% และ 300% เพิ่มขึ้นทั้งหมด เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งทัลคัมและสารตัวเติมเป็นแร่ดินเหนียว kaolinite ก่อนการปรับสภาพผิว (Kaolin) (ยกเว้นในกรณีของคอมพอสิทที่ไม่มีการใช้สารตัวเติมแบบแผ่นที่มีค่าการยืดตัว ณ จุดขาดและค่าโมดูลัสที่ 100% สูงกว่า) เนื่องจากชั้นของแร่ดินเหนียว kaolinite ไม่สามารถขยายตัวได้เหมือนของแร่ดินเหนียว montmorillonite ดังนั้น ผลการทดลองจึงแสดงว่า การปรับสภาพช่วยให้เกิดผิวสัมผัสที่ดีขึ้นระหว่างแร่ดินเหนียวและยาง ถึงแม้ว่าจะมีปริมาณของโครงสร้างร่างแหลดลงเล็กน้อย

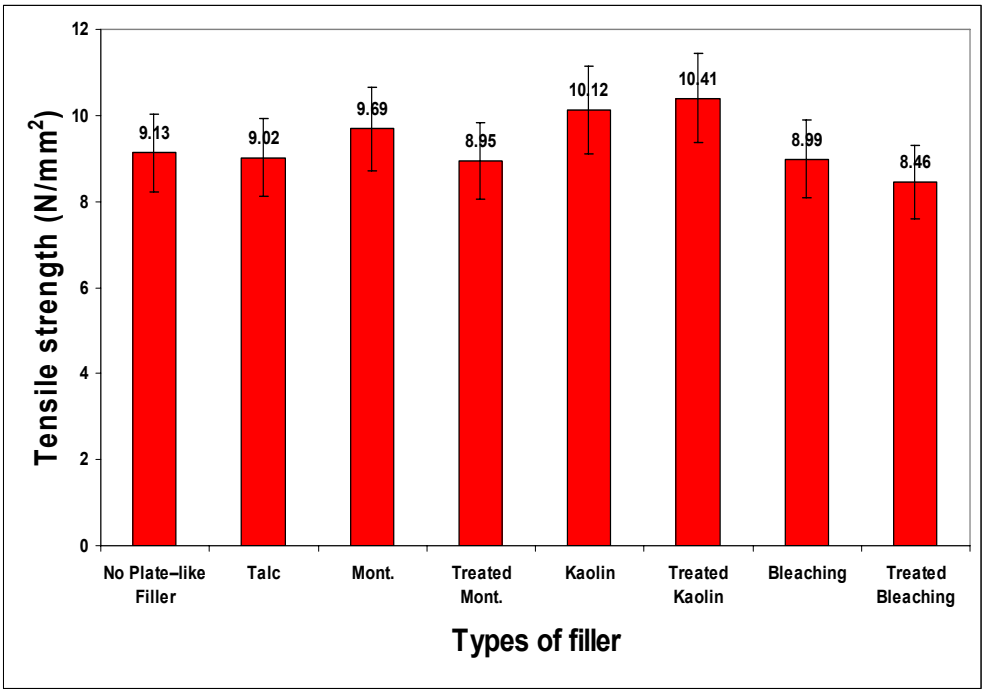
ส่วนกรณีของยางคอมพอสิทที่มีสารตัวเติมเป็นแร่ดินเหนียวขัดสี พบว่า ก่อนการปรับสภาพผิวของสารตัวเติม (Kaolin) นั้น มีเพียงค่ามอดูลัสที่ 100% และ 300% ที่สูงกว่าคอมพอสิทที่ไม่มีการใช้สารตัวเติมแบบแผ่นและที่ใช้แป้งทัลคัม เมื่อการปรับสภาพผิวของสารตัวเติมแล้ว (Treated Bleaching) ทำให้ ค่าความทนทานต่อแรงดึงและค่ามอดูลัสที่ 100% และ 300% ของยางคอมพอสิทมีค่าลดลง ในขณะที่ ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับคอมพอสิทของสารตัวเติมแร่ดินเหนียวขัดสีก่อนการปรับสภาพผิว (Bleaching), คอมพอสิทที่

ไม่มีการใช้สารตัวเติมแบบแผ่นและที่ใช้แป้งทัลคัม กรณีนี้แสดงถึงการปรับสภาพที่ไม่เหมาะสม เพราะไม่ทำให้เกิดผิวสัมผัสที่ดีระหว่างยางกับสารตัวเติม ประกอบกับการปรับสภาพผิวทำให้ความหนาแน่นของโครงสร้างร่างแหลดลง จึงทำให้สมบัติเชิงกลลดลงต่ำกว่าเดิม

ดังนั้น ภาพรวมในเชิงสมบัติเชิงกลพบว่าการใช้สารตัวเติมแบบแผ่นทำให้ค่าการดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง โดยสารตัวเติมแบบแผ่นบางชนิด โดยเฉพาะ แร่ดินเหนียว kaolinite ทำให้ยางคอมพอสิทมีค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงขึ้น และแม้ว่าสารตัวเติมแบบแผ่นบางชนิดจะให้ค่าโมดูลัสที่ 100% ต่ำกว่าสูตรที่ไม่ใช้สารตัวเติมแผ่น แต่ค่าโมดูลัสที่ 300% ของทุกตัวอย่างที่ใช้สารตัวเติมแผ่นจะมีค่าสูงกว่าเมื่อไม่ใช้เสมอ แสดงถึงว่า สารตัวเติมแบบแผ่นซึ่งมีค่า aspect ratio สูง ทำให้เกิดความต้านทานต่อการยืดตัวและเกิดลักษณะของ strain hardening ได้มาก อีกทั้งสารตัวเติมแร่ดินเหนียวที่ไม่มีการปรับสภาพทุกชนิด ให้ค่าความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) และค่ามอดูลัส (Modulus) สูงกว่าแป้งทัลคัม ส่วนเรื่องการปรับสภาพผิวนั้น แร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว มีความโดดเด่นที่ทำให้ค่าโมดูลัสของยางคอมพอสิทสูงขึ้นอย่างมาก แร่ดินเหนียว kaolinite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว แม้ว่าจะช่วยให้ค่าโมดูลัสเพิ่มขึ้นไม่มาก แต่ก็ทำให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงขึ้นด้วย ในขณะที่ แร่ดินเหนียวขัดสีที่ปรับสภาพผิวแล้วกลับทำให้สมบัติต่างๆ ของยางคอมพอสิทแย่ลง

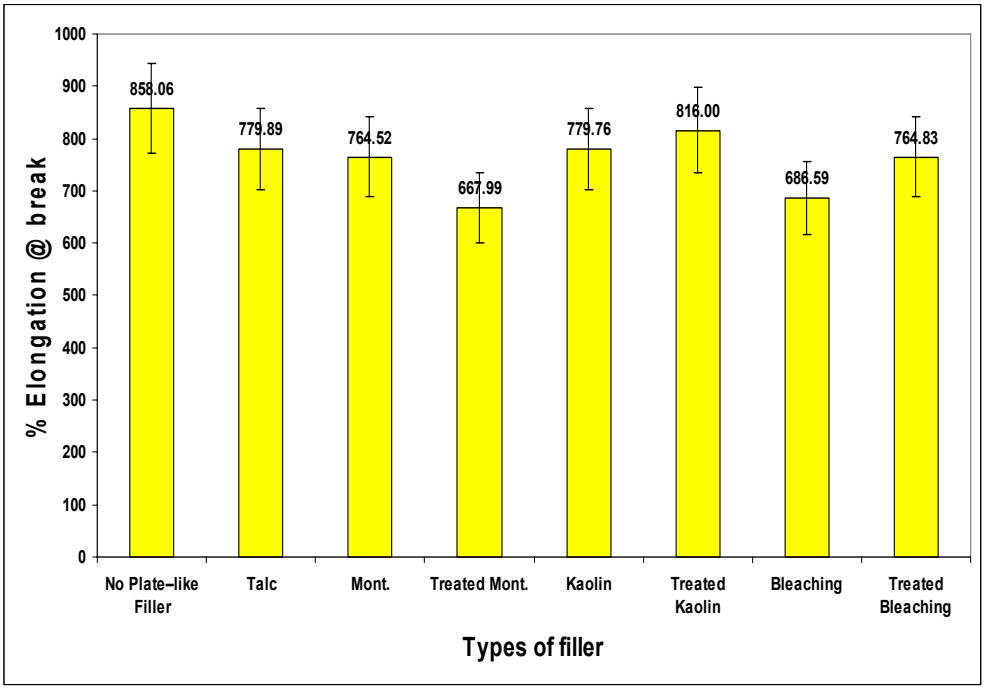
รูปที่ 4.18

ผลความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ของยางคอมพอสิทแบบปกติ



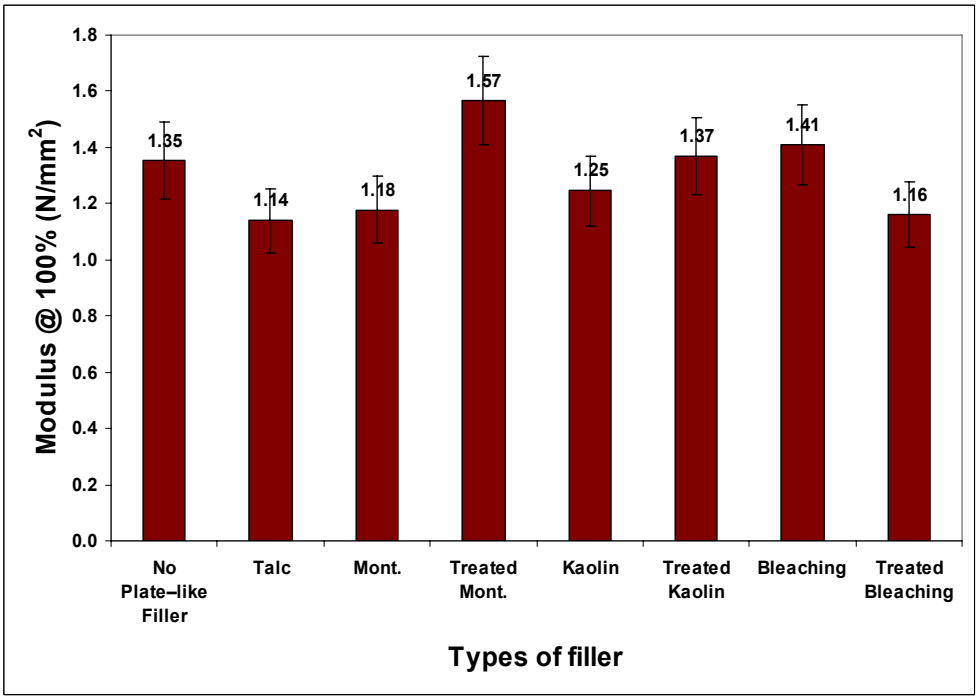
รูปที่ 4.19

ผลค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) ของยางคอมพอสิทแบบปกติ



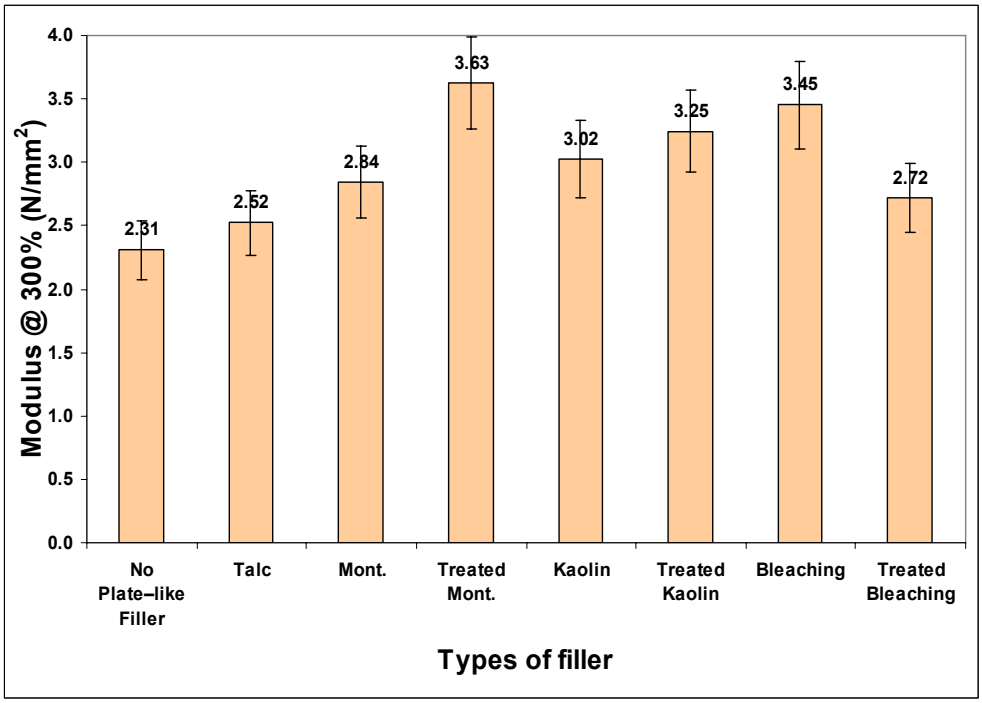
รูปที่ 4.20

ผลโมดูลัส (Modulus) ที่ความเครียด (Strain) เท่ากับ 100%ของยางคอมพอสิทแบบปกติ



รูปที่ 4.21

ผลโมดูลัส (Modulus) ที่ความเครียด (Strain) เท่ากับ 300%ของยางคอมพอสิทแบบปกติ

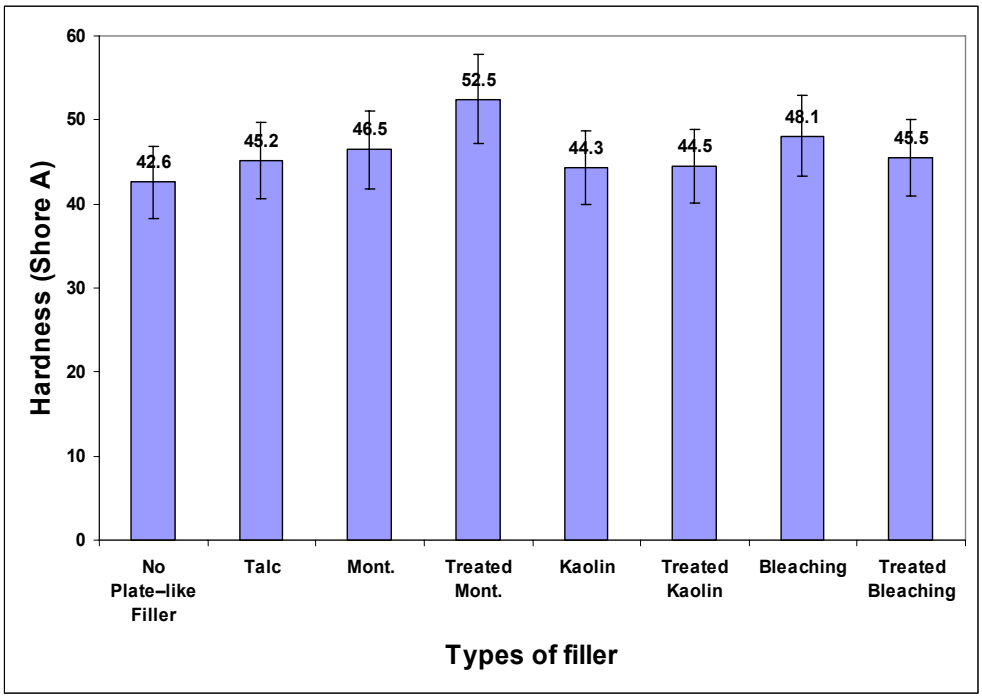


<u>สมบัติความแข็งแรง :</u>

สมบัติความแข็งที่ผิวของยางคอมพอสิท (Surface Hardness) แสดงในรูปที่ 4.22 โดยปกติค่าความแข็งที่ผิวส่วนใหญ่จะแปรผันตรงกับค่าปริมาณของโครงสร้างร่างแหกล่าวคือ ถ้าค่าปริมาณของโครงสร้างร่างแหมีค่ามาก จะส่งผลทำให้ค่าความแข็งที่ผิวมีค่ามากเช่นเดียวกัน แต่จากผลการทดลองหาค่าปริมาณของโครงสร้างร่างแห พบว่า คอมพอสิทของสารตัวเติมแร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว (Treated Mont.) มีค่าปริมาณของโครงสร้างร่างแหเกือบจะน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับคอมพอสิทที่ไม่มีการใช้สารตัวเติมแบบแผ่นและที่ใช้สารตัวเติมชนิดอื่น แต่กลับมีค่าความแข็งที่ผิวมากที่สุด อาจเป็นเพราะว่าอนุภาคของแร่ดินเหนียว montmorillonite เป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ระยะระหว่างชั้นสามารถขยายตัวได้ ทำให้มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงและอาจเกิดการแทรกสอดของโมเลกุลยางระหว่างชั้นที่เป็นระเบียบของแร่ดินเหนียว (Intercalation) ในขณะที่ สารตัวเติมชนิดอื่นไม่สามารถขยายตัวได้ ดังนั้น การที่คอมพอสิทของสารตัวเติมแร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ได้รับการปรับสภาพผิวแล้ว มีค่าความแข็งแรงสูงมากนี้น่าจะเป็นผลมาจากการมีผิวสัมผัสที่ดีหรืออาจมีการขยายตัวของแร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ปรับสภาพผิวแล้วร่วมกับผลของความหนาแน่นของโครงสร้างร่างแห

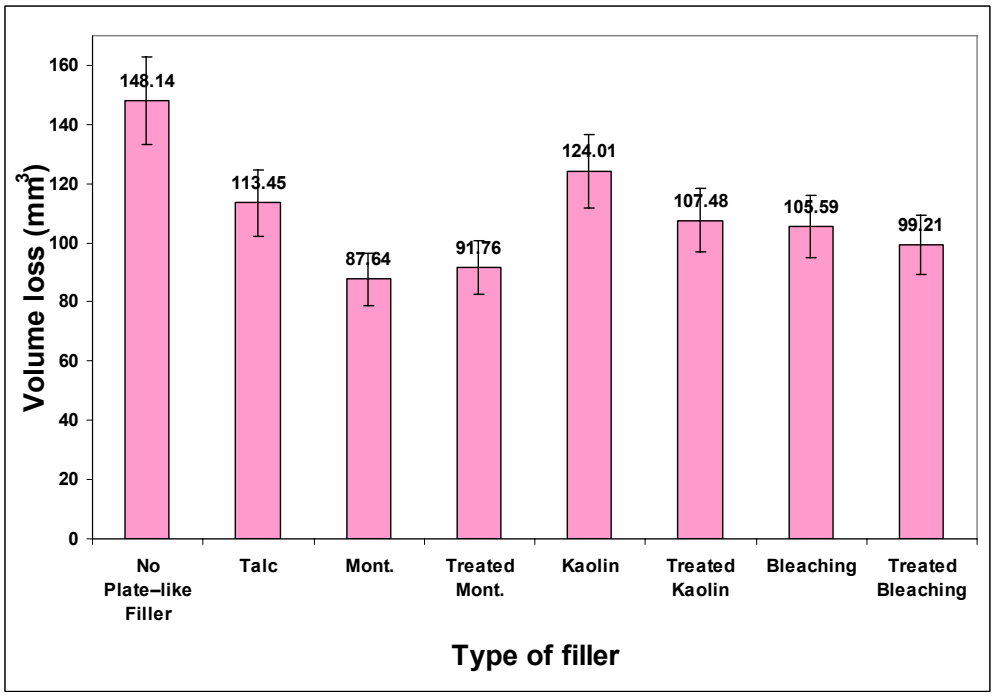
รูปที่ 4.22

ผลความแข็งแรงที่ผิวของยางคอมพอสิทแบบปกติ



รูปที่ 4.23

ปริมาตรที่สึกหรอของยางคอมพอสิทต่างๆ ในการทดสอบความต้านทานการสึกหรอ



<u>สมบัติด้านอื่น ๆ :</u>

สมบัติความทนทานต่อการสึกหรอของยางคอมพอสิท (Abrasion Resistance) เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถทนต่อแรงที่กระทำในการขัดถูต่อผิวหน้าของยางคอมพอสิทนั้น ซึ่งค่า volume loss ที่อ่านได้จากรูปที่ 4.23 หมายถึงปริมาตรของผิวหน้าของยางคอมพอสิทนั้นที่หายไปเมื่อได้รับการขัดสี กล่าวคือ ถ้าค่าที่ได้มีค่าน้อย แสดงว่า เนื้อของผิวหน้าของยางคอมพอสิทนั้นหายไปน้อย สามารถทนทานต่อการสึกหรอได้ดี นั่นเอง

รูปที่ 4.23 แสดงผลความทนทานต่อการสึกหรอของยางคอมพอสิทแบบปกติ จะเห็นได้ว่า คอมพอสิทที่ไม่มีการใช้สารตัวเติมแบบแผ่น จะมีความทนทานต่อการสึกหรอที่ต่ำอย่างมาก (ปริมาตรของผิวหน้าของยางหายไปมากที่สุด) ในขณะที่ คอมพอสิทของสารตัวเติมแร่ดินเหนียว montmorillonite ทั้งก่อนและหลังได้รับการปรับสภาพผิว (Mont. และ Treated Mont.) จะสามารถทนทานต่อการสึกหรอได้ดีกว่าสารตัวเติมอื่นๆ อย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากปริมาตรที่หายไปจากการขัดสีนั้น เป็นการหลุดออกของสารตัวเติมเกือบทั้งสิ้น ดังนั้น การที่แร่ดินเหนียว montmorillonite ทั้งก่อนและหลังการปรับสภาพผิวมีความต้านทานต่อการสึกหรอที่ดี แสดงถึง การยึดเหนี่ยวกับยางที่ดีกว่าสารตัวเติมอื่น ทั้งนี้อาจเกี่ยวเนื่องกับความสามารถในการขยายตัวได้ของแร่ดินเหนียว montmorillonite ในขณะที่ คอมพอสิทที่มีสารตัวเติมเป็นแร่ดินเหนียว kaolinite (Kaolin) นั้น มีสามารถทนทานต่อการสึกหรอต่ำที่สุด และการปรับสภาพผิวของสารตัวเติมแร่ดินเหนียว kaolinite สามารถช่วยลดการสึกหรอได้ค่อนข้างมาก

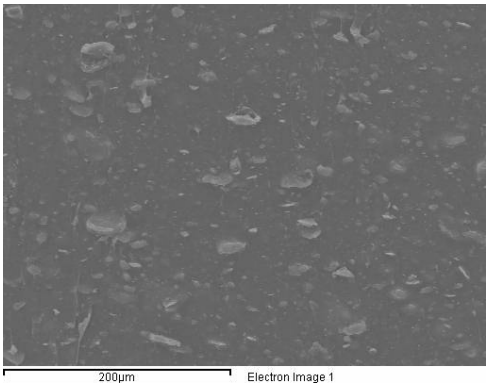
เมื่อทำการถ่ายภาพพื้นที่ผิวหัก (Fractured surface) ของยางคอมพอสิทด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ที่กำลังขยาย 100 เท่า ของยางคอมพอสิทที่บดผสมด้วยสารตัวเติมแป้งทัลคัม, แร่ดินเหนียว montmorillonite และแร่ดินเหนียว kaolinite ทั้งก่อนและหลังการปรับสภาพผิว ดังแสดงในรูปที่ 4.24 (c.) และ (d.) จะเห็นได้ว่า คอมพอสิทของสารตัวเติมแร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว (Treated Mont.) และแร่ดินเหนียว kaolinite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว (Treated Kaolin) เมื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเติมที่ไม่ได้ปรับสภาพผิวของแต่ละชนิด จะเห็นได้ว่า การกระจายตัวของสารตัวเติมที่ได้รับการปรับสภาพผิวมีลักษณะที่ดีกว่า กล่าวคือ กลุ่มก้อนของสารตัวเติมมีขนาดเล็กกว่า โดยคอมพอสิทของแร่ดินเหนียว kaolinite ที่ได้รับการปรับสภาพผิวแล้วนั้น พบเศษสารตัวเติมที่หลุดร่อนในปริมาณที่น้อยกว่าคอมพอสิทของสารตัวเติมที่ไม่ได้รับการปรับสภาพผิวซึ่งผลที่

ได้สอดคล้องกับความต้านทานการสึกหรอและสมบัติเชิงกลต่างๆ ที่ดีขึ้นหลังการปรับสภาพผิวแล้ว เมื่อเปรียบเทียบกับคอมพอสิทของสารตัวเติมแป้งทัลคัม พบว่า แป้งทัลคัมมีการกระจายตัวในยางคอมพอสิทได้ดีใกล้เคียงกับแร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว ดังนั้น การที่แป้งทัลคัมมีโมดูลัสและความต้านทานการสึกหรอที่ค่อนข้างต่ำนั้น น่าจะเกิดจากสมบัติที่อ่อนนุ่มและหลุดร่อนง่ายของแป้งทัลคัมเอง

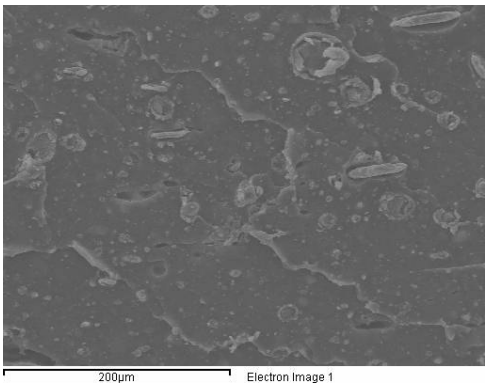
ส่วนด้านการศึกษาความเข้ากันได้ของยางธรรมชาติกับยางโบรโมบิวไทล์ เมื่อใช้สารตัวเติมต่างๆ กัน ได้ทำการทดลองโดยการย้อมสีด้วยออสเมียมเตรตตรอกไซด์ (Osmium tetroxide) และนำมาถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากภาพถ่ายไม่พบการแยกเฟสของยางธรรมชาติและยางโบรโมบิวไทล์อย่างชัดเจนในทุกตัวอย่าง จึงได้เปลี่ยนไปทำการทดลองถ่ายภาพการกระจายตัวของธาตุโบรมีนของยางโบรโมบิวไทล์ในยางผสมด้วยทดสอบด้วยเครื่อง Energy Dispersive Spectroscopy X-Ray (EDX) เนื่องจากในยางโบรโมบิวไทล์มีหมู่ฟังก์ชันของโบรมีน ซึ่งไม่ปรากฏในธรรมชาติ ดังภาพที่ 4.25 พบว่า ยางผสมที่ได้นั้นส่วนใหญ่แล้วการผสมกันเกิดขึ้นได้ดี โดยไม่เห็นการจับตัวเป็นกลุ่มก้อนของยางแต่ละชนิด

รูปที่ 4.24

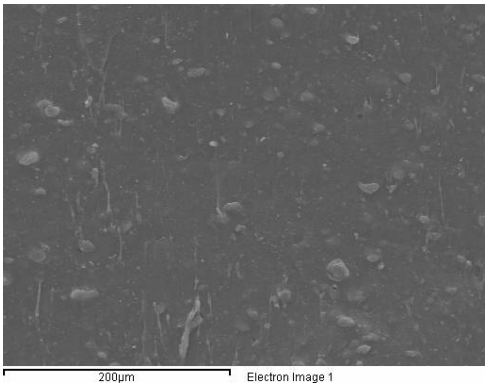
ภาพถ่ายพื้นที่ผิวหักของยางคอมพอสิทที่มีสารตัวเติมเป็น (a.) แป้งทัลคัม (b.) แร่ดินเหนียว montmorillonite (c.) แร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว (d.) แร่ดินเหนียว kaolinite (e.)แร่ดินเหนียว kaolinite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว โดยใช้ SEM



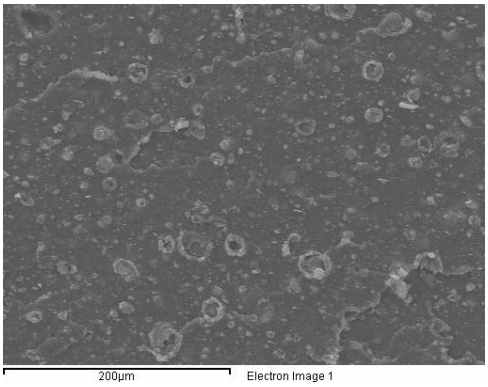
(a.)



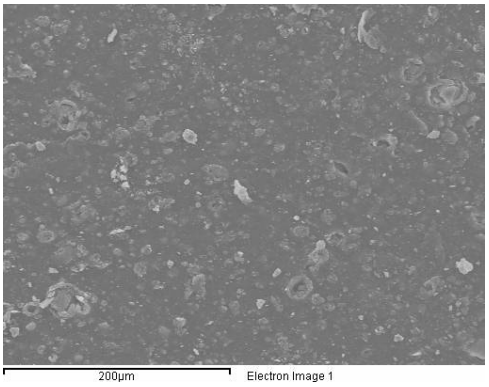
(b.)



(c.)

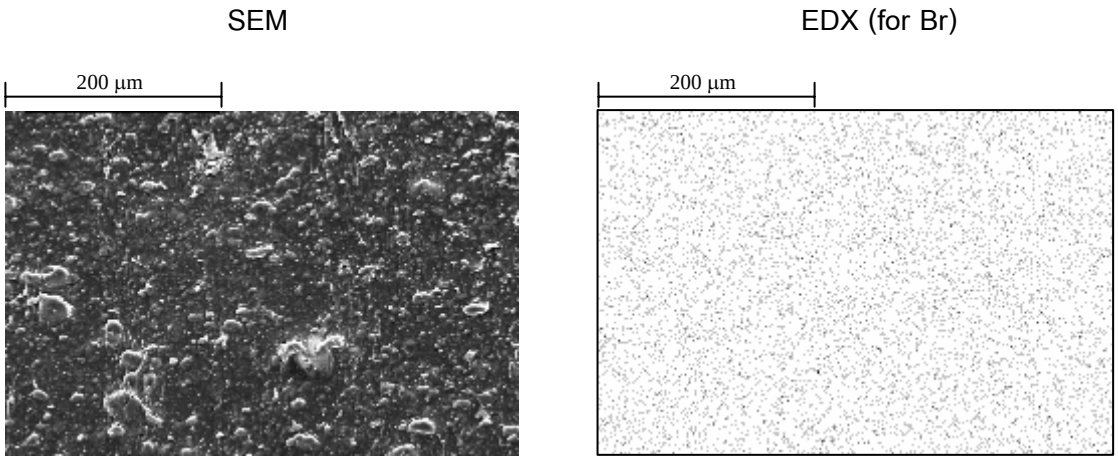


(d.)

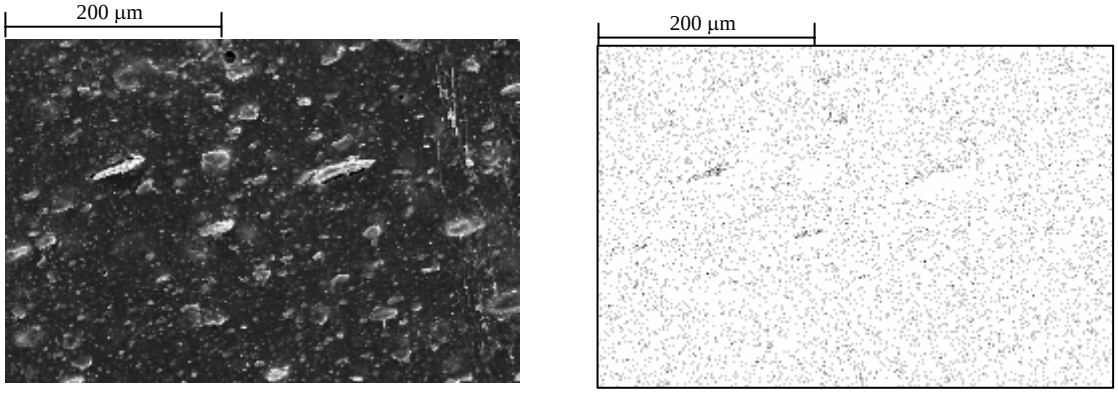


(e.)

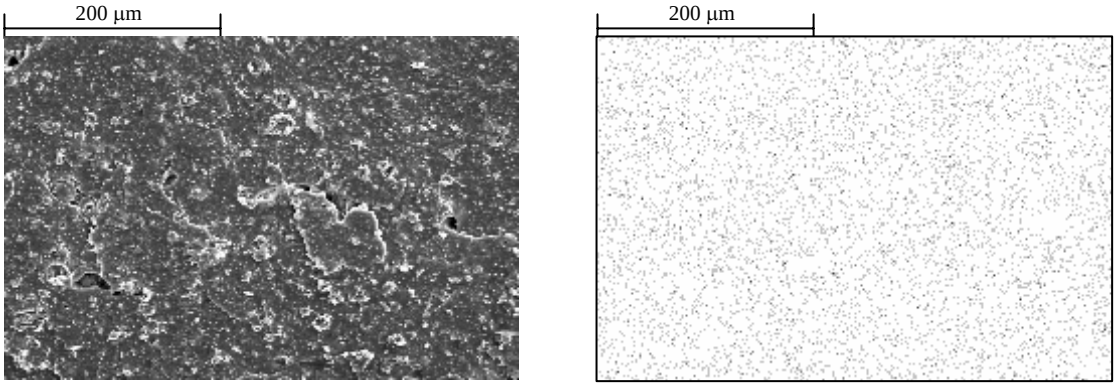
รูปที่ 4.25
ภาพถ่ายพื้นที่ผิวหักของยางคอมพอสิทที่มีสารตัวเติมเป็น (a.) แป้งทัลคัม (b.) แร่ดินเหนียว montmorillonite (c.) แร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว (d.) แร่ดินเหนียว kaolinite (e.) แร่ดินเหนียว kaolinite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว โดยใช้ SEM และ การกระจายตัวของโบรมีน โดยใช้ EDX



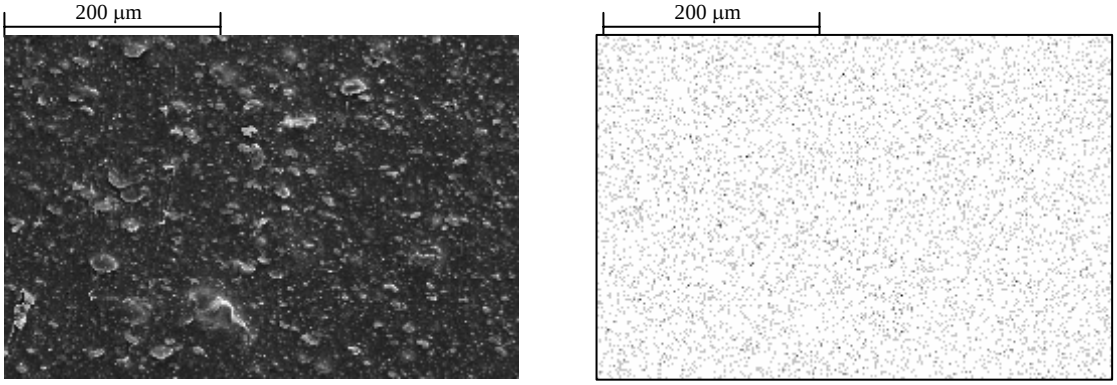
(a.) แป้งทัลคัม



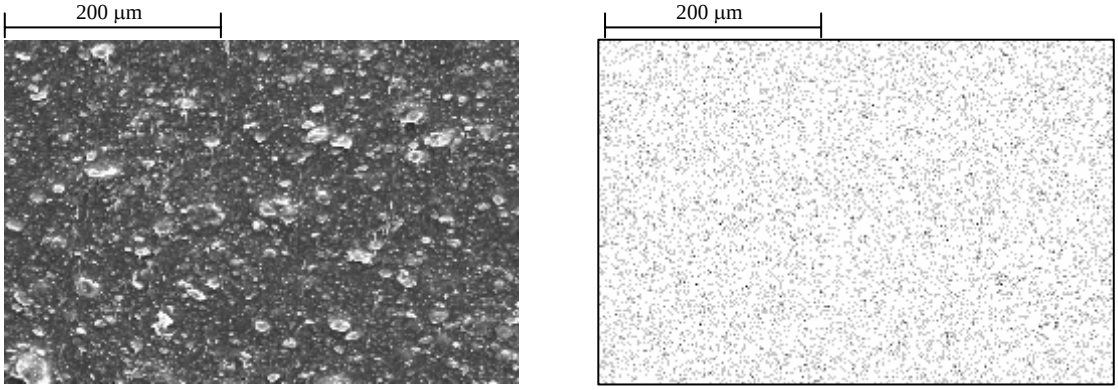
(b.) แร่ดินเหนียว montmorillonite



(c.) แร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว



(d.) แร่ดินเหนียว kaolinite



(e.) แร่ดินเหนียว kaolinite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว

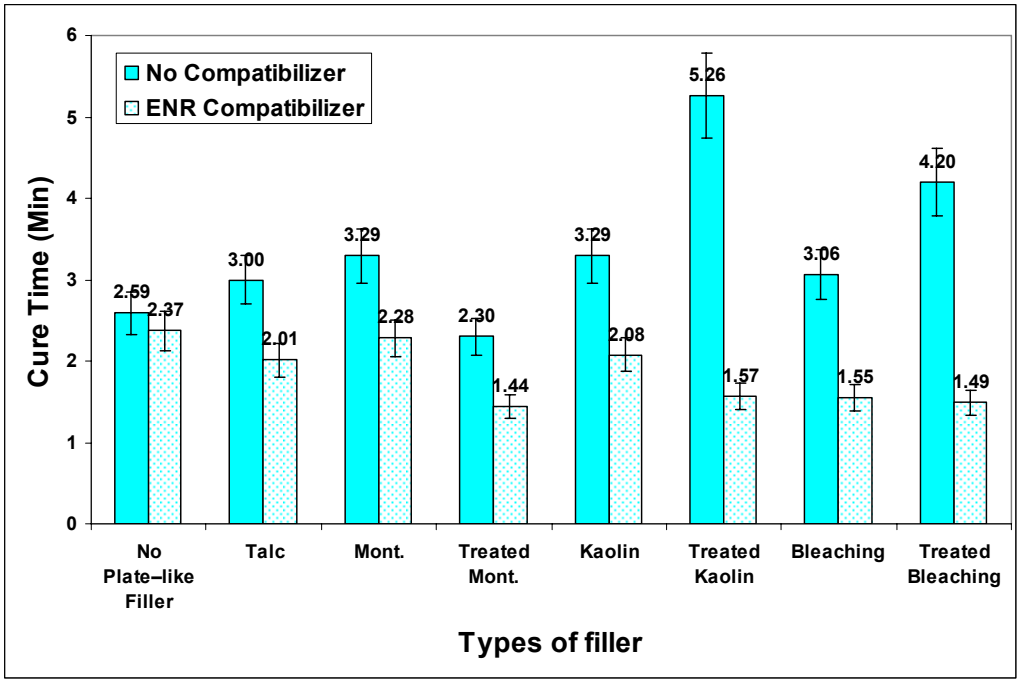
4.5 ผลของตัวประสาน (Compatibilizer) ต่อสมบัติต่าง ๆของยางคอมพอสิท

ส่วนนี้จะเป็นการศึกษาผลของตัวประสาน (Compatibilizer) ต่อสมบัติต่างๆ ของยางคอมพอสิท ซึ่งในขั้นตอนการบดผสมนั้น จะเป็นไปตามสูตร B ในตารางที่ 3.1 ซึ่งมีการบดผสมร่วมกับยาง ENR ในปริมาณ 10 phr เรียกการบดประเภทนี้ว่า “แบบที่ใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน”

<u>สมบัติการคงรูป</u> :

เมื่อพิจารณาเวลาในการขึ้นรูปของคอมพอสิทแบบที่ใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน ดังแสดงในรูปที่ 4.26 และตารางที่ 4.4 สำหรับ แร่ดินเหนียว montmorillonite เมื่อเปรียบเทียบกับที่ปรับสภาพผิวด้วย octadecylamine แล้ว ปรากฏว่า เมื่อใส่ยาง ENR เป็นตัวประสานแล้วเวลาที่ยางเริ่มคงรูปและเวลาในการขึ้นรูปของยางคอมพอสิททุกสูตรมีค่าลดลงจากที่ไม่ได้ใส่ตัวประสาน เมื่อเปรียบเทียบยางคอมพอสิทแบบปกติ เนื่องมาจากหมู่ epoxy ที่เกิดจากการเติมยาง ENR ไปเป็นตัวประสาน ช่วยทำให้ปฏิกิริยาการคงรูปของยางคอมพอสิทเร็วขึ้น (Poh, Ismail, Quah, & Chin, 2001)

รูปที่ 4.26
ผลเวลาในการขึ้นรูปของยางคอมพอสิทแบบที่มียาง ENR เป็นตัวประสาน
เปรียบเทียบกับยางคอมพอสิทแบบปกติ



ตารางที่ 4.5

สมบัติการคงรูปของยางคอมโพสิทแบบที่มียาง ENR เป็นตัวประสาน ที่อุณหภูมิ 180°C

Sample	t_2	t_{90}	T_{max}	T_{min}	ΔT_{max}
No Plate–like Filler	0.45	2.37	7.83	2.45	5.38
	(0.48)	(2.59)	(7.06)	(2.08)	(4.98)
Talc	0.52	2.01	9.24	2.53	6.71
	(1.24)	(3.00)	(8.95)	(3.53)	(5.42)
Mont.	0.52	2.28	9.85	2.77	7.08
	(1.15)	(3.29)	(9.29)	(3.78)	(5.51)
Treated Mont.	0.41	**1.44**	11.93	3.44	8.49
	(1.13)	(2.30)	(8.79)	(3.50)	(5.29)
Kaolin	0.48	2.08	10.48	2.93	7.55
	(1.19)	(3.29)	(9.43)	(4.10)	(5.33)
Treated Kaolin	0.49	1.57	10.28	2.91	7.37
	(1.33)	(5.26)	(9.50)	(4.20)	(5.30)
Bleaching	0.50	1.55	9.58	2.63	6.95
	(0.55)	(3.06)	(11.39)	(3.90)	(7.49)
Treated Bleaching	0.48	1.49	9.58	2.68	6.90
	(1.21)	(4.20)	(10.14)	(3.25)	(6.89)

<u>หมายเหตุ</u> # นิยามของ t_2 และ t_{90} เหมือนในรูปที่ 3.9 ในบทที่ 3

ΔT = ผลต่างระหว่างแรงบิดสูงสุด (T_{max}) และแรงบิดน้อยสุด (T_{min}) มีหน่วยเป็น dNm

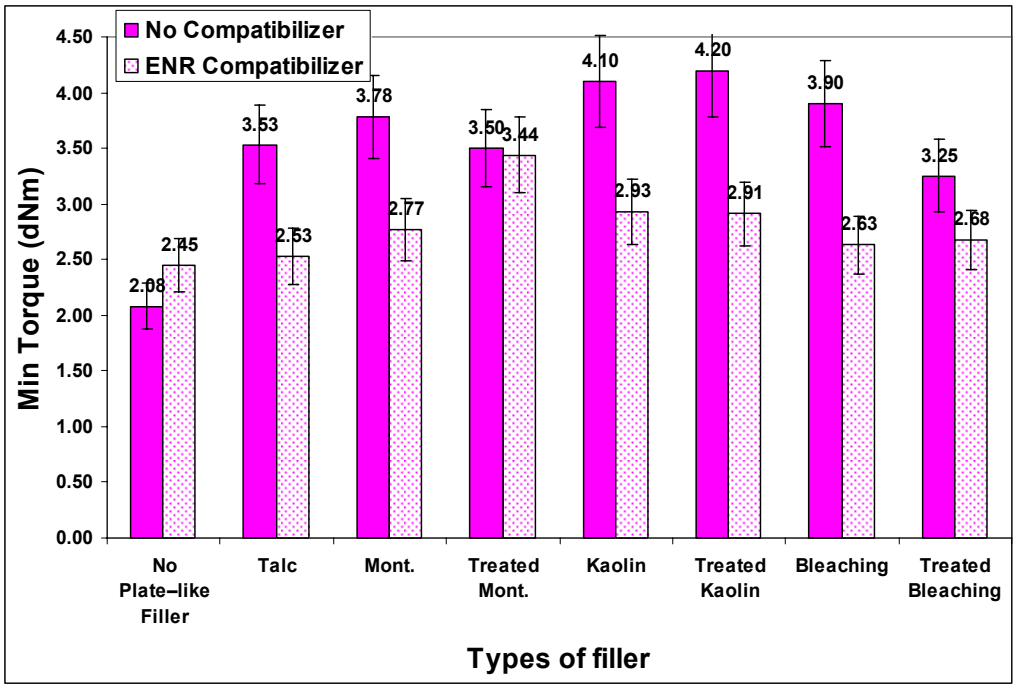
ค่าในวงเล็บ ( ) คือ สมบัติการคงรูปเมื่อไม่มียาง ENR เป็นตัวประสาน

รูปที่ 4.27 แสดงค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum Torque, T_{min}) ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความหนืด (Viscosity) ของยางคอมพอสิท จากรูปพบว่า การใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน ทำให้ค่าแรงบิดต่ำสุด (T_{min}) ลดลงในทุกสารตัวเติม อาจเป็นไปได้ว่า ยาง ENR ช่วยให้สารตัวเติมกระจายตัวในยางผสมได้ดีและทำให้วัฏภาค (phase) ของยางธรรมชาติในยางโบรโมบิวไทล์เล็ก

ลง เกิดแรงต้านทานต่อการไหลน้อยลง โดยยาง ENR ทำให้ค่าแรงบิดต่ำสุดลดลงได้ในคอมพอสิทของสารตัวเติมทุกชนิด

รูปที่ 4.27

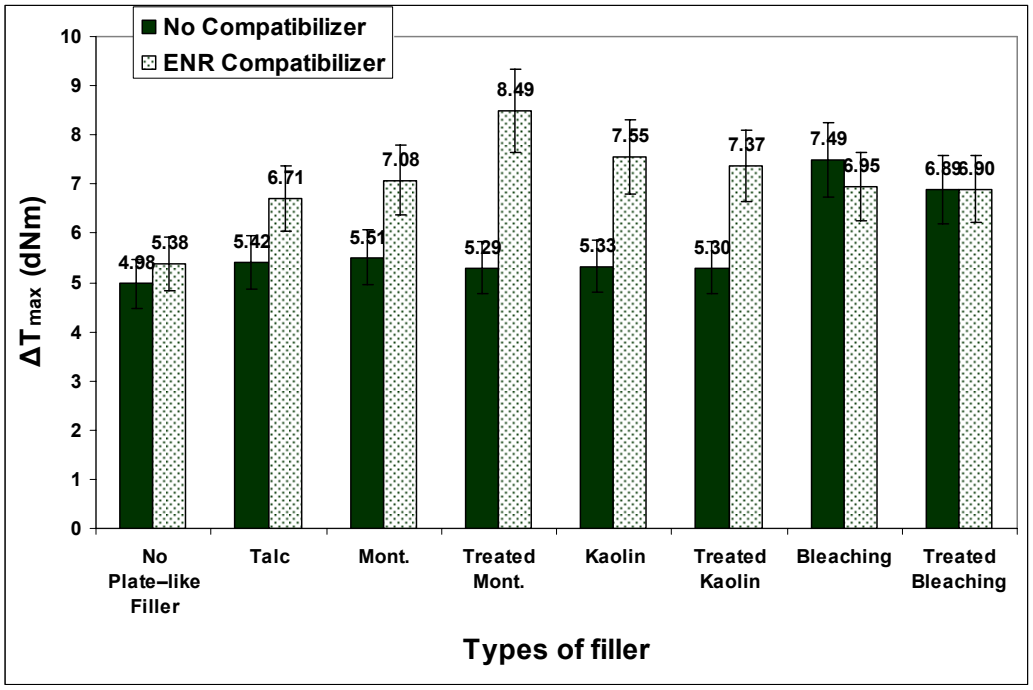
ผลค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum Torque) ของยางคอมพอสิทแบบที่ใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน เปรียบเทียบกับยางคอมพอสิทแบบปกติ



รูปที่ 4.28 แสดงค่าผลต่างของแรงบิด, (ΔT_{max}) ที่บ่งบอกถึง ความหนาแน่นของการเชื่อมประสาน (Crosslinking density) ภายในยาง เมื่อใช้ยาง ENR เป็นตัวประสานในยางคอมพอสิท จะเห็นได้ว่า ค่าผลต่างของแรงบิดโดยส่วนใหญ่แล้วมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเมื่อไม่ใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน เนื่องจากหมู่ epoxy ที่อยู่ในยาง ENR ช่วยเพิ่มปริมาณการเชื่อมประสาน โดยเด่นชัดที่สุดในกรณีคอมพอสิทของสารตัวเติมแร่ดินเหนียว montmorillonite และแร่ดินเหนียวขัดสี ที่ได้รับการปรับสภาพผิวแล้ว (Treated Mont. และ Treated Bleaching)

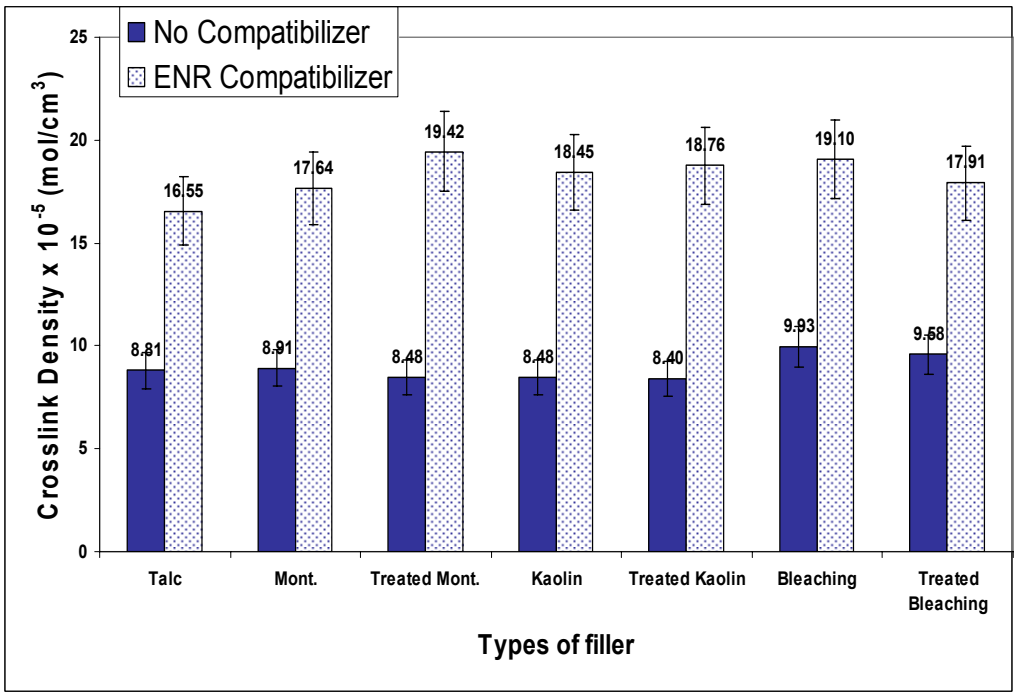
รูปที่ 4.28

ผลค่าผลต่างของแรงบิด (ΔT_{max}) ของยางคอมพอสิทแบบที่ใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน เปรียบเทียบกับยางคอมพอสิทแบบปกติ



รูปที่ 4.29

ผลค่าปริมาณของการเชื่อมประสานของยางคอมพอสิทแบบที่ใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน เปรียบเทียบกับยางคอมพอสิทแบบปกติ



ค่าปริมาณของโครงสร้างร่างแหที่ทำการคำนวณหาโดยวิธีการวัดการบวมตัวในตัวทำละลาย (Solvent-swelling measurement) ของยางคอมพอสิทที่ใช้ยาง ENR เป็นตัวประสานเปรียบเทียบกับยางคอมพอสิทที่แบบปกติ แสดงในรูปที่ 4.29 จะเห็นได้ว่าผลที่ได้สอดคล้องกับผลต่างของค่าแรงบิดในรูปที่ 4.28 กล่าวคือ เมื่อใช้ยาง ENR เป็นตัวประสานให้กับยางคอมพอสิท ทำให้มีปริมาณของโครงสร้างร่างแหเพิ่มขึ้น โดยในการวิเคราะห์วิธีนี้ พบว่า เมื่อใช้ยาง ENR ทำให้ค่าปริมาณของโครงสร้างร่างแหมีค่าสูงขึ้นในทุกตัวอย่าง อย่างไรก็ดี การหาค่าปริมาณของโครงสร้างร่างแหโดยดูจากการบวมตัวนี้อาจวัดค่าปริมาณของโครงสร้างร่างแหของยางผสมที่ใช้ยาง ENR 10 phr ได้มากกว่าความจริงเล็กน้อย เนื่องจากยาง ENR มีความสามารถในการบวมตัวในโทลูอีนต่ำกว่ายางธรรมชาติ

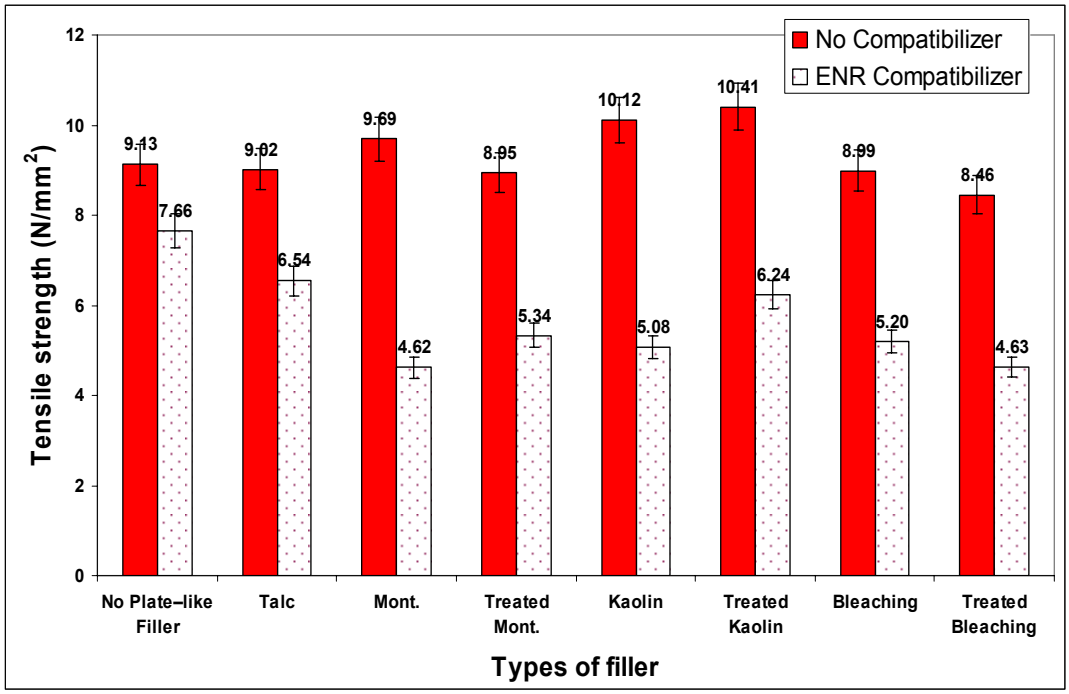
<u>สมบัติการดึงยืด</u> :

เมื่อพิจารณาในส่วนของสมบัติเชิงกลในรูปที่ 4.30 – 4.33 พบว่า เมื่อใช้ยาง ENR เป็นตัวประสานให้กับยางคอมพอสิท ทำให้ค่าโมดูลัสของยางคอมพอสิทเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่าตัวในทุกตัวอย่าง ส่งผลให้คอมพอสิทมีความแข็งมากขึ้นและทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดและค่าการยืดตัว ณ จุดขาด มีค่าลดลงมากด้วยเช่นกัน โดยเป็นผลของยาง ENR ที่ทำให้ปริมาณของโครงสร้างร่างแหภายในยางคอมพอสิท มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งโดยปกติแล้ว เมื่อปริมาณของโครงสร้างร่างแหเพิ่มขึ้น จะทำให้ยางมีสมบัติเปลี่ยนจากแข็งยืดหยุ่นไปเป็นแข็งเปราะ เป็นผลให้ความแข็งแกร่ง (Stiffness) ของยางมีค่าเพิ่มขึ้น แต่จะแตกหักได้ง่ายขึ้นด้วย

รูปที่ 4.30

ผลความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ของยางคอมพอสิท

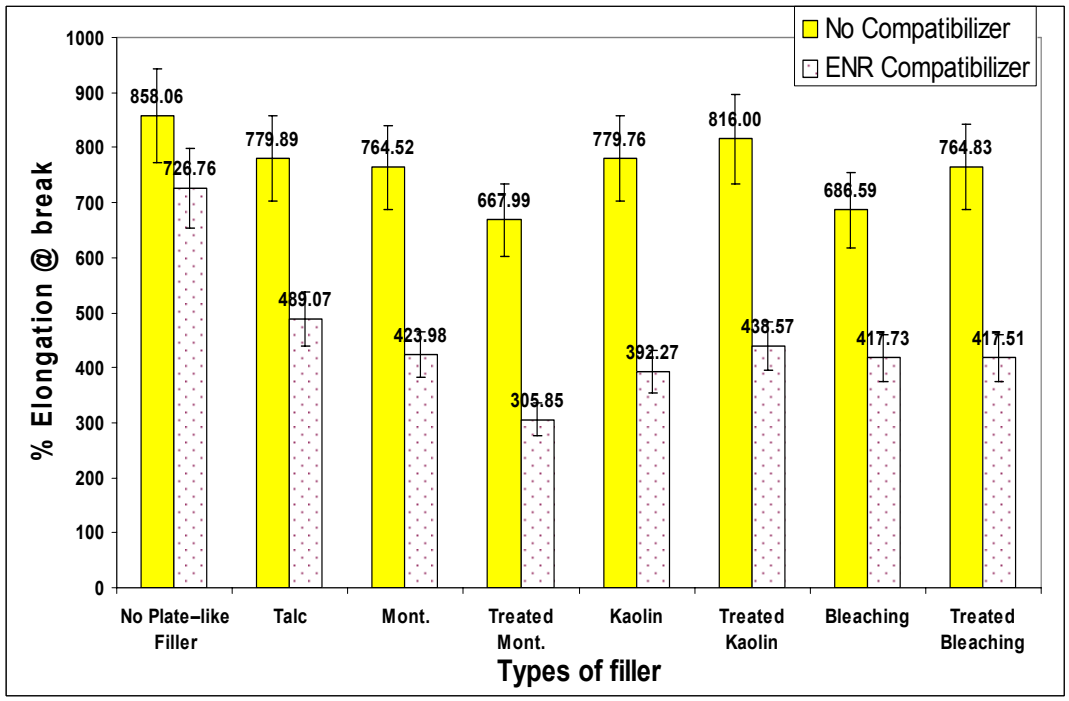
แบบที่ใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน เปรียบเทียบกับยางคอมพอสิทแบบปกติ



รูปที่ 4.31

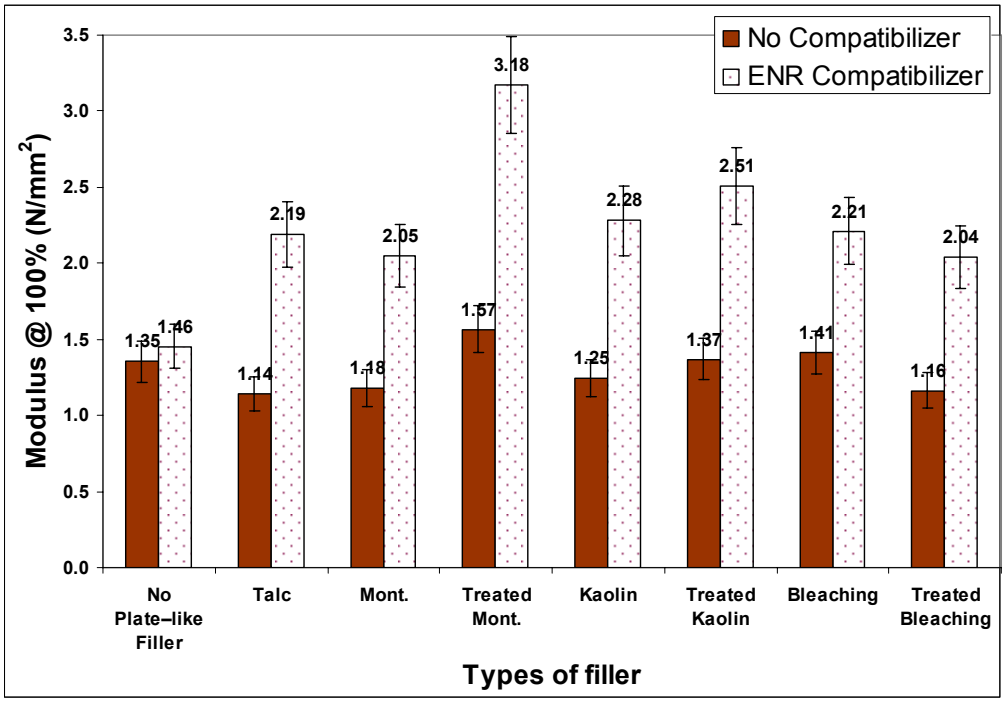
ผลค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation @ break) ของยางคอมพอสิท

แบบที่ใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน เปรียบเทียบกับยางคอมพอสิทแบบปกติ



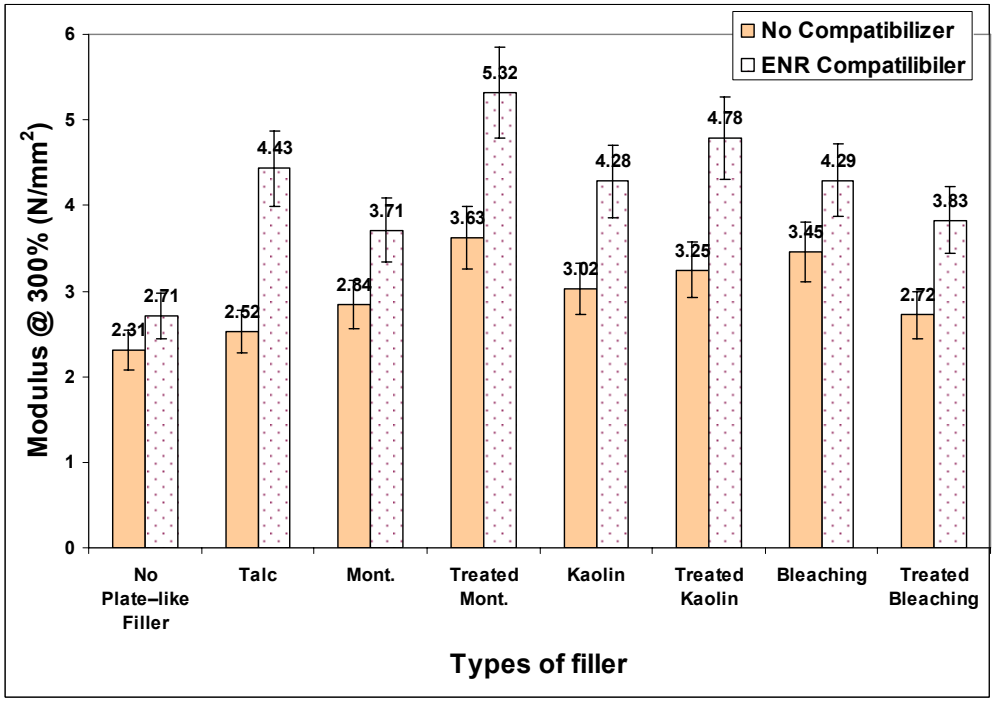
รูปที่ 4.32

ผลโมดูลัส (Modulus) ที่ความเครียด (Strain) เท่ากับ 100% ของยางคอมพอสิท
แบบที่ใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน เปรียบเทียบกับยางคอมพอสิทแบบปกติ



รูปที่ 4.33

ผลโมดูลัส (Modulus) ที่ความเครียด (Strain) เท่ากับ 300% ของยางคอมพอสิท
แบบที่ใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน เปรียบเทียบกับยางคอมพอสิทแบบปกติ



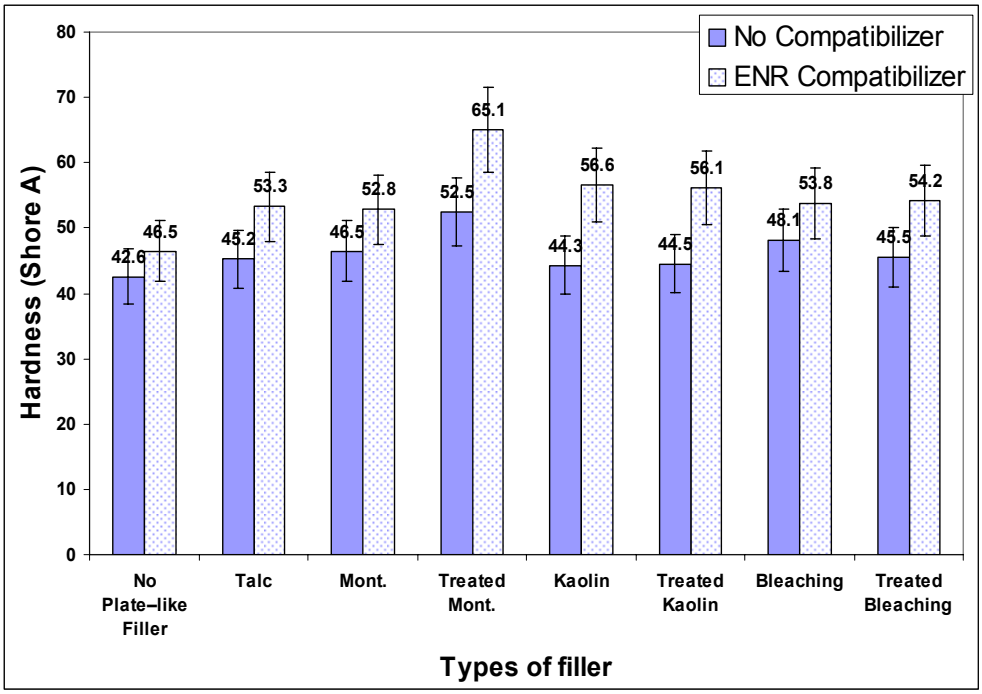
สังเกตได้ว่า ผลการทดลองที่ผู้วิจัยได้ไม่สอดคล้องกับคุณ Teh และคณะ, 2004 ซึ่งพบว่าการใช้ยาง ENR 25 และ ENR 50 (25 และ 50 mol% epoxidation) ปริมาณ 10 phr เป็นตัวประสาน ให้กับยางธรรมชาติและออแกนโนเคย์ของแร่ดินเหนียว montmorillonite ปริมาณ 2 phr นอกจากให้ค่าโมดูลัสจะสูงขึ้นแล้ว ค่าการทนทานต่อแรงดึงยืด (Tensile strength) และค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) ต่างมีค่าเพิ่มขึ้นทั้งสิ้น อย่างไรก็ดี ความแตกต่างของงานวิจัยนี้จากของ Teh และคณะ คือ เราใช้สารตัวเติมปริมาณ 10 phr ซึ่งมากกว่า Teh และคณะถึง 5 เท่า นอกจากนี้ ยางที่ใช้ในการทดลองนี้ไม่ใช่ยางธรรมชาติเพียงอย่างเดียวแต่เป็นยางธรรมชาติที่ผสมกับยางโบรโมบิวไทล์

<u>สมบัติความแข็งแรง :</u>

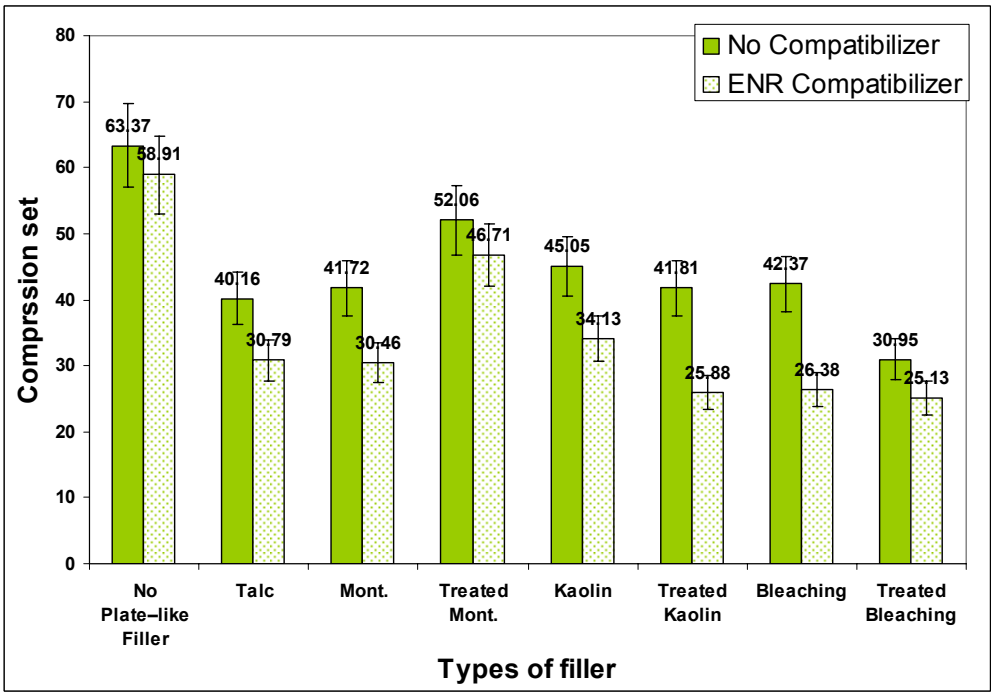
เมื่อพิจารณาผลของความแข็งแรงที่ผิว (Surface Hardness) ดังแสดงในรูปที่ 4.34 จะเห็นได้ว่า มีค่าเพิ่มขึ้น โดยยางคอมพอสิทที่ใช้สารตัวเติมเป็นแร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว (Treated Mont.) ทั้งที่ใช้และไม่ใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน ให้ค่าความแข็งแรงที่ผิวสูงกว่าสารตัวเติมชนิดอื่น โดยในกรณีของการใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน พบว่าความแข็งแรงที่ผิวสอดคล้องกับปริมาณของโครงสร้างร่างแหที่สูงอีกด้วย ในขณะที่ ค่าความแข็งแรงของยางคอมพอสิทที่ใช้สารตัวเติมแร่ดินเหนียวตัวอื่น มีค่าค่อนข้างที่จะใกล้เคียงกันมาก อาจกล่าวได้ว่า ถ้าต้องการให้ยางคอมพอสิทมีคุณสมบัติเด่นในด้านความแข็ง นอกจาก ใช้สารตัวเติมเป็นแร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว การเติมยาง ENR ก็สามารถช่วยได้เช่นกัน

รูปที่ 4.35 แสดงผลการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (Compression Set) ของยางคอมพอสิทแบบที่มียาง ENR เป็นตัวประสาน เมื่อเปรียบเทียบกับยางคอมพอสิทแบบปกติ จะเห็นได้ว่า เมื่อใช้สารตัวเติมแบบแผ่นจะทำให้ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่ใช้สารตัวเติมแบบแผ่น (No Plate–like Filler) อีกทั้งเมื่อมีการใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน จะมีค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอมพอสิทที่ไม่ได้ใช้ตัวประสานทุกตัวอย่าง แสดงถึงว่า การเติมยาง ENR ทำให้ ยางคอมพอสิทเกิดความเสถียรของพันธะยางกับสารตัวเติมเพิ่มมากขึ้น เป็นผลให้การยุบตัวเนื่องจากแรงอัดจึงลดลง (Lewis et al., 2003)

รูปที่ 4.34
ผลความแข็งแรงที่ผิวของยางคอมพอสิทแบบที่ใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน
เปรียบเทียบกับยางคอมพอสิทแบบปกติ



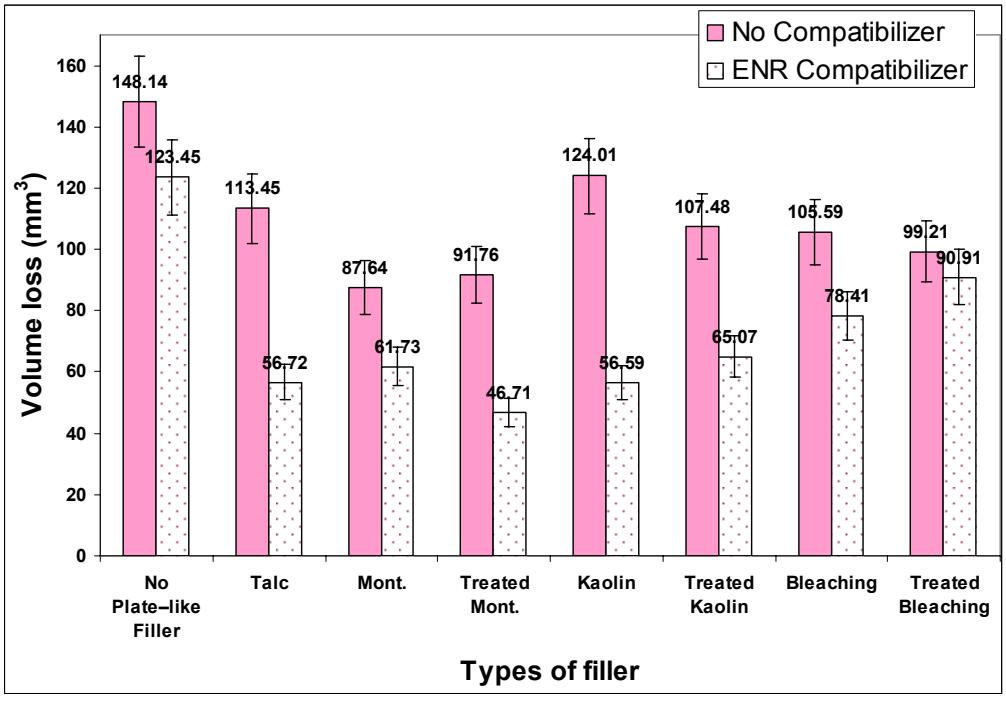
รูปที่ 4.35
ผลการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของยางคอมพอสิทแบบที่มียาง ENR เป็นตัวประสาน
เปรียบเทียบกับยางคอมพอสิทแบบปกติ



<u>สมบัติด้านอื่น ๆ :</u>

รูปที่ 4.36 แสดงผลความทนทานต่อการสึกหรอ (Abrasion Resistance) ของยางคอมพอสิทแบบที่ใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน เมื่อเปรียบเทียบกับยางคอมพอสิทแบบปกติ จะเห็นได้ว่า ยางคอมพอสิทที่มียาง ENR เป็นตัวประสาน จะมีค่าความทนทานต่อการสึกหรอที่ดีขึ้นทุกตัว โดยยางคอมพอสิทที่ใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน และใช้สารตัวเติมแร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว (Treated Mont.) มีค่าความทนทานต่อการสึกหรอดีที่สุด โดยการใช้ยาง ENR เป็นตัวประสานสามารถช่วยปรับปรุงการทนทานต่อการสึกหรอของคอมพอสิทของแร่ดินเหนียว kaolinite (Kaolin) ได้ดีที่สุด ตามด้วยคอมพอสิทของแป้งทัลคัม (Talc) แต่ส่งผลน้อยต่อคอมพอสิทของแร่ดินเหนียวขัดสี (Bleaching) ซึ่งสอดคล้องกับความหนาแน่นของโครงสร้างร่างแหเช่นเดียวกัน ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่าถ้าต้องการให้ยางคอมพอสิทมีคุณสมบัติเด่นในด้านความทนทานต่อการสึกหรอ นอกจากที่จะสามารถใช้สารตัวเติมแร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว การเติมยาง ENR ก็ช่วยได้เช่นกัน

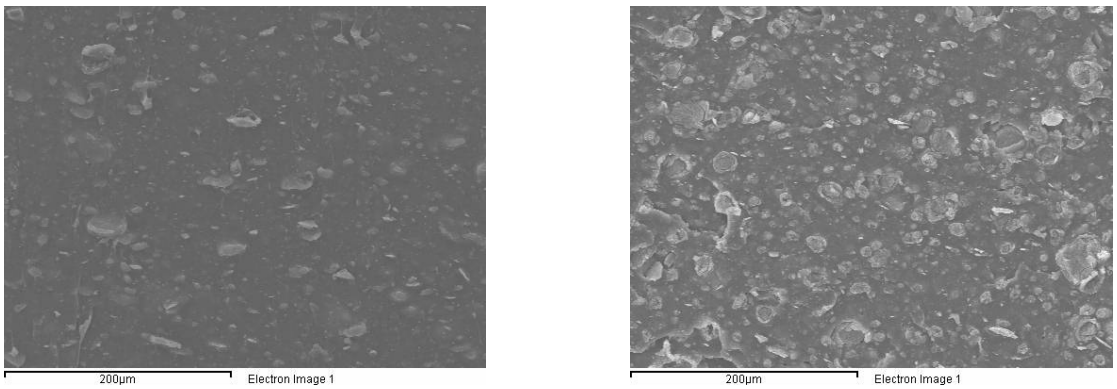
รูปที่ 4.36
ปริมาตรที่สึกหรอของยางคอมพอสิทแบบที่ใช้ยาง ENR เป็นตัวประสานเปรียบเทียบกับยางคอมพอสิทแบบปกติ ในการทดสอบการต้านการสึกหรอ



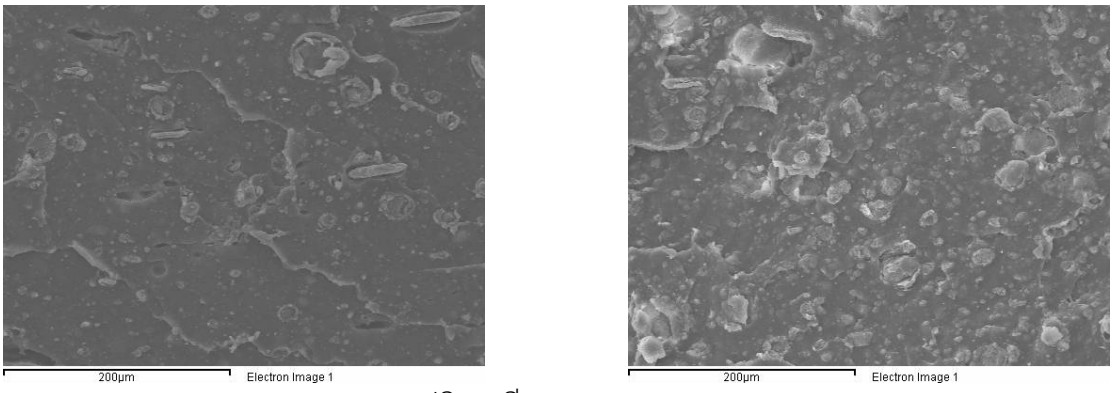
และจากการพิจารณาภาพถ่าย SEM ของยางคอมพอสิท เมื่อใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน เปรียบเทียบกับเมื่อไม่ใช่ยาง ENR เป็นตัวประสาน ดังแสดงในรูปที่ 4.37 พบว่าการใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน ช่วยให้เกิดการกระจายตัวของสารตัวเติมที่ดีขึ้น เกิดการรวมกลุ่มก้อนของสานตัวเติมน้อยลง ทำให้ มีผิวสัมผัสของสารตัวเติมกับยางที่ดีขึ้น มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับค่าโมดูลัสที่สูงขึ้นมากและความต้านทานการสึกหรอที่ดีขึ้น ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

รูปที่ 4.37
ภาพถ่ายพื้นที่ผิวหักของยางคอมพอสิทแบบปกติ เปรียบเทียบกับที่ใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน และมีสารตัวเติมเป็น (a) แป้งทัลคัม (b) แร่ดินเหนียว montmorillonite (c) แร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว (d) แร่ดินเหนียว kaolinite (e) แร่ดินเหนียว kaolinite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว โดยใช้ SEM

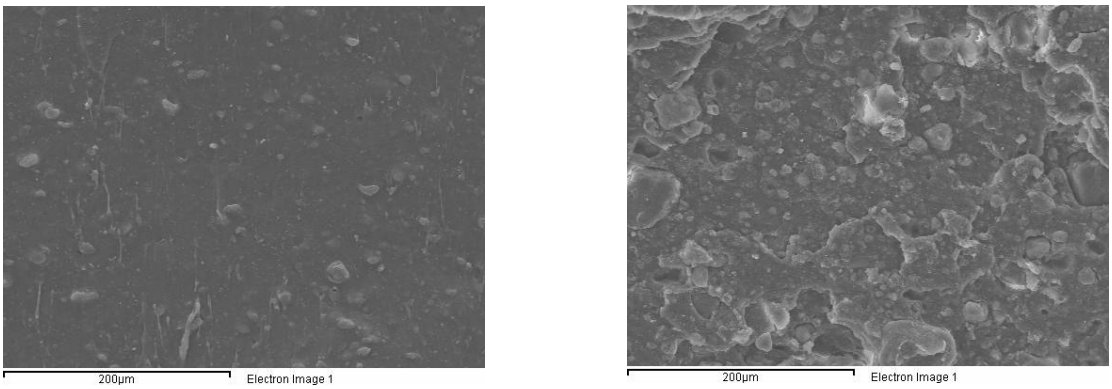
ไม่ใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน **ใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน**



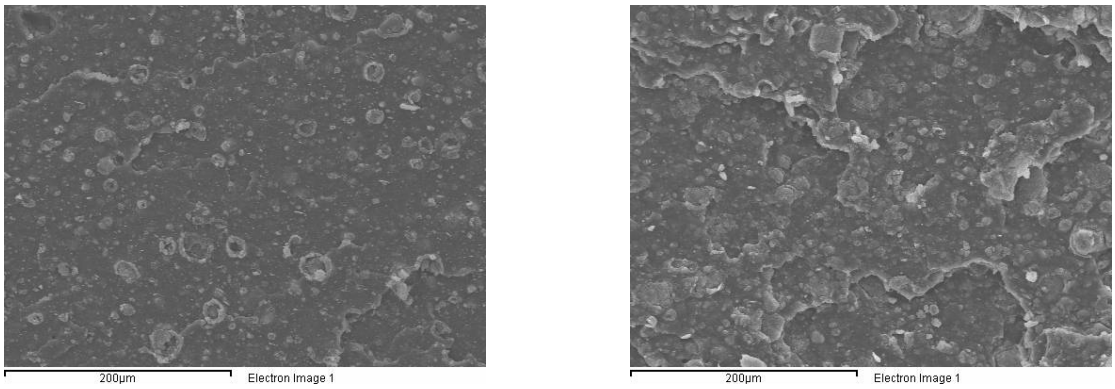
(a) แป้งทัลคัม



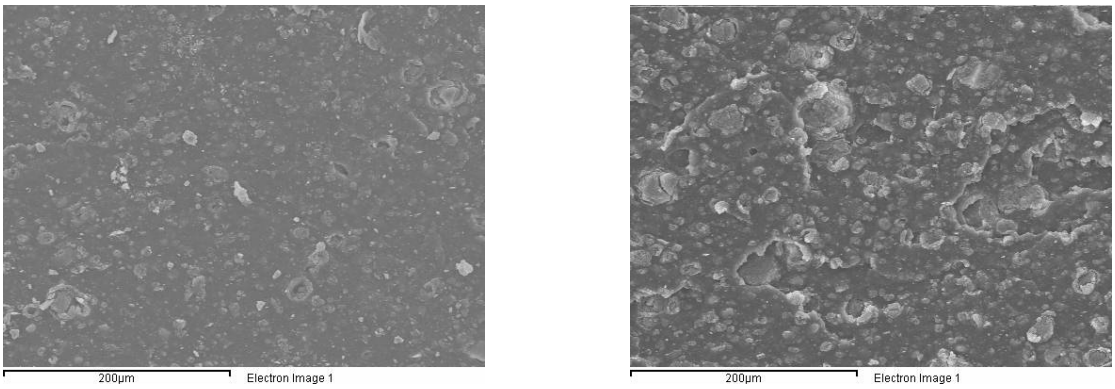
(b) แร่ดินเหนียว montmorillonite



(c) ออแกนโนเคลย์ของแร่ดินเหนียว montmorillonite



(d) แร่ดินเหนียว kaolinite



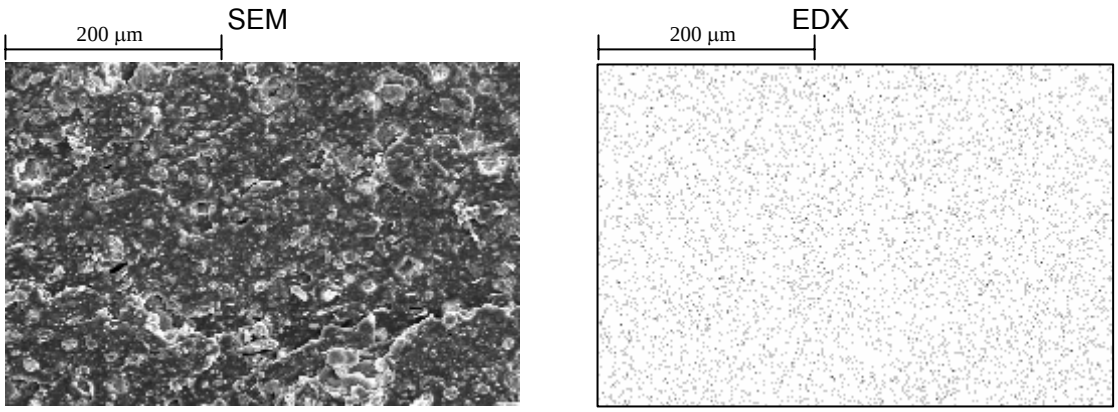
(e) ออแกนโนเคลย์ของแร่ดินเหนียว kaolinite

พิจารณาภาพถ่าย SEM ของยางคอมโพสิท ควบคู่กับเทคนิคจุลวิเคราะห์โดยทดสอบด้วยเครื่อง Energy Dispersive Spectroscopy X-Ray (EDX) ดังแสดงในรูปที่ 4.38 พบว่า เมื่อใช้ยาง ENR เป็นตัวประสานทำให้ โบรมีนที่อยู่ในยางโบรโมบิวไทล์ มีการกระจายที่ดีในทุกๆ ตัวอย่างของยางคอมพอสิท เช่นเดียวกับกรณีที่ไม่ใส่ยาง ENR

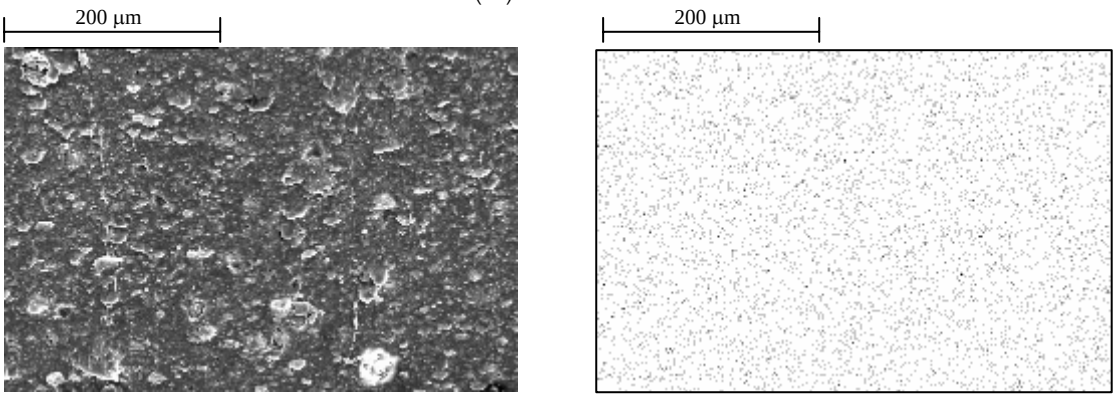
รูปที่ 4.38

ภาพถ่ายพื้นที่ผิวหักของยางคอมพอสิทแบบที่ใช้ยาง ENR เป็นตัวประสานและมีสารตัวเติมเป็น (a.) แป้งทัลคัม (b.)แร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว และ (c.) แร่ดินเหนียว kaolinite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว โดยใช้ SEM และการกระจายตัวของโบรมีน โดยใช้ EDX

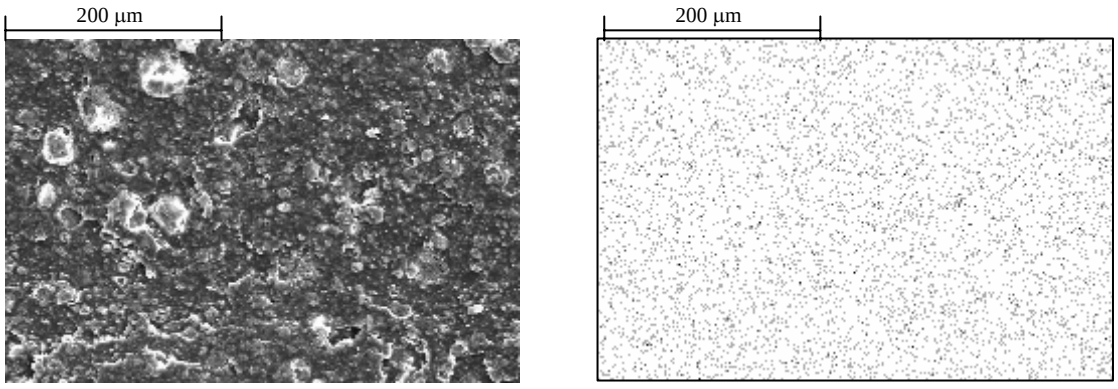
(b.)



(a.) แป้งทัลคัม



(b.) แร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว



(c.) แร่ดินเหนียว kaolinite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว

4.6 ผลของสารตัวเติมและตัวประสาน ENR ต่อสมบัติการซึมผ่านของก๊าซของยางคอมพอสิท

เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการทดสอบการซึมผ่านของก๊าซมีราคาสูงมาก ดังนั้น เพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย เมื่อได้รับผลของการทดสอบสมบัติในด้านต่างๆของยางคอมพอสิท ตามที่กล่าวไปข้างต้นแล้ว สรุปได้ว่า ยางคอมพอสิทที่สมควรจะนำไปทดสอบทดสอบการซึมผ่านของก๊าซ คือ ยางคอมพอสิทของยางโบรโมบิวไทล์อย่างเดียวซึ่งไม่ได้ผสมยางธรรมชาติและไม่ได้มีการใช้สารตัวเติมชนิดใดเลย เพื่อเป็นการเปรียบเทียบว่าเมื่อมีการผสมยางธรรมชาติและการใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ แล้วมีผลต่อการซึมผ่านของก๊าซอย่างไรบ้าง รวมทั้ง ยางคอมพอสิทแบบปกติที่ไม่มีการเติมสารตัวเติมแบบแผ่นชนิดใดเลย และที่ใช้สารตัวเติมเป็น

- แป้งทัลคัม เนื่องจากเป็นสารตัวเติมที่ใช้กันทั่วไป เนื่องจากมีสมบัติเด่นด้านการกักเก็บก๊าซได้ดี
- แร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว เนื่องจาก มีสมบัติที่ดีด้านความแข็งที่ผิว และความทนทานต่อการสึกหรอ
- แร่ดินเหนียว kaolinite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว เนื่องจาก มีสมบัติที่ดีด้านความทนทานต่อแรงดึงยืด

และยางคอมพอสิทแบบที่ใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน ที่ไม่มีการเติมสารตัวเติมแบบแผ่นชนิดใดเลย และที่ใช้สารตัวเติมเป็น

- แป้งทัลคัมคัล เนื่องจากเป็นสารตัวเติมที่ใช้กันทั่วไป เนื่องจากมีสมบัติเด่นด้านการกักเก็บก๊าซได้ดี
- แร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว เนื่องจาก มีสมบัติที่ดีด้านความแข็งที่ผิว และความทนทานต่อการสึกหรอ

ผลการวัดการซึมผ่านของก๊าซของยางคอมโพสิท ดังแสดงในรูปที่ 4.39 จะเห็นได้ว่า คอมพอสิทของยางยางโบรโมบิวไทล์อย่างเดียว (BIIR) มีค่าการซึมผ่านของก๊าซดีที่สุด เมื่อบดผสมร่วมกับยางธรรมชาติ (BIIR & NR) ทำให้ ค่าการซึมผ่านของก๊าซแย่ลง แต่ค่าการซึมผ่านของก๊าซดีขึ้นเมื่อบดผสมร่วมกับตัวประสานยาง ENR (BIIR & NR & ENR) แสดงว่า ยาง ENR สามารถช่วยลดการซึมผ่านของก๊าซได้

เมื่อใช้สารตัวเติมเป็นแป้งทัลคัมคัล (BIIR & NR – Talc) รวมถึงการใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน (BIIR & NR & ENR – Talc) พบว่า ทั้งสองสูตรนั้นมีค่าของการซึมผ่านของก๊าซต่ำใกล้เคียงกัน แสดงว่า สามารถกักก๊าซเก็บก๊าซได้ดี ซึ่งการใช้ยาง ENR ไม่มีผลต่อความสามารถในการกักเก็บก๊าซนั้น เนื่องมาจาก ยาง ENR มีความมีขั้วสูงกว่าแป้งทัลคัม จึงไม่ส่งผลทางบวกต่อการกักเก็บก๊าซ

ในขณะที่ ยางคอมพอสิทที่เหลือ ได้แก่ ยางคอมพอสิทแบบปกติที่มีสารตัวเติมเป็นแร่ดินเหนียว montmorillonite และแร่ดินเหนียว kaolinite ที่ปรับสภาพผิวแล้วนั้น (BIIR & NR – Treated Mont. และ Kaolin.) สามารถกักเก็บก๊าซได้ต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเติมสองชนิดแรก นอกจากนี้ยังพบว่า การบดผสมร่วมกับยาง ENR สามารถช่วยลดการซึมผ่านของก๊าซของยางคอมพอสิทที่มีสารตัวเติมเป็นแร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว (BIIR & NR & ENR – Treated Mont.) ได้เล็กน้อย เนื่องจากยาง ENR ช่วยให้เกิดการกระจายตัวและผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวและยางที่ดีขึ้น

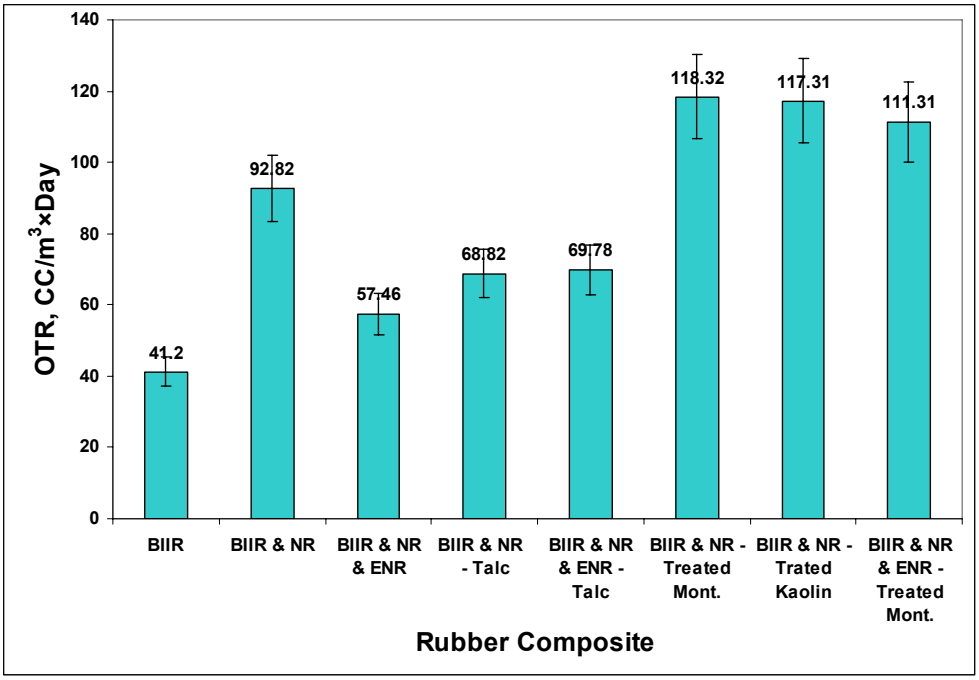
ถึงแม้ว่า แป้งทัลคัมคัล (Talc) จะมีความสามารถในการกักเก็บก๊าซได้ดี แต่ทว่า ในด้านความแข็งแรง (Hardness) และการทนทานต่อการขัดสี (Abrasion) ไม่ดีเท่ากับแร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว และความต้านทานต่อการดึงยืด (Tensile) ไม่ดีเท่ากับแร่ดินเหนียว kaolinite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว เช่นกัน

4.7 ราคาต่อหน่วยของสูตรยางต่าง ๆที่ศึกษาในงานวิจัยนี้

เมื่อทำการเปรียบเทียบราคาของสูตรยางต่างๆต่อ 1 กิโลกรัม (โดยที่ไม่ได้คิดราคาสารเคมีตัวอื่นๆ ที่ใช้เหมือนกัน) ดังแสดงในตารางที่ 4.6 พบว่า การบดผสมยางโบรโมบิวไทล์กับยางธรรมชาติ รวมถึงการใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ ทำให้ต้นทุนการผลิตลดลง ส่วนเมื่อบดผสมร่วมกับตัวประสานยาง ENR ก็จะมีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นประมาณไม่ถึง 1 บาทต่อ 1 กิโลกรัม ซึ่งรายละเอียดการคำนวณราคาของสูตรยางต่างๆ แสดงไว้ใน ภาคผนวก ง.

รูปที่ 4.39

ผลการซึมผ่านของก๊าซของยางคอมพอสิท



ตารางที่ 4.6

ราคาต่อหน่วยของสูตรยางต่างๆ ใน 1 กิโลกรัม

สูตรยาง (ไม่รวมค่าสารเคมีต่าง ๆที่ใช้เหมือนกัน)	**ราคา ต่อ 1 กิโลกรัม**
BIIR	185
BIIR/NR	153.75
BIIR/NR – Talcum	140.27
– Montmorillonite Clay	143.27
– Kaolinite Clay	141
– Bleaching Clay	140.73
BIIR/NR/ENR	153
BIIR/NR/ENR – Talcum	140.83
– Montmorillonite Clay	143.58
– Kaolinite Clay	141.50
– Bleaching Clay	141.25

4.8 การประยุกต์สูตรยางที่ได้กับผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ

ในงานวิจัยนี้ มีการปรับปรุงสูตรของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางโบรโมบิวไทล์โดยใช้สารตัวเติมชนิดที่แตกต่างกัน 4 ชนิด รวมทั้งมีการปรับสภาพผิวของสารตัวเติมและการใช้ยาง ENR เป็นตัวประสานอีกด้วย จากการทดลอง พบว่า สมบัติของยางคอมพอสิทแต่ละสูตรมีลักษณะเด่นที่แตกต่างกัน ดังนั้น ผู้วิจัยจึงลองทำการประยุกต์สมบัติของยางคอมพอสิทที่ได้กับผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง 3 ชนิด ดังนี้

➢ <u>ยางในลูกฟุตบอล</u>

เนื่องจากยางในของลูกฟุตบอลอยู่บริเวณภายในของลูกฟุตบอล โดยมียางบริเวณด้านนอกห่อหุ้มไว้อีกชั้นหนึ่ง สมบัติที่ต้องการ คือ การกักเก็บก๊าซให้อยู่ภายในลูกฟุตบอลได้เป็นเวลานาน อีกทั้งยังต้องการความยืดหยุ่นที่สูง เพื่อทนต่อแรงอัดเวลาได้รับแรงขณะเล่น ดังนั้น สูตรยางที่แนะนำ คือ ยางคอมพอสิทที่มีสารตัวเติมเป็นแป้งทัลคัม เพราะว่ามีสมบัติในการต้านทานการซึมผ่านของก๊าซได้ดีเพียงแค่ 57.46 $CC/m^3 \cdot Day$ รวมทั้งยังมีความทนทานต่อแรงดึงได้ในระดับหนึ่ง เท่ากับ 9.13 N/mm^2 อีกด้วย นอกจากนี้การเติมตัวประสานยาง ENR บางส่วนก็สารมารถลดการซึมผ่านของก๊าซได้เช่นกัน แต่ก็มีข้อเสียในเรื่องของราคาที่จะต้องสูงขึ้นและความยืดหยุ่นอาจจะลดลง

➢ <u>ยางในรถยนต์</u>

ยางของรถยนต์ก็มีลักษณะคล้ายกับยางในของลูกฟุตบอล แต่ต้องสมบัติของยางรถยนต์นั้น ต้องมีความทนทานต่อการรับแรงที่มากกว่า ดังนั้น สูตรยางที่แนะนำ คือ ยางคอมพอสิทที่มีสารตัวเติมเป็นแป้งทัลคัม เพราะว่ามีสมบัติในการต้านทานการซึมผ่านของก๊าซได้ดี (57.46 $CC/m^3 \cdot Day$) ร่วมกับแร่ดินเหนียว kaolinite ทั้งก่อนและหลังการปรับสภาพผิวแล้ว เพราะว่ามีความทนทานต่อแรงดึงที่ดีที่สุด เท่ากับ 10.12 และ 10.41 N/mm^2 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเติมทั้ง 4 ชนิด

➢ <u>ดอกยาง</u>

เนื่องจากดอกยางของยางรถยนต์เป็นส่วนที่อยู่นอกสุด ทำให้เกิดการเสียดสีกับถนนได้มาก สมบัติที่ต้องการเป็นอย่างยิ่ง คือ ความทนทานต่อการสึกหรอ ดังนั้น สูตรยางที่แนะนำ คือ ยางคอมพอสิทที่มีสารตัวเติมเป็นแร่ดินเหนียว montmorillonite เพราะว่ามีสมบัติความทนทานต่อการสึกหรอได้ดี กล่าวคือมีปริมาตรที่หายไประหว่างการทดสอบเพียง 91.76 mm^3 อีกทั้งการใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน ก็ช่วยให้สมบัติด้านนี้ดียิ่งขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งทำให้ปริมาตรที่หายไประหว่างการทดสอบลดลงเหลือเพียง 46.74 mm^3 เท่านั้น

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาวิจัยและข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

5.1 สรุปผลการศึกษาวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของชนิดสารตัวเติมต่อสมบัติต่างๆของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางโบรโมบิวไทล์ โดยมีสารตัวเติมเป็นแป้งทัลคัมและแร่ดินเหนียว (Clay) 3 ชนิด ได้แก่ แร่ดินเหนียว montmorillonite, แร่ดินเหนียว kaolinite และแร่ดินเหนียวขัดสี (Bleaching clay) และศึกษาการปรับสภาพผิวของสารตัวเติมทั้งสาม รวมถึงการใช้ตัวประสาน (Compatibilizer) คือ ยาง Epoxidised Natural Rubber (ENR) สมบัติต่างๆ ที่ศึกษา ได้แก่ ความต้านทานแรงดึง โมดูลัส ความสามารถในการดึงยืด ความแข็งที่ผิว การยุบตัวเนื่องจากแรงอัด ความทนทานต่อการสึกหรอ และการลดการซึมผ่านของก๊าซ รวมถึงการกระจายตัวของยางและสารตัวเติมในยางคอมพอสิต ผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. เมื่อทำการปรับสภาพผิวของสารตัวเติม พบว่า แร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ปรับสภาพผิวด้วย Octadecylamine (C_{18}) ได้ผลthermogramของ TGA และ กราฟ XRD เช่นเดียวกับที่เคยมีผู้ทำการทดลองไว้แล้ว คือ Arroyo และคณะ ในปี 2003 แต่ในกรณีของแร่ดินเหนียว kaolinite และแร่ดินเหนียวขัดสี ที่ปรับสภาพผิวด้วย Silane–69 นั้น ผลที่ได้แตกต่างออกไปจากของคุณสุทธินี เนตรพุกกณะ ในปี 2548 คือ thermogram ของแร่ดินเหนียว kaolinite และแร่ดินเหนียวขัดสีแทบจะไม่แตกต่างกัน อาจเนื่องจากหมู่ hydroxyl บนผิวของแร่ดินเหนียวที่สามารถเกิดปฏิกิริยา silylation ได้นั้น มีอยู่ในปริมาณน้อย

2. จากการทดสอบความเข้ากันได้ของยางธรรมชาติและยางโบรโมบิวไทล์ พบว่า การเข้ากันได้ของยางธรรมชาติกับยางโบรโมบิวไทล์มีการเข้ากันได้ดีโดยมีค่า T_g เพียงค่าเดียวและมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันซึ่งการผสมกันที่ได้อยู่ในระดับไมโครเมตร แต่ยังไม่ถึงระดับโมเลกุลตามความสัมพันธ์ของ Fox

3. จากการศึกษาผลของชนิดสารตัวเติมแบบแผ่น พบว่า คอมพอสิทที่ไม่มีการใช้สารตัวเติมแบบแผ่นชนิดใดเลยนั้น จะมีสมบัติเด่นในด้านความต้านทานแรงดึง, ความสามารถในการดึงยืดและโมดูลัสที่ 100% ในขณะที่โมดูลัสที่ 300% มีค่าต่ำ หลังจากที่ได้มีการใช้สารตัวเติมทั้ง 4 ชนิด พบว่า สารตัวเติมแร่ดินเหนียว montmorillonite และแร่ดินเหนียว kaolinite ทำให้

สมบัติด้านความทนทานแรงดึงดีขึ้น นอกจากนี้ การใช้สารตัวเติมทั้ง 4 ชนิด จะทำให้ค่าโมดูลัสที่ 300%, สมบัติด้านความแข็งที่ผิวและความทนทานต่อการสึกหรอดีขึ้นทั้งหมด

4. จากการศึกษาผลของการปรับสภาพผิวของสารตัวเติมแร่ดินเหนียวทั้ง 3 ชนิด พบว่า ยางผสมที่ใช้สารตัวเติมเป็นแร่ดินเหนียว kaolinite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว มีสมบัติด้านความต้านทานแรงดึง โมดูลัสและความสามารถในการดึงยืดที่ดีกว่าสารตัวเติมชนิดอื่น สำหรับในส่วนของแร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว มีสมบัติด้านโมดูลัส ความแข็งที่ผิว และความทนทานต่อการสึกหรอ ที่ดีกว่าสารตัวเติมชนิดอื่น ซึ่งส่วนใหญ่มีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับสารตัวเติมทั้งสองก่อนการปรับสภาพผิว ในขณะที่การปรับสภาพผิวของแร่ดินเหนียวขัดสี ทำให้สมบัติในทุกๆ ด้านมีค่าลดลงทั้งหมด

5. จากการศึกษาผลของยาง ENR ที่เป็นตัวประสาน พบว่า ยาง ENR ทำให้ยางมีสมบัติเปลี่ยนจากแข็งยืดหยุ่นไปเป็นแข็งเปราะ คือ ทำให้ความแข็งแกร่ง (Stiffness) ของยางมีค่าเพิ่มขึ้น แต่จะแตกหักได้ง่ายขึ้นด้วย รวมทั้งช่วยให้สมบัติด้านความแข็งแรงที่ผิว และความทนทานต่อการสึกหรอดีขึ้นด้วย

6. ด้านการศึกษาสมบัติการลดการซึมผ่านของก๊าซ ดังที่ทราบกันโดยทั่วไปว่ายางโบรโมบิวไทล์มีความสามารถในการลดการซึมผ่านของก๊าซได้ดี แต่เนื่องด้วยราคาที่แพงของยางโบรโมบิวไทล์ วงการอุตสาหกรรมยางทั่วไปจึงนิยมใช้ยางธรรมชาติผสมกับยางโบรโมบิวไทล์เพื่อลดต้นทุนการผลิต งานวิจัยนี้พบว่าการผสมยางธรรมชาติเข้าไป 25 % นั้นส่งผลให้การซึมผ่านของก๊าซเพิ่มขึ้นถึง 125.3% และพบว่าวิธีการที่ดีในการลดการซึมผ่านของก๊าซมี 2 แนวทางคือ การใช้ยาง ENR เป็นตัวประสานและการใช้สารตัวเติมเป็นแป้งทัลคัม โดยการใช้ยาง ENR ในปริมาณ 10 phr สามารถลดการซึมผ่านของก๊าซลงได้ 38.1% ในขณะที่การใช้สารตัวเติมเป็นแป้งทัลคัมในปริมาณ 10 phr สามารถลดการซึมผ่านของก๊าซลงได้ 30.4% อย่างไรก็ดีเมื่อใช้ยาง ENR ร่วมกับแป้งทัลคัมกลับไม่ช่วยลดการซึมผ่านของก๊าซได้ดีกว่าการใช้แป้งทัลคัมเพียงอย่างเดียวเลย ส่วนสารตัวเติมแบบแผ่นชนิดอื่นทั้งก่อนและหลังการปรับสภาพผิวแล้วก็ตาม แม้ว่าจะช่วยให้สมบัติอื่นมีความโดดเด่นมากขึ้นแต่กลับไม่สามารถช่วยลดการซึมผ่านของแก๊ซในยางผสม NR/BIIR ได้

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

1. เนื่องจากสูตรเดิมที่ผู้วิจัยได้รับมาจากบริษัทผู้ผลิตยางนั้น ไม่มีกำมะถันในสูตร แต่ทว่าเมื่อนำไปทำการขึ้นรูป ปรากฏว่า ยางไม่สุก แม้จะใช้อุณหภูมิที่สูงและเวลาที่นานกว่าที่คำนวณได้แล้วก็ตาม ผู้วิจัยจึงได้ทำการปรับปรุงสูตรโดยการเติมกำมะถันปริมาณ 1 phr บดร่วมไปด้วย ซึ่งในการทดลองครั้งต่อ อาจจะลองปรับเปลี่ยนปริมาณของการเติมกำมะถันดูว่ามีผลต่อสมบัติต่างๆ หรือไม่

2. ปริมาณของสารตัวเติมและตัวประสาน (Compatibilizer) คือ ยาง ENR อาจจะลองทำการปรับเปลี่ยนไปใช้ในปริมาณที่แตกต่างกัน เพื่อดูผลของปริมาณของสารตัวเติมและตัวประสานที่ใส่ด้วยเช่นกัน

บรรณานุกรม

หนังสือ

พงษ์ธร แซ่อุย. (2547). *ยาง: ชนิด สมบัติ และการใช้งาน*. กรุงเทพมหานคร: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.

พงษ์ธร แซ่อุย. (2548). *สารเคมียาง*. กรุงเทพมหานคร: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.

เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังสี. (2543). *การผลิตยางธรรมชาติ*. พิมพ์ครั้งที่ 2 แก้ไขเพิ่มเติม. ปัตตานี: สำนักวิทยบริการ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.

เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์. (2537). *เทคโนโลยีของยาง*. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วราภรณ์ ขจรไชยกูล. (2541). *การออกสูตรยางและกระบวนการผลิต*. กรุงเทพมหานคร: ส่วนอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร.

อิทธิพล แจ้งชัด. (2537). *วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง*. กรุงเทพมหานคร: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

วิทยานิพนธ์

สุทธินี เนตรพุกกณะ. (2548). *การปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติด้วยเทคโนโลยีนาโนคอมพอสิท*. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี.

BOOK

Brady, N.C., and Weil, R.R. (1996). *The nature and properties of soils.*11th edition, New Jersey: Prentice-Hall International, Inc.

Grim, R.E. (1968). *Clay Mineralogy*. 2nd edition. New York: Mc Graw – Hill.

Okada, A., Kawasumi, M., Usuki, A., Kojima, Y., Kurauchi, T., & Kamigaito, O. (1990). *Polymer – based molecular composites.* In: Schaefer DW, Mark JE, editors: Materials Research Society.

Peter, A Ciullo. (1996). *Industrial Minerals And Their Uses: A handbook and formulary*. New Jerseys: Noyes Publications.

ARTICLES

Arroyo, M., Lòpez – Manchado, M.A., & Herrero, B. (2003). Organo – montmorillonite as substitute of carbon black in natural rubber compounds. *Polymer*, 44, 2447 – 2453.

Dutta, Nara K. & Tripathy, D.K. (1993). Miscibility Studies in Blends of Bromobutyl and Natural Rubber. Journal of Elastomers and Plastics, 25, 158 – 179.

Gelling, I.R. (1985). Epoxidized natural rubber in PVC–rubber. *NR technology*, 16, 1 – 2.

Glasse, M.D., Idris, R., Latham, R.J., Linford, R.G. & Schlindwein, W.S. (2002). Polymer electrolytes based on modified natural rubber. *Solid State Ionics,* 147, 289 – 294.

Ismail, H., & Leong, H.C. (2001). Curing characteristics and mechanical properties of natural rubber/chloroprene rubber and epoxidized natural rubber/chloroprene rubber blends. *Polymer Testing*, 20, 509 – 516.

Johnson, T. & Thomas, Sabu. (1999). Effect of epoxidation of natural rubber on the pervaporatin separation of acetone – chlorinated hydrocarbon mixtures. *Journal of Membrane Science,* 155, 133 – 143.

Johnson, T. & Thomas, Sabu. (2000). Effect of epoxidation on the transport behavior and mechanical properties of natural rubber. *Polymer,* 41, 7511 – 7522.

Klinklai, Warunee, Kawahara, Seiichi, Marwanta, Edy, Mizumo, Tomonobu, Isono, Yoshinobu, & Ohna, Hiroyuki. (2006) Ionic conductivity of highly deproteinized natural rubber having various amount of epoxy group mixed with lithium salt. *Solid State Ionics,* 177, 3251 – 3257.

Klinklai, Warunee, Kawahara, Seiichi, Mizumo, Tomonobu, Yoshizawa, Masahiro, Sakdapipanich, Jitladda Tangpakdee, Isono, Yoshinobu, & Ohna, Hiroyuki. (2003). Depolymerization and ionic conductivity of enzymatically deproteinized natural rubber having epoxy group. *European Polymer Journal*, 39, 1707 – 1712.

Kojima, Y., Usuki, A., Kawasumi, M., Okada, A., Kurauchi, T., & Kamigaito, O. (1993). Synthesis of nylon 6-clay hybrid by montmorillonite intercalated with **ε**-caprolactam. *Journal of Polymer Science, Part A: Polymer Chemistry*, 31, 983 – 986.

Lan, T., Kaviratna, P. D., & Pinnavaia, T. J. (1995). Mechanism of clay tactoid exfoliation in epoxy-clay nanocomposites. Chemistry of Materials, 7, 2144 – 2150.

Lewis, C., Buanpa, R., & Kiatkamjornwong, S. (2003). Effect of rubber ratio, carbon black level, and accelerator level on natural rubber/bromobutyl rubber blend properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 90, 3059 – 3068.

Madejová, J., & Komadel, P. (2001). Baseline studies of the clay minerals society source clays: Infrared methods. *Clays and Clay Minerals,* 49, 410.

Magaraphan, R., Thaijaroen, W., & Lim-Ochakun, R. (2003). Structure and properties of natural rubber and modified montmorillonite nanocomposites. *Polymer Chem Tech,* 76, 406 – 418.

Mousa, A. & Karger–Kocsis, J. (2001). Rheological and thermodynamical behavior of styrene/butadiene rubber–organoclay nanocomposites. *Macromolecular Materials and Engineering,* 286, 260 – 266.

Poh, B.T., Ismail, H., Quah, E.H., & Chin, P.L. (2001). Cure and mechanical properties of filled SMRL/ENR 25 and SMRL/SBR blends. *Journal of Applied Polymer Science,* 81, 47 – 52.

Ramesan, M.T., Mathew, G., Kuriakose, B., & Alex, R. (2001). Role of dichlorocarbene modified styrene butadiene rubber in compatibilization of styrene butadiene rubber and chloroprene rubber blends. *European Polymer Journal,* 37, 719 – 728.

Roland, C.M. (1987). Entropically driven miscibility in a blend of high molecular weight polymer. *Macromolecules,* 20, 2557 – 2563.

Sadequl, A.M., Ishiaku, U.S., Ismail, H., & Poh, B.T. (1997). The effect of accelerator/sulphur ratio on the scorch time of epoxidized natural rubber. *European Polymer Journal,* 34, 51 – 57.

Sae-oui, P., Rakdee, C. & Thanmathorn, P. (2002). Use of Rice Husk Ash as Filler in Natural Rubber Vulcanizates: In Comparison with Other Commercial Fillers. *Journal of Applied Polymer Sciences,* 83, 2485 – 2493.

Saito, T., Klinklai, W., & Kawahara, S. (2007). Characterization of epoxidized natural rubber by 2D NMR spectroscopy. *Polymer,* 48, 750 – 757.

Shvarzmana, A., Kovlera, K., Graderb, G.S., & Shterb, G.E. (2003) The effect of dehydroxylation/amorphization degree on pozzolanic activity of kaolinite. *Cement and Concrete Research,* 33, 405 – 416.

Teh, P.L., Ishak, Z.A. Mohd, Hashim, A.S., Karger – Kocsis, J., & Ishiaku, U.S. (2004). Effects of epoxidized natural rubber as a compatibilizer in melt compounded natural rubber–organoclay nanocomposite. *European Polymer Journal*, 40, 2513 – 2521.

THESIS

Kornmann, X. (1999). *Synthesis and Characterization of Thermoset-Clay Nanocomposites.* Dissertation, Luleå University of Technology, Sweden, Division of Polymer Engineering.

Rattana Tantatherdtam. (2003) *Reinforcement of Natural Rubber Latex by Nanosize Montmorillonite Clay.* Thesis in Doctaral in Philosophy, The Pennsylvania State University.

OTHER MATERIALS

http://www.uiowa.edu/~c004020/exp4/exp.pdf

http://pubs.usgs.gov/openfile/of01-041/index.htm

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลพื้นฐานของยางชนิดต่าง ๆ

ก-1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR)

ตารางที่ ก.1

ผลการทดสอบมาตรฐานยางแท่ง STR 5L

Properties	Test Results	Uncertainty (U_c)	Test Method SMR Bulletin NO.7-1992
Dirt Content (% by wt.)	0.004	-	Part B.4
Volatile Matter (% by wt.)	0.30	-	Part B.5
Nitrogen Content (%by wt.)	0.42	-	Part B.7
Initial Plasticity (P_O)	33.5	-	Part B.8
Plasticity Retention Index (PRI)	77.6	-	Part B.8
Viscosity ML (1+4) $100^{O}C$	67.0	-	Part B.9

ก-2 ยางโบรโมบิวไทล์ (Bromobutyl Rubber, BIIR)

Typical Chemical Properties

Raw Polymer Viscosity (ML 1+8 at 125°C)	34±10
Raw Polymer Specific Gravity	0.93
Volatile Matter, % Weight	1 max

Typical Physical Properties

Tensile, psi	1,700
Elongation, %	400
300% Modulus, psi	1,200

ก-3 ยางอีพอกซีไดส์ (Epoxidised Natural Rubber, ENR)

ตารางที่ ก.2

Specification of ENR

Properties	MEAN TEST RESULT OF LOT. NO.
	R037A
	BALE 1
%Epoxidation*	52
%Ash Content (by weight)	0.29
Mooney Viscosity ML(1'+4') 100°C	70
Range (Max – Min)	-

*Fourier – Transform Nuclear Magnetic Resonance Spectrometer Test Method

ภาคผนวก ข

สูตรยางในลูกฟุตบอล

Ball Bladder

Ingredient	Parts by weight
Polysar Bromobutyl X2	75
Masticated natural rubber	25
Pentalyn K (tackifying resin from Hercules)	2
Vulkasil S	40
Talc (e.g. Mistron vapor)	80
Paraffinic oil (Sunpar 115)	7.5
Paraffin wax	2.5
Poly ethylene glycol	3.5
Zinc oxide	3
Stearic acid	2
Vulkacit DM	2
Vulkacit thiuram	0.8
Total	243.3

เนื่องจากชื่อสารเคมีที่ในสูตรที่รับจาก บริษัท มัลติเคมิ-คอลเอ็นจิเนียร์ริง จำกัด ส่วนใหญ่จะเป็นชื่อทางการค้า ทางผู้วิจัยได้ทำการสอบทางบริษัทจนทราบว่า ชื่อเหล่านั้นเป็นสารเคมีชนิดใด ดังต่อไปนี้

Pentalyn K	คือ	ฟีนอลิก เรซิน
Vulkasil S	คือ	ซิลิกา
Vulkacit DM	คือ	Dibenzothaizole Disulphide (MBTS)
Vulkacit thiuram	คือ	Tetramethyl Thiuramdisulphide (TMTD)

ภาคผนวก ค

การคำนวณหาปริมาณของยางและสารเคมีต่าง ๆ ที่ใช้กับยาง

ตารางที่ ค.1

ปริมาณยางและสารเคมีต่างๆ สำหรับสูตร A ในบทที่ 3

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (phr)	น้ำหนัก (กรัม)
ยางธรรมชาติ	25	71.75
ยางโบรโมบิวไทล์	75	215.25
สารตัวเติม	10	28.7
กรดสเตียริก	3	8.61
ซิงค์ออกไซด์	2	5.74
ซิลิกา	40	114.8
ฟีนอลิก เรซิน	2	5.74
น้ำมันสนจีน	7.5	21.53
พาราฟินแวกส์	2.5	7.18
ไดเอธิลีน ไกลคอล	3.5	10.05
MBTS	2	5.74
TMTD	0.8	2.3
ซัลเฟอร์	1	2.87
	174.3	≈ 500.00
	2.87	

- รวมค่า phr. ทั้งหมด

  25 + 75 + 10 + 3 + 2 + 40 + 2 + 7.5 + 2.5 + 3.5 + 2 + 0.8 + 1 = 174.3 phr

- กำหนดปริมาณยางคอมพอสิท สำหรับงานวิจัยนี้ที่ใช้ในแบทช์เล็กด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง ซึ่งสามารถใส่ยาง และสารเคมีต่างๆ รวมแล้วได้ 500 กรัม จะได้สัดส่วนในการคำนวณเป็นจำนวนกรัม ดังนี้

$$\frac{\text{Total weight (g)}}{\text{Total (phr)}} = \frac{500\ \text{g}}{174.3\ \text{phr}} = 2.87\ \text{g/phr}$$

- นำสัดส่วนดังกล่าวคูณปริมาณ phr. ของสารแต่ละตัว ได้ปริมาณยาง และสารเคมีเป็นจำนวนกรัม ดังแสดงในตารางที่ ค.1 และสูตรที่มียาง ENR เป็นตัวประสาน (สูตร B ในบทที่ 3) ดังแสดงในตารางที่ ค.2

ตารางที่ ค.2

ปริมาณยางและสารเคมีต่างๆ สำหรับสูตร B ในบทที่ 3

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (phr)	น้ำหนัก (กรัม)
ยางธรรมชาติ	25	67.75
ยางโบรโมบิวไทล์	75	203.25
ยาง ENR	10	27.1
สารตัวเติม	10	27.1
กรดสเตียริก	3	8.13
ซิงค์ออกไซด์	2	5.42
ซิลิกา	40	108.4
ฟินอลิก เรซิน	2	5.42
น้ำมันสนจีน	7.5	20.33
พาราฟินแวกส์	2.5	6.78
ไดเอธิลีน ไกลคอล	3.5	9.49
MBTS	2	5.42
TMTD	0.8	2.17
ซัลเฟอร์	1	2.71
	184.3	≈ 500.00
	2.71	

ภาคผนวก ง

ตัวอย่างการคำนวณราคาต่อหน่วยของสูตรยางต่าง ๆ

ตารางที่ ง.1

ราคาต่อหน่วยของสูตรยางต่างๆ ใน 1 กิโลกรัม

สูตรยาง (ไม่รวมค่าสารเคมีต่าง ๆที่ใช้เหมือนกัน)	**ราคา ต่อ 1 กิโลกรัม**
BIIR	185
BIIR/NR	153.75
BIIR/NR – Talcum	140.27
– Montmorillonite Clay	143.27
– Kaolinite Clay	141
– Bleaching Clay	140.73
BIIR/NR/ENR	153
BIIR/NR/ENR – Talcum	140.83
– Montmorillonite Clay	143.58
– Kaolinite Clay	141.50
– Bleaching Clay	141.25

- ราคาของยางและสารตัวเติมแต่ละชนิด ดังนี้

ยางโบรโมบิวไทล์	ราคากิโลกรัมละ	185	บาท
ยางธรรมชาติ	ราคากิโลกรัมละ	60	บาท
ยางอีพอกซีไดส์	ราคากิโลกรัมละ	147	บาท
แป้งทัลคัม	ราคากิโลกรัมละ	7	บาท
แร่ดินเหนียว Montmorillonite	ราคากิโลกรัมละ	40	บาท
แร่ดินเหนียว Kaolinite	ราคากิโลกรัมละ	15	บาท
แร่ดินเหนียวขัดสี	ราคากิโลกรัมละ	12	บาท

- คิดปริมาณยางคอมพอสิทต่อ 1 กิโลกรัม โดยที่ไม่ได้คิดราคาสารเคมีตัวอื่นๆ ที่ใช้เหมือนกัน นำปริมาณเป็น phr (โดยถือว่าเป็นกรัม) ก่อนคูณด้วยราคาของยางและสารตัวเติมที่ใช้ โดยที่เทียบเป็นราคาต่อกรัมแทน เช่น สูตรของยางผสมที่มีสารตัวเติมเป็นแป้งทัลคัม

ยาง/สารตัวเติม	phr		ราคา		รวม
Bromobutyl Rubber	75	x	0.185	=	13.86
Natural Rubber	25	x	0.06	=	1.50
Talcum	10	x	0.007	=	0.07
Total	**110**				**15.43**

- เทียบบัญญัติไตรยางค์จากปริมาณรวมที่เป็นกรัมให้เป็นกิโลกรัม จะได้ราคาต่อหน่วยเป็นกิโลกรัม

เปลี่ยนปริมาณ	110	กรัม	ไปเป็น	=	1,000	กรัม
จากราคา	15.43	บาท	จะได้	=	(1,000 x15.43)/110	กรัม
				=	**140.27**	บาท/กิโลกรัม

ภาคผนวก จ

ตัวอย่างข้อมูลดิบของการทดสอบสมบัติของยางคอมพอสิท

จ-1 ยางคอมพอสิทแบบปกติ (สูตร A ในบทที่ 3)

ตารางที่ จ.1

สมบัติการทนทานต่อแรงดึงและค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของยางคอมพอสิทแบบปกติ

Types of filler	Tensile Strength (N/mm^2)	Elongation at break (%)
No Plate–Like Filler	9.13	858.06
Talcum	9.02	779.89
Montmorillonite Clay	9.69	764.52
Treated Montmorillonite Clay	8.95	667.99
Kaolinite Clay	10.12	779.76
Treated Kaolinite Clay	10.41	816.00
Bleaching Clay	8.99	686.59
Treated Bleaching Clay	8.46	764.83

ตารางที่ จ.2

โมดูลัสที่ความเครียด (Strain) เท่ากับ 100% และ 300% ของยางคอมพอสิทแบบปกติ

Types of filler	Modulus @ 100% strain (N/mm^2)	Modulus @ 300% strain (N/mm^2)
No Plate–Like Filler	1.35	2.31
Talcum	1.14	2.56
Montmorillonite Clay	1.18	2.84
Treated Montmorillonite Clay	1.57	3.63
Kaolinite Clay	1.25	3.02
Treated Kaolinite Clay	1.37	3.25
Bleaching Clay	1.41	3.45
Treated Bleaching Clay	1.16	2.72

ตารางที่ จ.3

ความแข็งแรงที่ผิว (Surface Hardness) ของยางคอมพอสิทแบบปกติ

Types of filler	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Average
No Plate–Like Filler	44.4	40.2	42.8	41.3	44.5	42.8
Talcum	43.8	45.7	43.7	44.3	48.6	45.2
Montmorillonite Clay	47.8	45.3	46.8	45.6	46.8	46.5
Treated Montmorillonite Clay	55.1	51.2	55.1	49.6	51.5	52.5
Kaolinite Clay	42.4	43.1	46.3	45.3	44.5	44.3
Treated Kaolinite Clay	47.8	45.3	43.2	43.1	43.2	44.5
Bleaching Clay	52.5	45.8	49.8	45.8	46.4	48.1
Treated Bleaching Clay	48.7	42.8	46.1	44.3	45.5	45.5

ตารางที่ จ.4

ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (Compression Set) ของยางคอมพอสิทแบบปกติ

Types of filler	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Average
No Plate–Like Filler	63.50	63.36	63.25	63.36
Talcum	39.88	41.36	39.25	40.16
Montmorillonite Clay	40.64	42.94	41.57	41.57
Treated Montmorillonite Clay	53.27	51.86	51.05	52.06
Kaolinite Clay	44.44	45.14	45.57	45.05
Treated Kaolinite Clay	41.72	41.96	41.75	41.81
Bleaching Clay	47.68	33.43	46.01	42.37
Treated Bleaching Clay	30.45	31.03	31.38	30.95

ตารางที่ จ.5

ผลความทนทานต่อการสึกหรอ (Abrasion Resistance) ของยางคอมพอสิทแบบปกติ

Types of filler	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 6	Average
No Plate–Like Filler	181.81	161.61	111.11	141.41	131.31	161.61	148.14
Talcum	120.12	110.11	100.10	100.10	100.11	140.14	113.45
Montmorillonite Clay	119.05	89.29	79.37	79.37	89.29	69.44	87.64
Treated Montmorillonite Clay	110.11	90.09	80.08	100.10	90.09	80.08	91.76
Kaolinite Clay	109.13	119.05	138.89	119.05	128.97	128.97	124.01
Treated Kaolinite Clay	109.13	119.05	109.13	89.29	109.13	109.13	107.48
Bleaching Clay	107.21	97.47	107.21	97.47	116.96	107.21	105.59
Treated Bleaching Clay	99.21	109.13	109.13	89.29	79.37	109.13	99.21

จ-2 ยางคอมพอสิทแบบที่มียาง ENR เป็นตัวประสาน (สูตร B ในบทที่ 3)

ตารางที่ จ.6

สมบัติการทนทานต่อแรงดึงและค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของยางคอมพอสิท ที่มียาง ENR เป็นตัวประสาน

Types of filler	Tensile Strength (N/mm^2)	Elongation at break (%)
No Plate–Like Filler	7.66	726.76
Talcum	6.54	489.07
Montmorillonite Clay	4.62	423.98
Treated Montmorillonite Clay	5.34	305.85
Kaolinite Clay	5.08	392.27
Treated Kaolinite Clay	6.24	438.57
Bleaching Clay	5.20	417.73
Treated Bleaching Clay	4.63	417.51

ตารางที่ จ.7

โมดูลัสที่ความเครียด (Strain) เท่ากับ 100% และ 300% ของยางคอมพอสิท

ที่มียาง ENR เป็นตัวประสาน

Types of filler	Modulus @ 100% strain (N/mm^2)	Modulus @ 300% strain (N/mm^2)
No Plate–Like Filler	1.46	2.71
Talcum	2.19	4.43
Montmorillonite Clay	2.05	3.71
Treated Montmorillonite Clay	3.18	5.32
Kaolinite Clay	2.28	4.28
Treated Kaolinite Clay	2.51	4.78
Bleaching Clay	2.21	4.29
Treated Bleaching Clay	2.04	3.83

ตารางที่ จ.8

ความแข็งแรงที่ผิว (Surface Hardness) ของยางคอมพอสิท

ที่มียาง ENR เป็นตัวประสาน

Types of filler	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Average
No Plate–Like Filler	48.8	45.1	47.2	45.9	44.5	45.9
Talcum	54.5	52.2	53.9	51.0	54.8	53.3
Montmorillonite Clay	53.4	50.7	53.6	52.7	53.4	52.8
Treated Montmorillonite Clay	67.0	64.5	65.1	64.6	64.1	65.1
Kaolinite Clay	55.6	56.3	56.0	57.4	57.7	56.6
Treated Kaolinite Clay	54.7	55.2	57.6	55.5	57.5	56.1
Bleaching Clay	54.3	52.4	53.7	52.9	55.5	53.8
Treated Bleaching Clay	54.0	54.6	54.1	53.3	55.2	54.2

ตารางที่ จ.9

ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (Compression Set) ของยางคอมพอสิท

ที่มียาง ENR เป็นตัวประสาน

Types of filler	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Average
No Plate–Like Filler	58.66	60.43	58.91	58.91
Talcum	30.48	30.67	31.21	30.79
Montmorillonite Clay	30.79	30.26	30.32	30.46
Treated Montmorillonite Clay	47.13	45.86	47.13	46.71
Kaolinite Clay	34.65	33.65	34.10	34.13
Treated Kaolinite Clay	25.08	25.33	27.24	25.88
Bleaching Clay	28.25	26.32	24.58	26.38
Treated Bleaching Clay	25.24	24.75	25.41	25.13

ตารางที่ จ.10

ผลความทนทานต่อการสึกหรอ (Abrasion Resistance) ของยางคอมพอสิท

ที่มียาง ENR เป็นตัวประสาน

Types of filler	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 6	Average
No Plate–Like Filler	113.16	123.45	113.16	123.45	133.74	133.74	123.45
Talcum	50.05	60.06	50.05	70.07	60.06	50.05	56.72
Montmorillonite Clay	70.07	50.05	50.05	70.07	60.06	70.07	61.73
Treated Montmorillonite Clay	30.03	50.05	50.05	50.05	40.04	60.06	46.71
Kaolinite Clay	51.44	61.73	61.73	51.44	61.73	51.44	56.59
Treated Kaolinite Clay	70.07	60.06	60.06	60.06	70.07	70.07	65.07
Bleaching Clay	70.07	90.09	80.08	80.08	80.08	70.07	78.41
Treated Bleaching Clay	111.11	101.01	90.91	80.81	90.91	70.71	90.91

จ-3 ผลของค่าการซึมผ่านของก๊าซ

ตารางที่ จ.11

ผลการซึมผ่านของก๊าซของยางคอมพอสิท

Rubber Composites	Sample 1	Sample 2	Average at normalized thickness (2000 μm)
BIIR	41.2	41.2	41.2
BIIR & NR	75.2	84.1	92.82
BIIR & NR & ENR	41	44.8	57.46
BIIR & NR – Talcum	69.4	60.5	68.82
BIIR & NR & ENR – Talcum	72.5	59.1	69.78
BIIR & NR – Treated Montmorillonite Clay	116	89.3	118.32
BIIR & NR – Treated Kaolinite Clay	127	122	117.31
BIIR & NR & ENR – Treated Montmorillonite Clay	113	96.6	111.31

ประวัติการศึกษา

ชื่อ	นายการุณย์ เจียมจิตศิริพงษ์
วันเดือนปีเกิด	7 พฤศจิกายน 2525
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี) มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ พ.ศ. 2547
ผลงานทางวิชาการ	นำเสนอผลงานวิชาการในการประชุมระดับนานาชาติของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ร่วมกับ Tokyo Institute of Technology, Japan ครั้งที่ 2 ในหัวข้อเรื่อง “Improvement of Rubber–Layered Silicate Compatibility by Using ENR Compatibilizer.” พ.ศ. 2552