

บทที่ 4

ผลของการวิจัย (FINDINGS AND RESULTS)

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

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

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

4.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้นด้วย X – Ray Fluorescence (XRF)

ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบของแป้งทาลค์ม แร่ดินเหนียว Montmorillonite แร่ดินเหนียว Kaolinite และแร่ดินเหนียวขี้ดสี ด้วยเครื่อง XRF พบว่า แป้งทาลค์มมีองค์ประกอบหลักเป็น 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 ในขณะที่แร่ดินเหนียวขี้ดสี มี CaO ปรากฏขึ้นซึ่งสอดคล้องกับสูตรโครงสร้างทั่วไปของแร่ดินเหนียวชนิดนี้ อีกทั้งยังมี K_2O (K^+) ในปริมาณสูงพอสมควร ซึ่งคาดว่า เป็นลักษณะเฉพาะของแร่ดินเหนียวประเภท illite (Brady, 1996)

ตารางที่ 4.1

องค์ประกอบเบื้องต้นด้วยเครื่อง XRF ของแป้งทัลคัม แร่ดินเหนียว Montmorillonite

แร่ดินเหนียว Kaolinite และแร่ดินเหนียวขัดสี

สารประกอบ	ปริมาณองค์ประกอบธาตุของสารตัวเต็ม (%) by weight)			
	แป้งทัลคัม	แร่ดินเหนียว Montmorillonite	แร่ดินเหนียว Kaolinite	แร่ดินเหนียวขัดสี
SiO ₂	61.4	64.33	53.20	75.20
Al ₂ O ₃	0.14	23.95	43.70	18.30
Fe ₂ O ₃	0.03	2.30	1.10	0.85
MgO	38.10	3.53	-	1.60
Na ₂ O	-	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 ₂ O	-	0.12	0.35	3.60
ZrO ₂	-	0.01	-	-
SrO	-	0.01	-	-
P ₂ O ₅	0.02	-	0.10	-
CeO ₂	-	-	0.02	-
Cr ₂ O 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

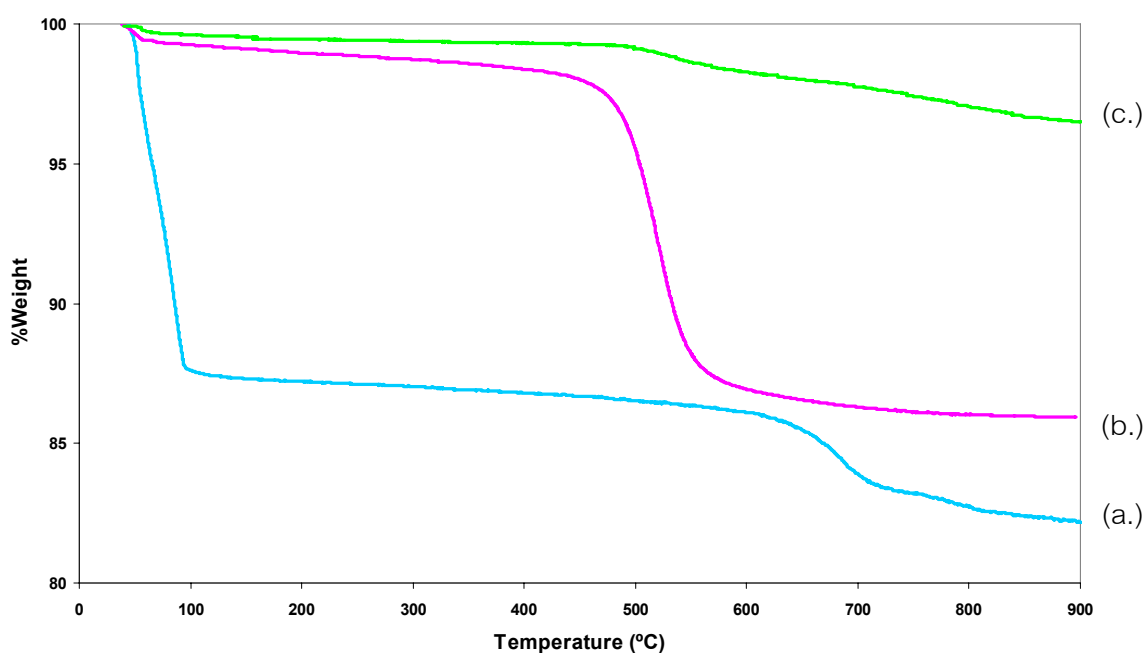
ความสามารถในการดูดน้ำปริมาณมากของแร่ดินเหนียว montmorillonite และช่วงที่สองเป็นการสลายตัวของโครงสร้างอีกครั้งเนื่องจากการสลายตัวของกลุ่ม hydroxyl (OH^-) ของแร่ดินเหนียวที่อุณหภูมิช่วง $600 - 700^\circ\text{C}$ (Grim, 1968) โดยช่วงระหว่างการสูญเสียของน้ำในช่วงแรก พบว่าลักษณะกราฟค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงบริเวณที่เป็นการสลายตัวของ OH^- เนื่องมาจากการค่อยๆ ระเหยของน้ำภายในระยะระหว่างชั้น (Interlayer)

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

อย่างไรก็ตาม แร่ดินเหนียวขี้ดสีนั้น 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.) แร่ดินเหนียวขี้ดสี

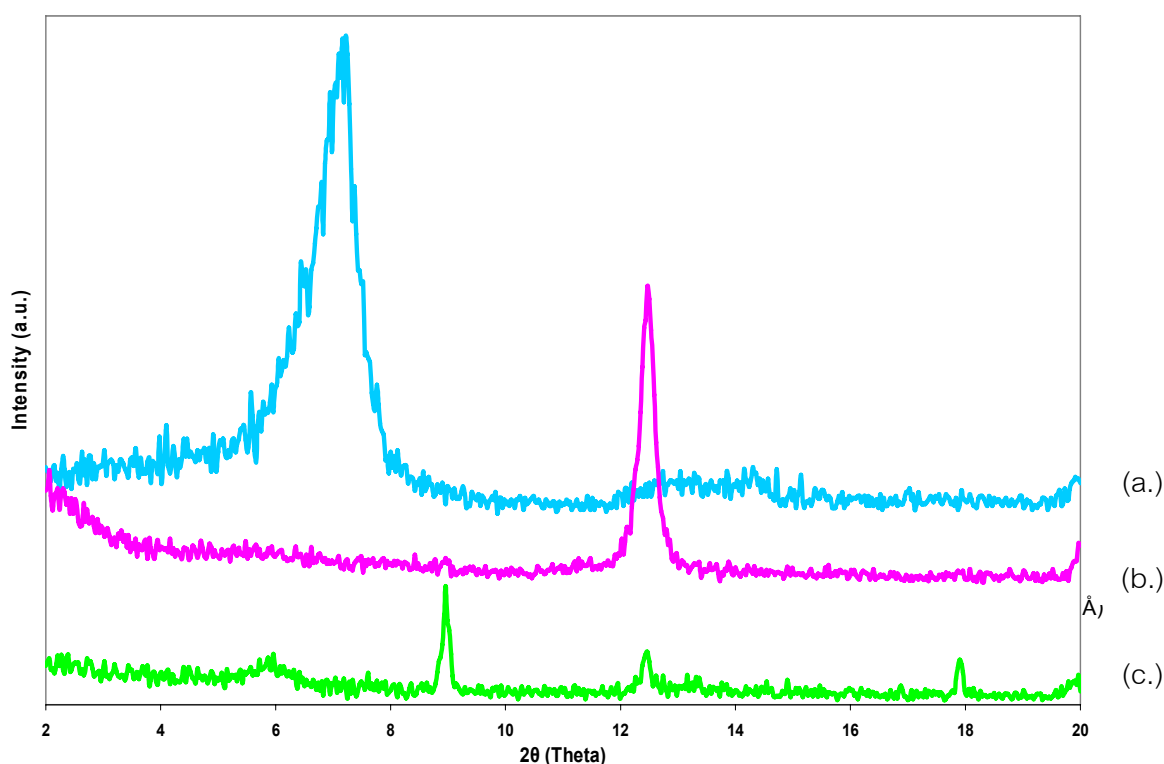


4.1.3 การวิเคราะห์ระยะระหว่างชั้นด้วย X – Ray Diffraction (XRD)

การเปรียบเทียบ diffraction pattern ของแร่ดินเหนียวทั้งสามประเภท โดยใช้เครื่อง XRD ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.2 ด้วยการวัดค่ามุมตกกระทบ (2θ) บนชั้นของแร่ดินเหนียว ตั้งแต่ $2 - 20^\circ$ พิจารณากราฟของแร่ดินเหนียว montmorillonite พบว่า diffraction peak ซึ่งแสดงถึงค่า d – spacing ที่ $2\theta = 7.10^\circ$ ($d = 12.45 \text{ \AA}$) และ peak เล็กๆ ที่ 14.27° ($d = 6.20 \text{ \AA}$) แร่ดินเหนียว kaolinite พบ peak ที่ $2\theta = 12.47^\circ$ ($d = 7.09 \text{ \AA}$) และแร่ดินเหนียวขัดสี พบ peak ใหญ่ 1 peak ได้แก่ ที่ $2\theta = 8.96^\circ$ ($d = 9.86 \text{ \AA}$) และ peak เล็กๆ 2 peak ได้แก่ ที่ $2\theta = 12.48^\circ$ ($d = 7.09 \text{ \AA}$) และ 17.91° ($d = 4.95 \text{ \AA}$)

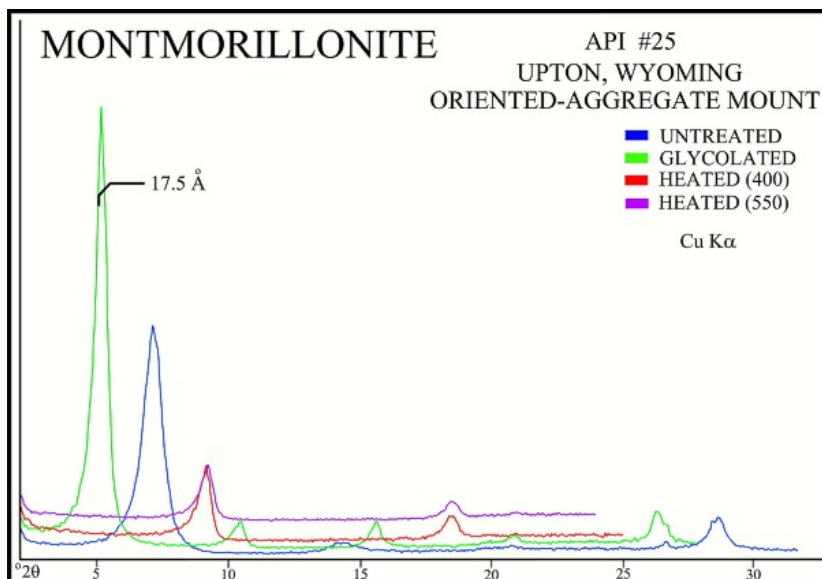
รูปที่ 4.2

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



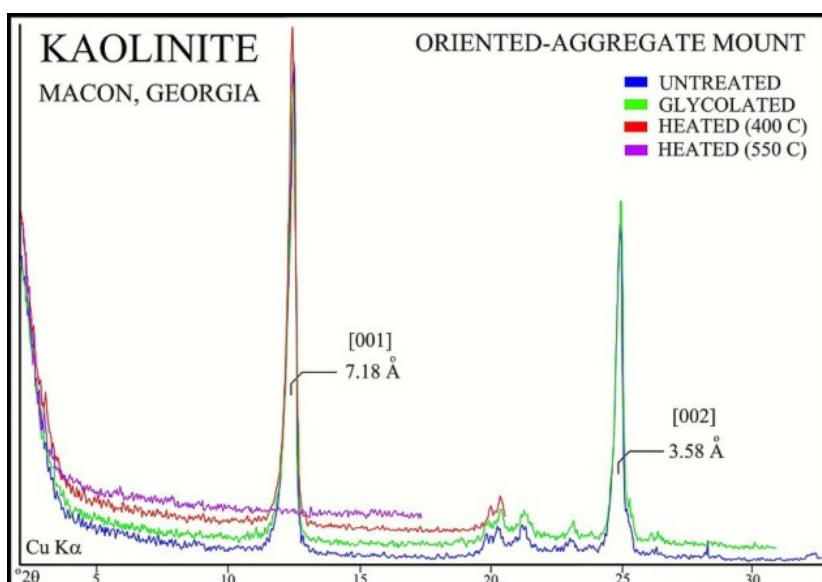
รูปที่ 4.3

XRD pattern ของแร่ดินเหนียว Montmorillonite



รูปที่ 4.4

XRD pattern ของแร่ดินเหนียว Kaolinite

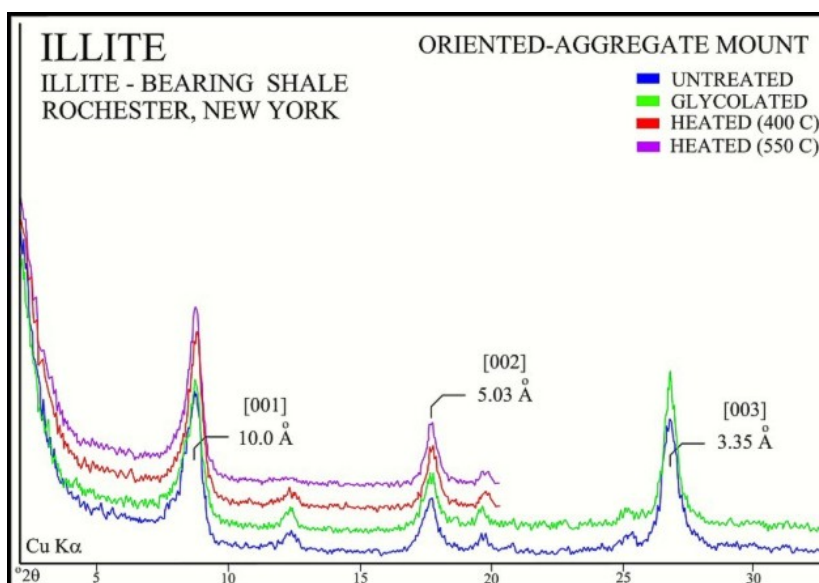
ที่มา : <http://pubs.usgs.gov/openfile/of01-041/index.htm>

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 $2\theta = 12.33^\circ$ ($d = 7.8 \text{ \AA}$) และแร่ดินเหนียว kaolinite มี peak ที่ $2\theta = 12.33^\circ$ ($d = 7.8 \text{ \AA}$)

ในขณะที่แร่ดินเหนียวชนิดสี มีลักษณะ pattern เป็นของผสม อย่างน้อยประมาณ 2 ชนิด ที่อาจจะเป็นไปได้ คือ แร่ดินเหนียว illite และแร่ดินเหนียว kaolinite โดย peak ที่ $2\theta = 8.96^\circ$ ($d = 9.86 \text{ \AA}$) และ 17.91° ($d = 4.95 \text{ \AA}$) น่าจะเป็นเป็นลักษณะเฉพาะของแร่ดินเหนียว illite ดังที่แสดงตามรูปที่ 4.5 และที่ $2\theta = 12.48^\circ$ ($d = 7.09 \text{ \AA}$) น่าจะเป็นลักษณะเฉพาะของแร่ดินเหนียว kaolinite ดังที่แสดงตามรูปที่ 4.4

รูปที่ 4.5

XRD pattern ของแร่ดินเหนียว Illite

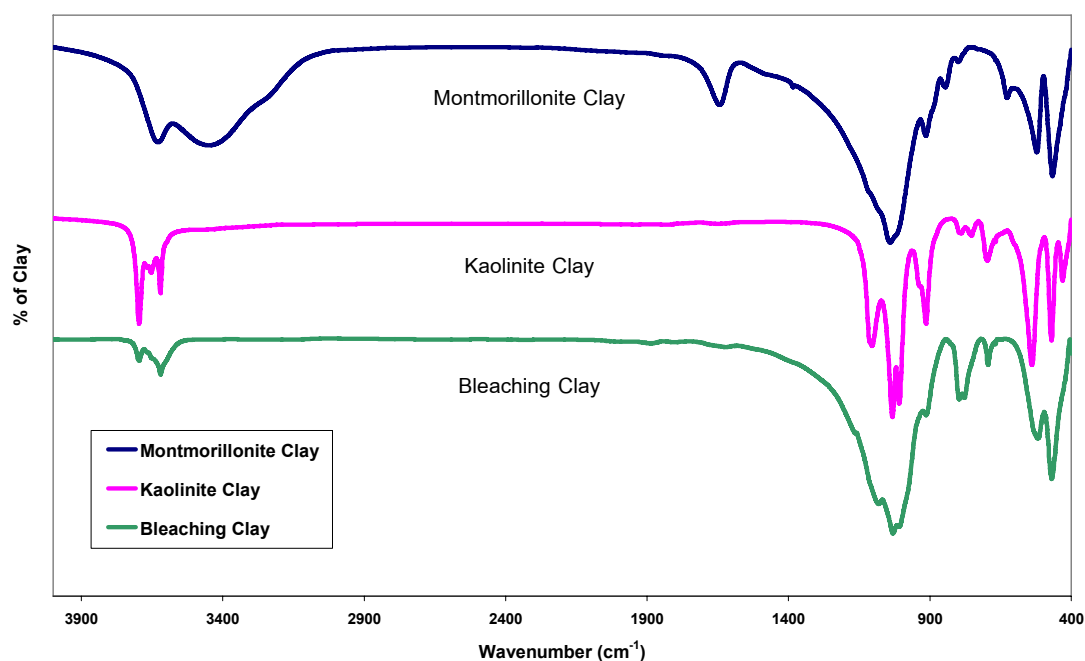


4.1.4 การวิเคราะห์พันธะต่างๆ ที่วัดด้วย Infrared Spectroscopy

เมื่อพิจารณา Infrared absorbance spectrum ของแร่ดินเหนียว montmorillonite, แร่ดินเหนียว kaolinite และแร่ดินเหนียวขัดสี โดยเครื่อง Fourier Transform Infrared (FTIR) ดังรูปที่ 4.6 พบว่า มีลักษณะของสเปกตรัมที่แตกต่างกัน โดยแร่ดินเหนียว montmorillonite มีการดูดซับแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ $3,625\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเกิดจากการยืดตัวของพันธะ OH (OH stretching) ของกลุ่ม Hydroxyl ในขณะที่ความยาวคลื่นในช่วงกว้างประมาณ $3,400 - 3,500\text{ cm}^{-1}$ และ $1,600\text{ cm}^{-1}$ เป็นการยืดตัวและเสียรูปเนื่องจากน้ำ (water stretching and deformation) ตามลำดับ และที่ความยาวคลื่นประมาณ $1,050\text{ cm}^{-1}$ 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 และแร่ดินเหนียวชนิดอื่นที่มีการดูดซับที่ความยาวคลื่นประมาณ $3,700\text{ cm}^{-1}$ และ $3,600\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเกิดจากการยืดตัวของพันธะ OH (OH stretching) ของกลุ่ม Hydroxyl ซึ่งแร่ดินเหนียวชนิดนี้มีปริมาณที่น้อยกว่า นอกจากนี้ยังพบการดูดซับที่ความยาวคลื่นประมาณ $1,100\text{ cm}^{-1}$ และในช่วงประมาณ $1,000 - 1,050\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นการยืดของพันธะ Si – O แบบตั้งฉากและในระนาบ (perpendicular and in – plane Si – O stretching) ตามลำดับ และพบที่ความยาวคลื่นประมาณ 900 cm^{-1} ที่เป็นการเสียรูปเนื่องจากพันธะ Al_2OH (Al_2OH deformation) ซึ่งแร่ดินเหนียวชนิดนี้มีปริมาณที่น้อยกว่าเช่นเดียวกัน (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 $4.807\text{ }\mu\text{m}$ ทำให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของสารตัวเติมมีค่าสูงที่สุด คือ $25.8520\text{ m}^2/\text{g}$ ในขณะที่ แป้งทาลค์มีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยมากที่สุด คือ $16.657\text{ }\mu\text{m}$ ทำให้ ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของสารตัวเติมมีค่าต่ำที่สุด คือ $3.1788\text{ m}^2/\text{g}$

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) หลังการปรับปรุงสภาพผิว

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

4.2.1 องค์ประกอบและลักษณะเฉพาะของแร่ดินเหนียว Montmorillonite

4.2.1 (a.) การทดสอบการสลายตัวเชิงความร้อนด้วย Thermogravimetric Analysis (TGA)

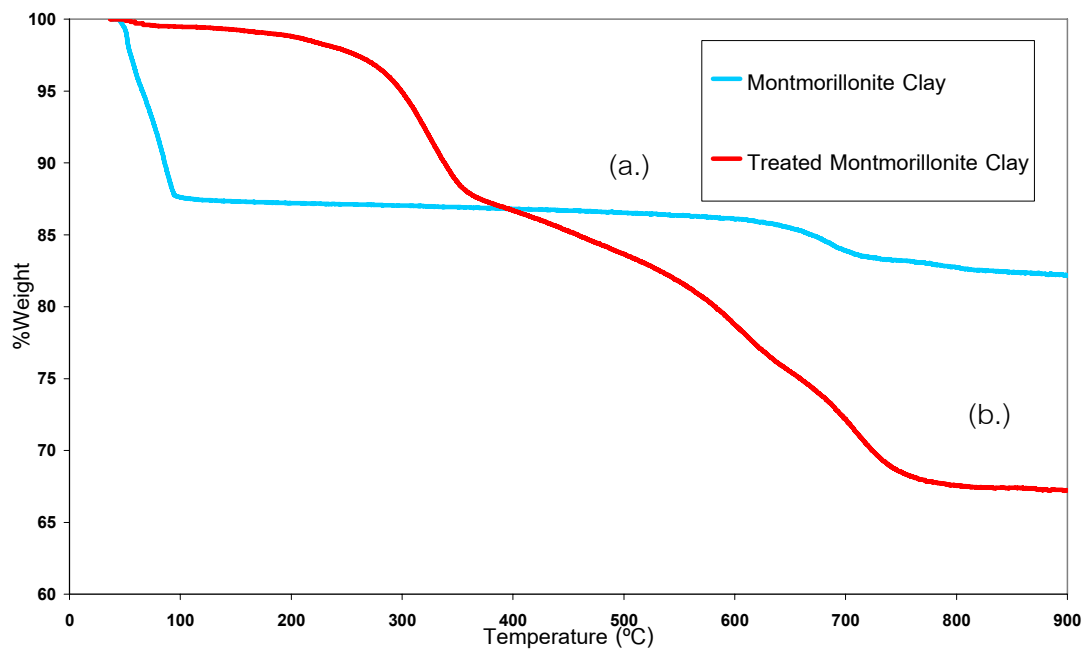
เมื่อทดสอบแร่ดินเหนียว montmorillonite ก่อนและหลังการปรับปรุงสภาพผิวแล้ว ด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analysis (TGA) ได้กราฟ thermogram ดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่า ที่อุณหภูมิประมาณ 100°C ซึ่งเป็นช่วงการระเหยของน้ำ จากนั้นจะเป็นช่วงการสลายตัวของ Octadecylamine (C_{18}) เริ่มต้นที่อุณหภูมิ 150°C ซึ่งกราฟที่ได้สามารถแบ่งได้เป็น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

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

การศึกษารายละเอียดของแร่ดินเหนียว montmorillonite ก่อนและหลังการปรับปรุงสภาพผิวแล้ว โดยใช้เครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) ได้แสดงในรูปที่ 4.8 พบว่า เมื่อใช้ Octadecylamine (C_{18}) ปรับปรุงสภาพผิว ทำให้ค่า d – spacing ซึ่งบ่งบอกถึงระยะห่างระหว่างชั้น (Interlayer) ของแร่ดินเหนียว montmorillonite ขยายตัวเพิ่มขึ้นจาก $12.45 \text{ \AA}$ เป็น $19.82 \text{ \AA}$ ซึ่งน่าจะเป็นผลจากเมื่อหมู่ฟังก์ชัน NH_3^+ ของ C_{18} แลกเปลี่ยนกับ Na^+ ของแร่ดินเหนียว montmorillonite แล้ว สายโซ่ของหมู่ไฮโดรคาร์บอนใน C_{18} จะผลักให้ชั้นของระยะห่างระหว่างชั้นกว้างขึ้น

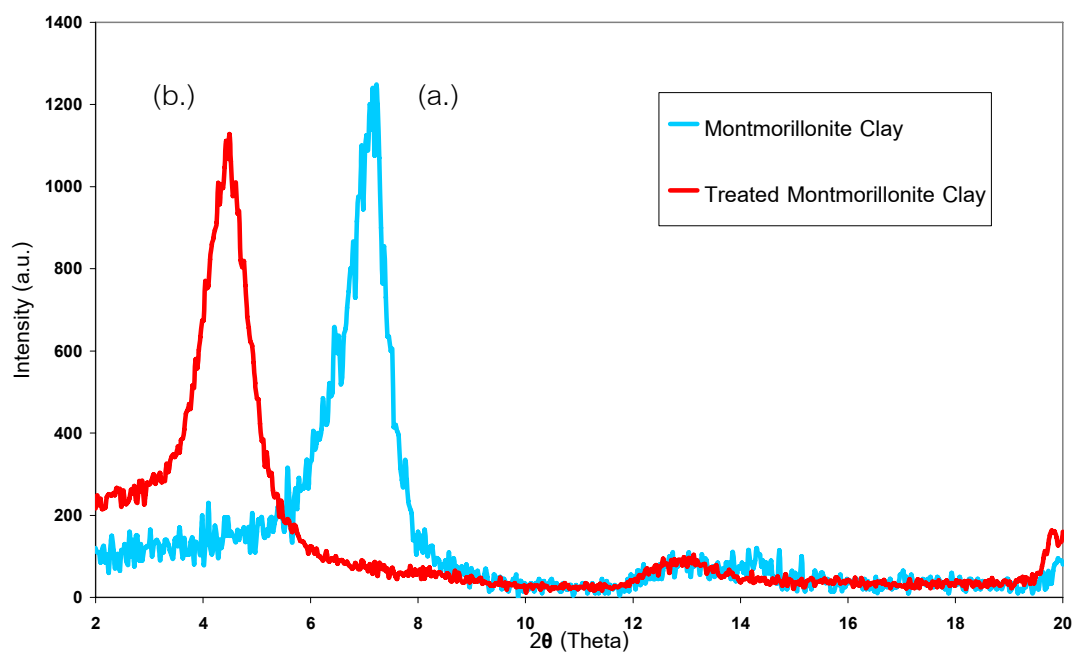
รูปที่ 4.7

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



รูปที่ 4.8

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



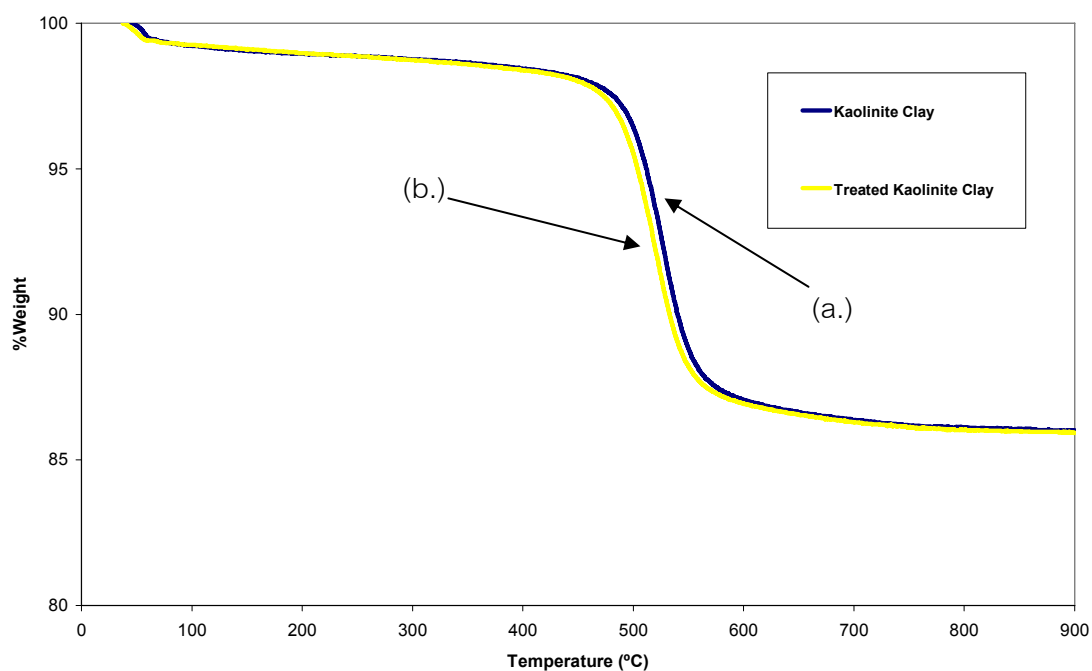
4.2.2 องค์ประกอบและลักษณะเฉพาะของแร่ดินเหนียว Kaolinite

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



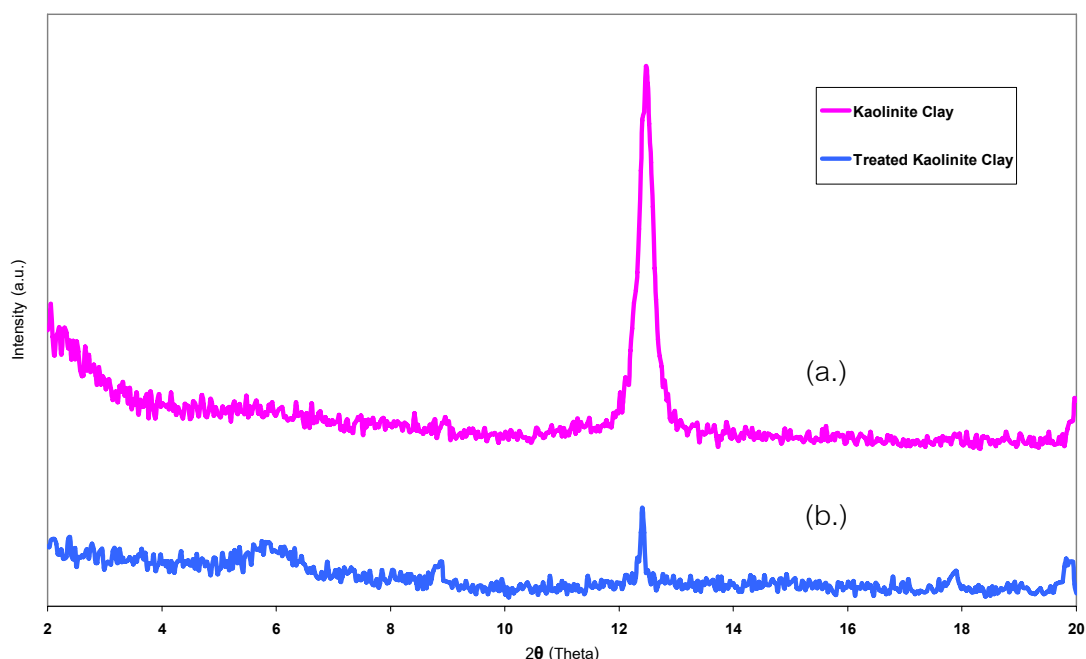
4.2.2 (b.) การทดสอบระยะระหว่างชั้นด้วย X – Ray Diffraction (XRD)

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 ความเข้มของแสงมีค่าลดต่ำลงอย่างมาก แสดงถึง การกระจายตัวแบบไม่เป็นระเบียบยิ่งขึ้น

รูปที่ 4.10

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



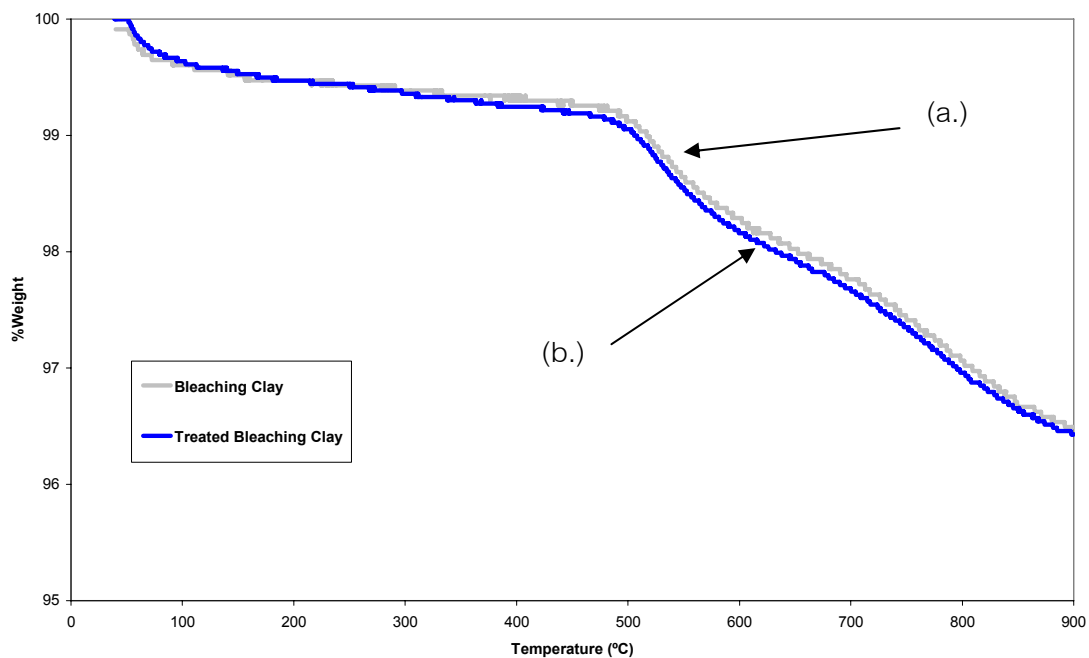
4.2.3 องค์ประกอบและลักษณะเฉพาะของแร่ดินเหนียวขดสี (Bleaching Clay)

4.2.3 (a.) การทดสอบการสลายตัวเชิงความร้อนด้วย Thermogravimetric Analysis (TGA)

เมื่อทดสอบแร่ดินเหนียวขดสี (Bleaching Clay) ก่อนและหลังการปรับสภาพผิว ด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analysis (TGA) ได้กราฟ thermogram ดังแสดงในรูปที่ 4.11 พบว่า ผลที่ได้มีลักษณะคล้ายกับของแร่ดินเหนียว kaolinite กล่าวคือ แร่ดินเหนียวขดสีที่ได้รับการปรับสภาพผิวด้วย silane-69 นั้นมี thermogram ที่แทบไม่แตกต่างจากแร่ดินเหนียวขดสีที่ยังไม่ปรับสภาพผิวเลย อาจเป็นเพราะว่าหมู่ hydroxyl บนผิวของแร่ดินเหนียวขดสี ที่สามารถเกิดปฏิกิริยา silylation ได้นั้น มีอยู่ในปริมาณน้อย

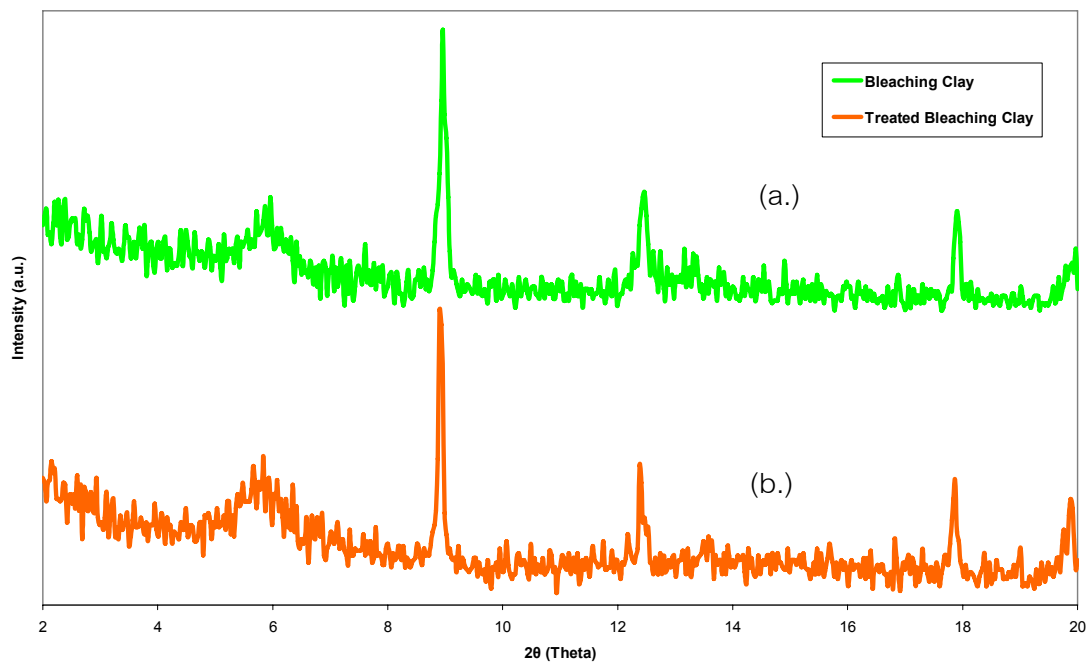
รูปที่ 4.11

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) ของแร่ดินเหนียวขัดสี ก่อนและหลังการปรับสภาพผิวแล้ว โดยใช้เครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) ได้แสดงในรูปที่ 4.12 พบว่า ค่า d – spacing ของแร่ดินเหนียวขัดสีก่อนและหลังการปรับสภาพผิวนั้น มีค่าที่แทบจะไม่เปลี่ยนแปลง

4.3 การทดสอบความเข้ากันได้ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางโบริโมบิวไทล์

การทดสอบความเข้ากันได้ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางโบริโมบิวไทล์ ในอัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อยางโบริโมบิวไทล์ (NR : BIIR) คือ 0:100, 25:75, 50:50, 75:25 และ 100:0 โดยใช้วิธี DMA (Dynamic Mechanical Analysis) วัดค่า mechanical loss factor ($\tan \delta$) โดยตำแหน่งของ peak นี้ เป็นการแสดงค่า T_g ของยางผสมได้ด้วย [R.G., David, 1998] ดังแสดงในรูปที่ 4.13 เมื่อพิจารณาค่า $\tan \delta$ ของยางผสม (NR : BIIR = 25:75, 50:50 และ 75:25) พบว่า เมื่อผสมยางโบริโมบิวไทล์ลงในยางธรรมชาติในอัตราส่วนที่มากขึ้น ทำให้ช่วงอุณหภูมิของค่า T_g มีความกว้างมากขึ้น เนื่องจากยางโบริโมบิวไทล์ที่นำมาใช้นี้มีช่วงการกระจายตัวของค่า T_g ค่อนข้างกว้าง โดยลักษณะของ peak T_g คล้ายเป็น 2 ช่วง ซึ่งอาจเกิดจากยางธรรมชาติบางส่วนในยางโบริโมบิวไทล์ ทำปฏิกิริยาโบรมิเนชัน (Bromination) ไม่หมด จากกราฟของยางผสม พบว่า ค่า T_g เฉลี่ยของยางผสมนั้น มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณยางโบริโมบิวไทล์ที่เพิ่มขึ้นด้วย ดังสรุปไว้ในตารางที่ 4.3 โดย peak T_g ของยางผสมมีลักษณะรวมกันเป็น peak เดียว แสดงถึงว่า ยางผสมเข้ากันได้ดีแบบ miscible blend ที่ทุกอัตราส่วนการผสม

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

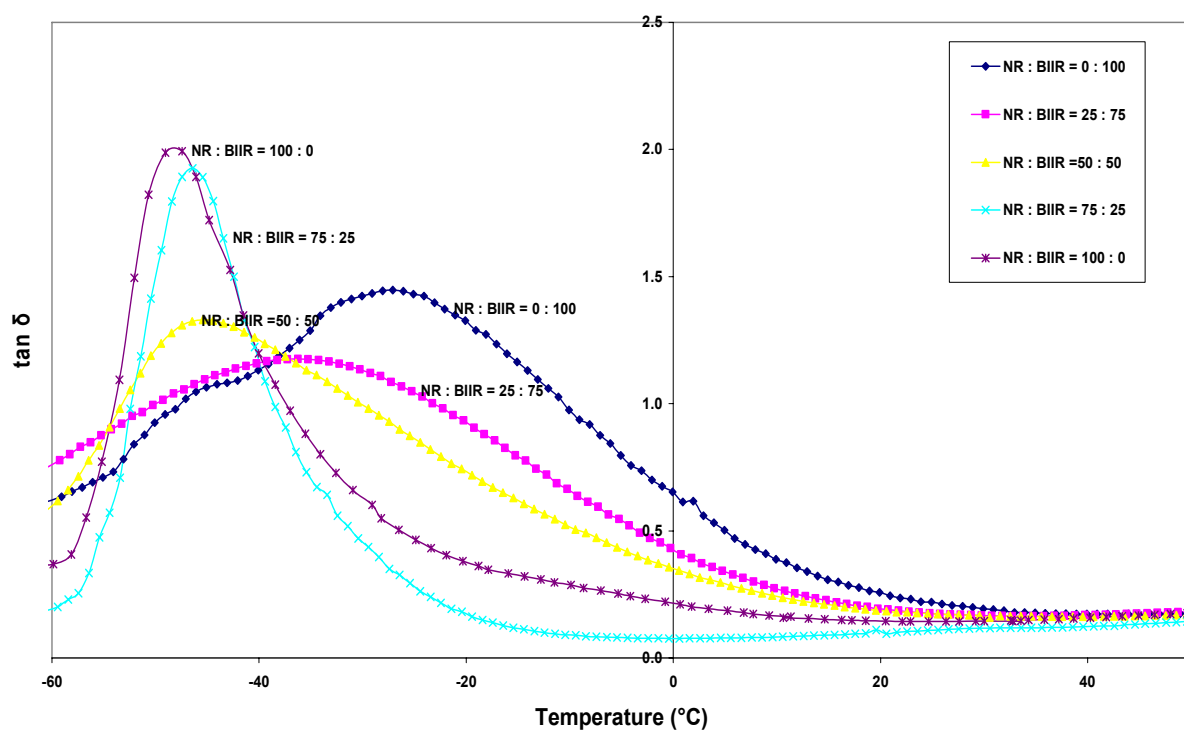
$$\frac{1}{T_{g_b}} = \frac{W_1}{T_{g_1}} + \frac{W_2}{T_{g_2}}$$

เมื่อ W_1 และ W_2 คือ สัดส่วนมวล (mass fraction) ของยางธรรมชาติและยางโบริโมบิวไทล์ ตามลำดับ และ T_{g_b} , T_{g_1} และ T_{g_2} คือค่า T_g ของยางผสม, ยางธรรมชาติและยางโบริโมบิวไทล์ ตามลำดับ จากกราฟ พบว่า ค่า T_g ของยางผสมที่วัดได้มีค่าต่ำกว่าที่คำนวณได้

จากความสัมพันธ์ของ Fox แสดงถึงการเข้ากันได้ของยางธรรมชาติกับยางโบรโมบิวไทล์ ผสมได้
อยู่ในระดับไมโครเมตร แต่ไม่เข้ากันได้ถึงระดับโมเลกุล

รูปที่ 4.13

ผล Mechanical loss factor ($\tan \delta$) ของยางผสมยางธรรมชาติต่อยางโบรโมบิวไทล์
ในอัตราส่วนต่างๆ



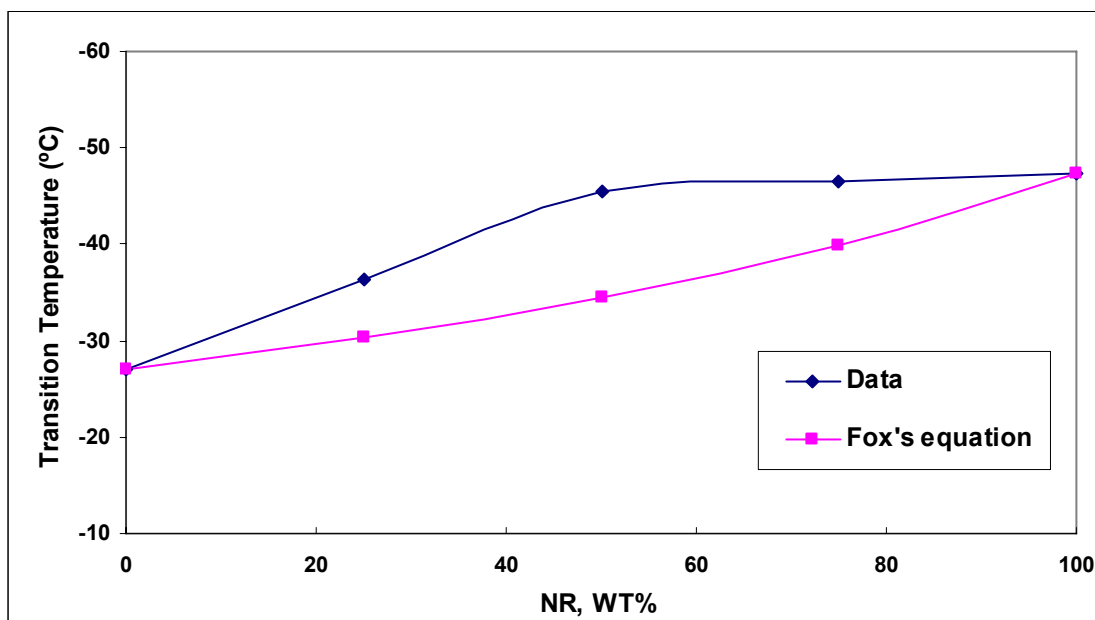
ตารางที่ 4.3

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 ของยางผสมยางธรรมชาติต่อยางโบริโมบิวไทล์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่ได้จากการทดลอง
เปรียบเทียบกับค่าคำนวณจากความสัมพันธ์ของ Fox



4.4 ผลของชนิดของสารตัวเติมแร่ดินเหนียวและการปรับสภาพผิวสารตัวเติมต่อสมบัติต่างๆของยางคอมพอสิต

ส่วนนี้จะเป็นการศึกษาผลของชนิดของสารตัวเติม รวมทั้ง เมื่อทำการปรับสภาพผิวของสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของยางคอมพอสิต 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

สัญลักษณ์สารตัวเติม

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

สมบัติการคงรูปของยางคอมพอสิตแบบปกติ 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

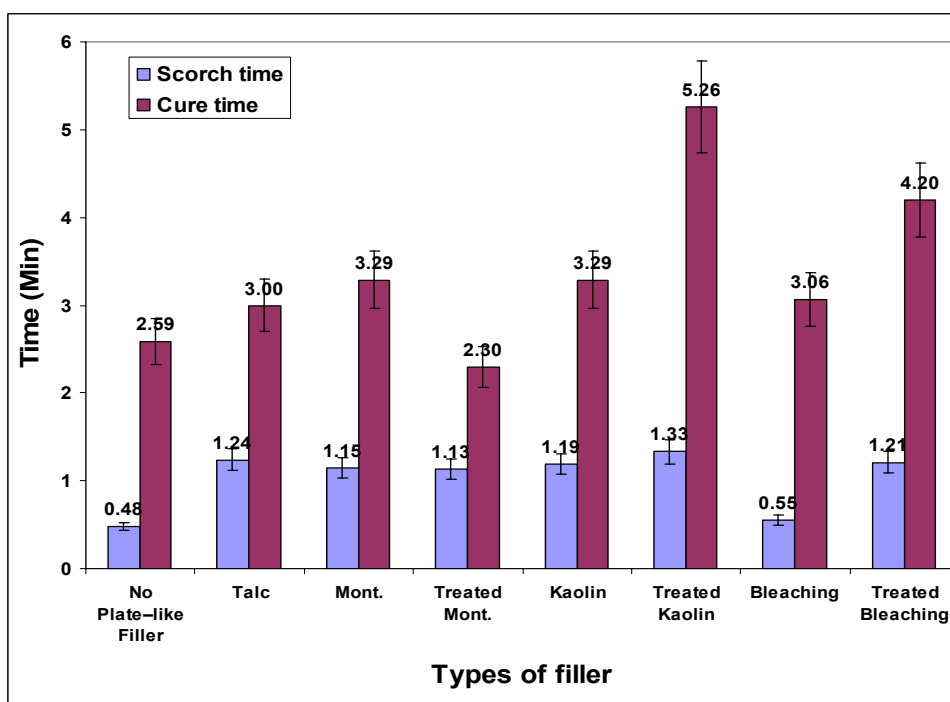
เมื่อพิจารณายางคอมพอสิตแบบปกติที่ใช้สารตัวเติมแบบแผ่นชนิดต่างๆ ก่อนทำการปรับสภาพผิว ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.15 พบว่า คอมพอสิตที่ไม่มีการใช้สารตัวเติมแบบแผ่นชนิดใดๆ เลย มีค่าเวลาที่ยางเริ่มคงรูป (Scorch time, t_2) และเวลาในการขึ้นรูป (Cure time, t_{90}) เร็วที่สุดและในกรณีที่มีการใช้สารตัวเติมแบบแผ่น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

มีค่าเวลาที่ยางเริ่มคงรูปค่อนข้างต่ำ อาจจะเป็นผลมาจากการที่มีออกไซด์ของโพแทสเซียม (K_2O) ค่อนข้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเติมชนิดอื่น เนื่องจากโลหะออกไซด์ในแร่ดินเหนียวนั้น จะทำหน้าที่เป็นเหมือนสารเร่งปฏิกิริยาและสารกระตุ้นปฏิกิริยาในกระบวนการวัลคาไนซ์ (Saeoui, Rakdee, & Thanmathorn, 2002)

เมื่อพิจารณาแร่ดินเหนียวทั้งสามหลังทำการปรับสภาพผิว พบว่า แร่ดินเหนียว montmorillonite (Mont.) เมื่อเปรียบเทียบกับที่ปรับสภาพผิวด้วย octadecylamine แล้ว (Treated Mont.) ปรากฏว่า เวลาที่ยางเริ่มคงรูปและเวลาในการขึ้นรูปมีค่าลดลง หมายความว่า การปรับสภาพผิวสารตัวเติมแร่ดินเหนียว montmorillonite ด้วย octadecylamine นั้น หมู่ ammonium ที่เกิดขึ้น ช่วยทำให้ปฏิกิริยาการคงรูปของยางคอมพอสิตเร็วขึ้น (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

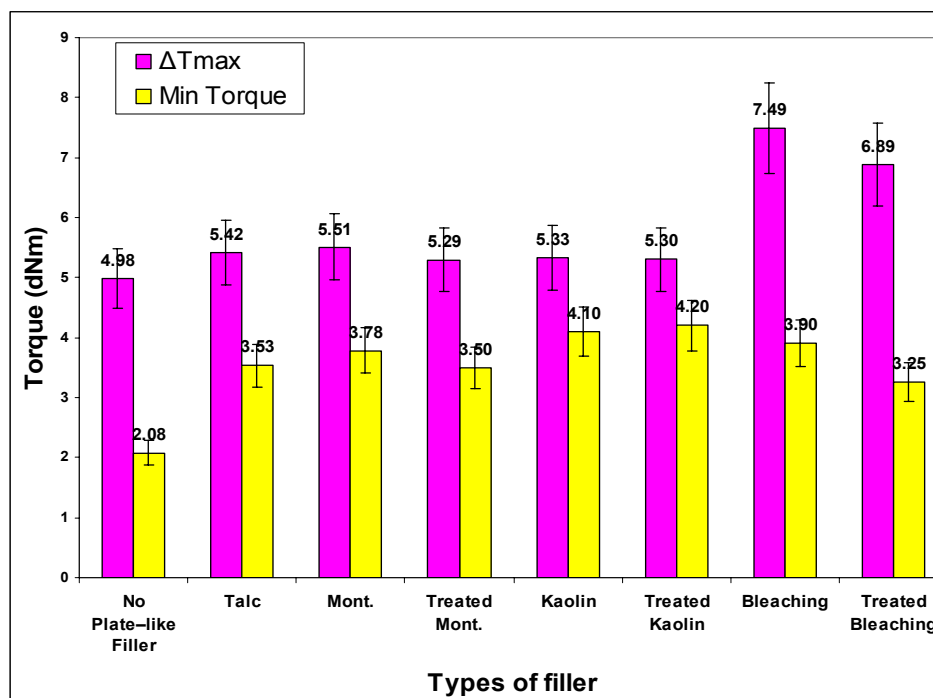
ผลเวลาที่ยางเริ่มคงรูปและเวลาในการขึ้นรูปของยางคอมพอสิตแบบปกติ



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

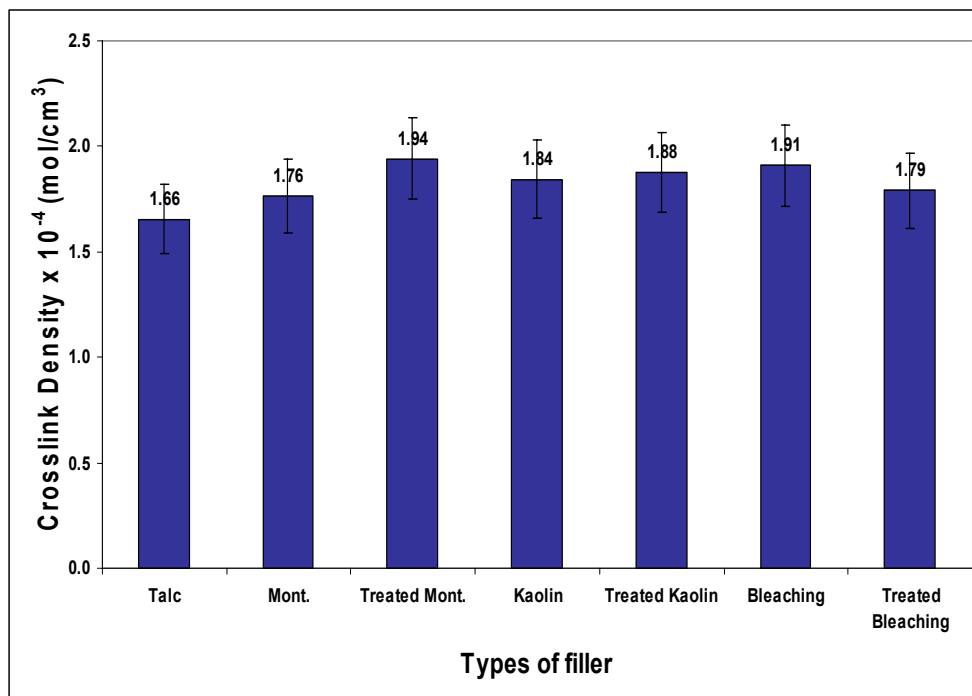
รูปที่ 4.16

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



รูปที่ 4.17

ผลค่าปริมาณของโครงสร้างแบบเชื่อมโยงของยางคอมพอสิตแบบปกติ



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

สมบัติการดึงยืด :

สมบัติการดึงยืดของยางคอมพอสิต ในที่นี้แสดงค่าความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength), ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) และโมดูลัส (Modulus) ที่ความเครียด (Strain) เท่ากับ 100% และ 300% ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบระหว่างชนิดของสารตัวเติมและผลที่ได้รับจากการปรับสภาพผิวเทียบกับสูตรที่ไม่มีการใช้สารตัวเติมแบบแผ่นชนิดใดๆ และสูตรที่ใช้สารตัวเติมแบ่งทาลค์ม ซึ่งสมบัติการดึงยืดของยางคอมพอสิตโดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของสารตัวเติมในยางคอมพอสิตและความหนาแน่นของโครงสร้างร่างแหภายในยาง

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

ของค่าการดัดยัดสูงๆ น้อยลงเช่นเดียวกัน เมื่อพิจารณาในส่วนของยางคอมพอสิตที่มีสารตัวเติมเป็นแร่ดินเหนียว montmorillonite พบว่า ก่อนการปรับสภาพผิวของสารตัวเติม (Mont.) มีค่าความทนทานต่อแรงดึงที่สูงกว่าคอมพอสิตที่ไม่มีการใช้สารตัวเติมแบบแผ่น (No Plate-like Filler) และที่ใช้แป้งทัลคัม(Talc) ในขณะที่ ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดและค่าโมดูลัสที่ 100% ต่ำกว่าและกลับมาสูงกว่าสำหรับค่าโมดูลัสที่ 300% เมื่อทำการปรับสภาพผิวของสารตัวเติม (Treated Mont.) ทำให้ ค่าโมดูลัสของยางคอมพอสิตเพิ่มสูงขึ้นมาก ถึงแม้ว่าจะมีปริมาณของโครงสร้างร่างแหที่ต่ำกว่าสารตัวเติมแร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ไม่มีการปรับสภาพผิว (Mont.) เล็กน้อย และส่งผลให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงและค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของยางคอมพอสิต มีค่าลดลงต่ำกว่าคอมพอสิตที่ไม่มีการใช้สารตัวเติมแบบแผ่น รวมทั้ง คอมพอสิตที่ใช้สารตัวเติมแร่ดินเหนียว montmorillonite ก่อนการปรับสภาพผิวและแป้งทัลคัม การเพิ่มขึ้นของโมดูลัสนี้อาจเกิดจากการกระจายตัวที่ดีขึ้นของแร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ได้รับการปรับสภาพผิวแล้วในยางผสม

เมื่อพิจารณายางคอมพอสิตที่มีสารตัวเติมเป็นแร่ดินเหนียว kaolinite พบว่า ก่อนการปรับสภาพผิวของสารตัวเติม (Kaolin) มีลักษณะเช่นเดียวกับสารตัวเติมแร่ดินเหนียว montmorillonite เมื่อทำการปรับสภาพผิวของสารตัวเติมแล้ว (Treated Kaolin) ทำให้ ค่าความทนทานต่อแรงดึง, ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด รวมทั้ง ค่าโมดูลัสที่ 100% และ 300% เพิ่มขึ้นทั้งหมด เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งทัลคัมและสารตัวเติมเป็นแร่ดินเหนียว kaolinite ก่อนการปรับสภาพผิว (Kaolin) (ยกเว้นในกรณีของคอมพอสิตที่ไม่มีการใช้สารตัวเติมแบบแผ่นที่มีค่าการยืดตัว ณ จุดขาดและค่าโมดูลัสที่ 100% สูงกว่า) เนื่องจากชั้นของแร่ดินเหนียว kaolinite ไม่สามารถขยายตัวได้เหมือนของแร่ดินเหนียว montmorillonite ดังนั้น ผลการทดลองจึงแสดงว่า การปรับสภาพช่วยให้เกิดผิวสัมผัสที่ดีขึ้นระหว่างแร่ดินเหนียวและยาง ถึงแม้ว่าจะมีปริมาณของโครงสร้างร่างแหลดลงเล็กน้อย

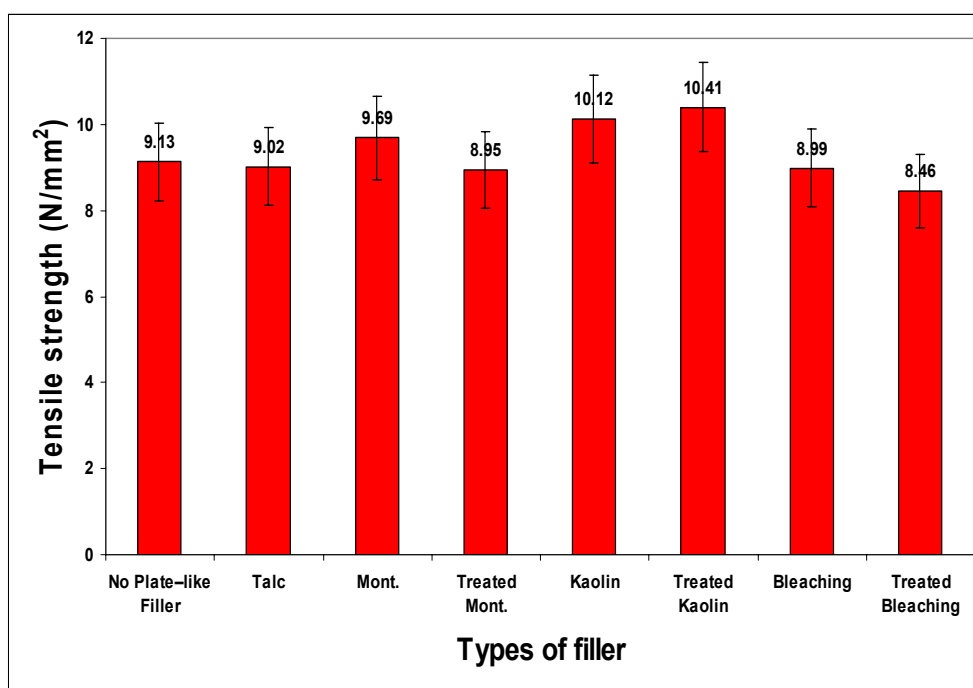
ส่วนกรณีของยางคอมพอสิตที่มีสารตัวเติมเป็นแร่ดินเหนียวขัดสี พบว่า ก่อนการปรับสภาพผิวของสารตัวเติม (Kaolin) นั้น มีเพียงค่าโมดูลัสที่ 100% และ 300% ที่สูงกว่าคอมพอสิตที่ไม่มีการใช้สารตัวเติมแบบแผ่นและที่ใช้แป้งทัลคัม เมื่อการปรับสภาพผิวของสารตัวเติมแล้ว (Treated Bleaching) ทำให้ ค่าความทนทานต่อแรงดึงและค่าโมดูลัสที่ 100% และ 300% ของยางคอมพอสิตมีค่าลดลง ในขณะที่ ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับคอมพอสิตของสารตัวเติมแร่ดินเหนียวขัดสีก่อนการปรับสภาพผิว (Bleaching), คอมพอสิตที่

ไม่มีการใช้สารตัวเติมแบบแผ่นและที่ใช้แบ่งหักคัม กรณีนี้แสดงถึงการปรับสภาพที่ไม่เหมาะสม เพราะไม่ทำให้เกิดผิวสัมผัสที่ดีระหว่างยางกับสารตัวเติม ประกอบกับการปรับสภาพผิวทำให้ความหนาแน่นของโครงสร้างร่างแหลดลง จึงทำให้สมบัติเชิงกลลดลงต่ำกว่าเดิม

ดังนั้น ภาพรวมในเชิงสมบัติเชิงกลพบว่าการใช้สารตัวเติมแบบแผ่นทำให้ค่าการดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง โดยสารตัวเติมแบบแผ่นบางชนิด โดยเฉพาะ แร่ดินเหนียว kaolinite ทำให้ยางคอมพอสิตมีค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงขึ้น และแม้ว่าสารตัวเติมแบบแผ่นบางชนิดจะให้ค่าโมดูลัสที่ 100% ต่ำกว่าสูตรที่ไม่ใช้สารตัวเติมแผ่น แต่ค่าโมดูลัสที่ 300% ของทุกตัวอย่างที่ใช้สารตัวเติมแผ่นจะมีค่าสูงกว่าเมื่อไม่ใช้เสมอ แสดงถึงว่า สารตัวเติมแบบแผ่นซึ่งมีค่า aspect ratio สูง ทำให้เกิดความต้านทานต่อการยืดตัวและเกิดลักษณะของ strain hardening ได้มาก อีกทั้งสารตัวเติมแร่ดินเหนียวที่ไม่มีการปรับสภาพทุกชนิด ให้ค่าความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) และค่ามอดูลัส (Modulus) สูงกว่าแบ่งหักคัม ส่วนเรื่องการปรับสภาพผิวนั้น แร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว มีความโดดเด่นที่ทำให้ค่าโมดูลัสของยางคอมพอสิตสูงขึ้นอย่างมาก แร่ดินเหนียว kaolinite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว แม้ว่าจะช่วยให้ค่าโมดูลัสเพิ่มขึ้นไม่มาก แต่ก็ทำให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงขึ้นด้วย ในขณะที่ แร่ดินเหนียวชนิดที่ปรับสภาพผิวแล้วกลับทำให้สมบัติต่างๆ ของยางคอมพอสิตแย่งลง

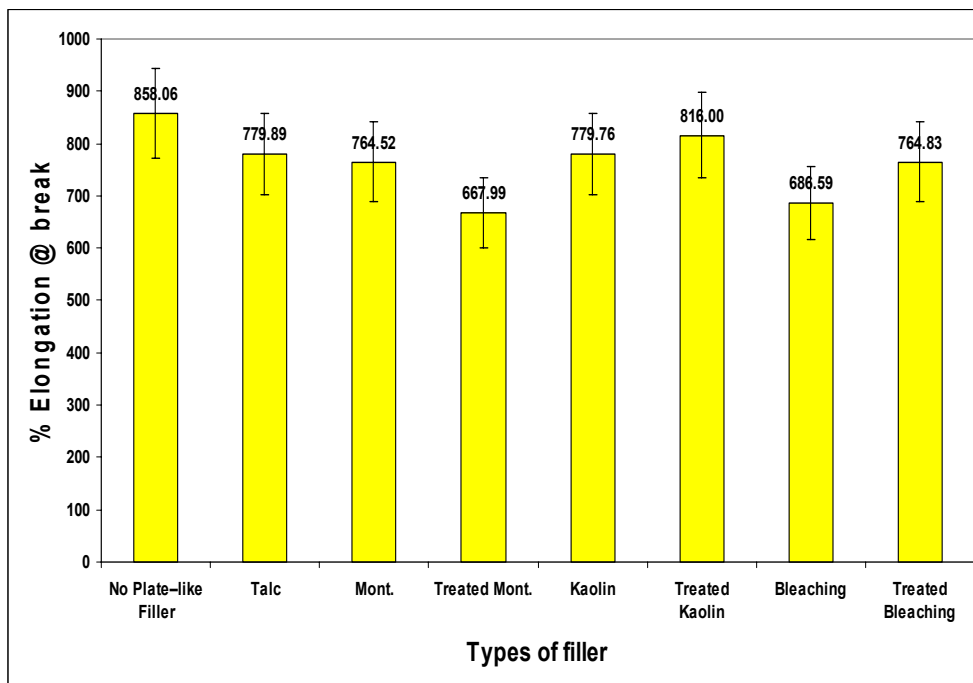
รูปที่ 4.18

ผลความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ของยางคอมพอสิตแบบปกติ



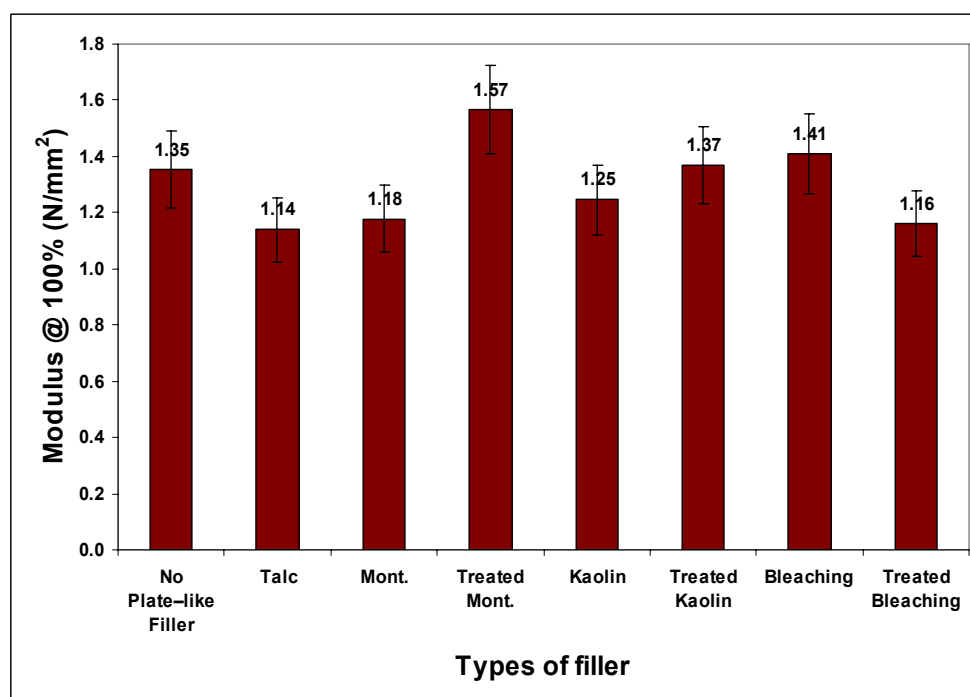
รูปที่ 4.19

ผลค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) ของยางคอมพอสิตแบบปกติ



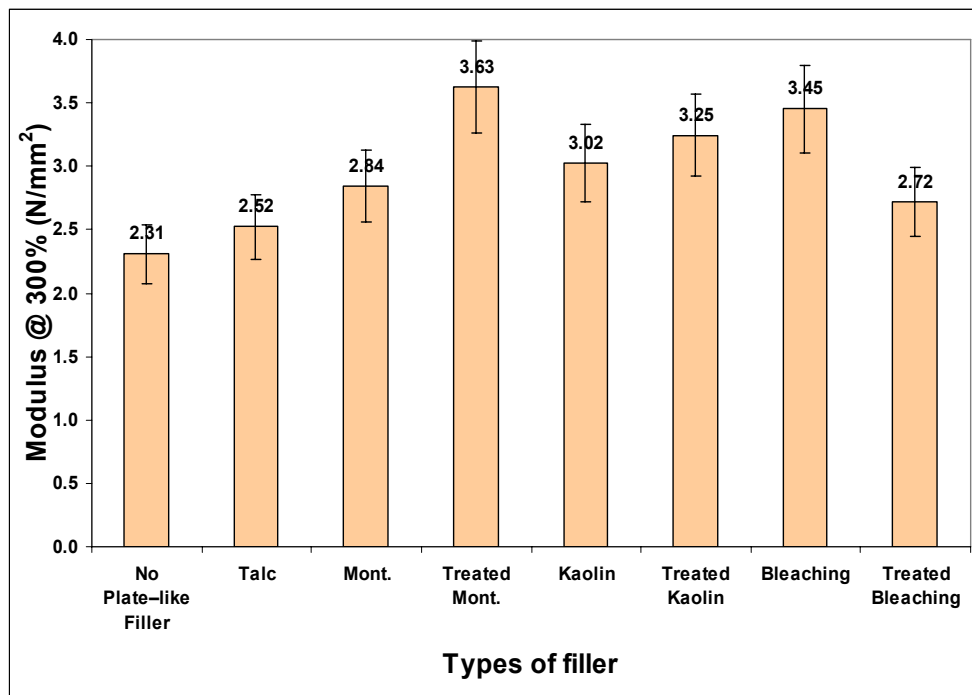
รูปที่ 4.20

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



รูปที่ 4.21

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

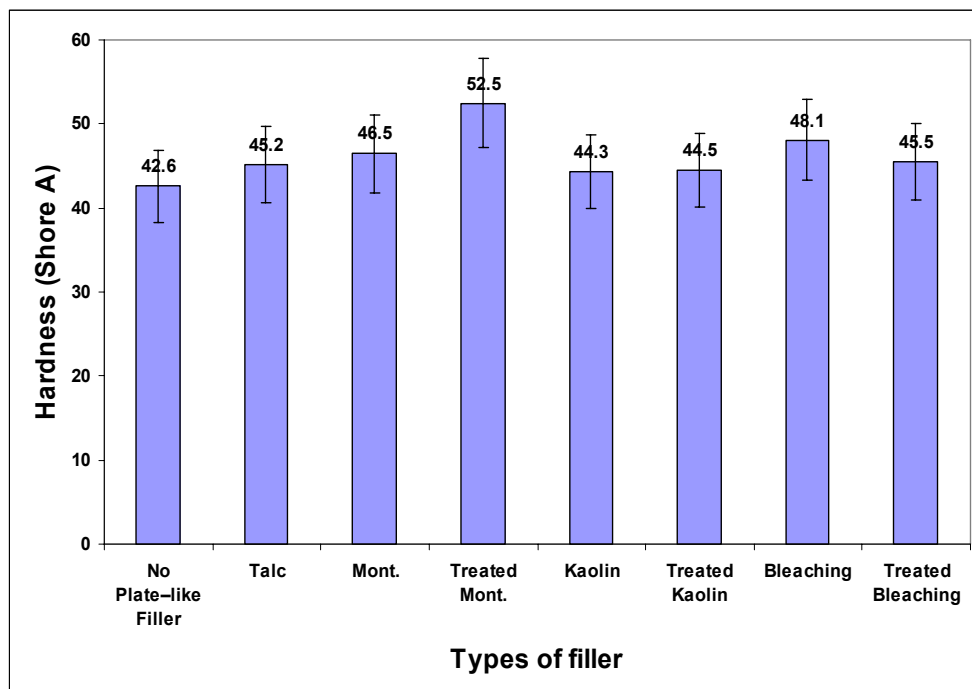


สมบัติความแข็งแรง :

สมบัติความแข็งแรงที่ผิวของยางคอมพอสิต (Surface Hardness) แสดงในรูปที่ 4.22 โดยปกติค่าความแข็งแรงที่ผิวส่วนใหญ่จะแปรผันตรงกับค่าปริมาณของโครงสร้างร่างแหกล่าวคือ ถ้าค่าปริมาณของโครงสร้างร่างแหมีค่ามาก จะส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงที่ผิวมีค่ามากเช่นเดียวกัน แต่จากผลการทดลองหาค่าปริมาณของโครงสร้างร่างแห พบว่า คอมพอสิตของสารตัวเติมแร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว (Treated Mont.) มีค่าปริมาณของโครงสร้างร่างแหเกือบจะน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับคอมพอสิตที่ไม่มีการใช้สารตัวเติมแบบแผ่นและที่ใช้สารตัวเติมชนิดอื่น แต่กลับมีค่าความแข็งแรงที่ผิวมากที่สุด อาจเป็นเพราะว่าอนุภาคของแร่ดินเหนียว montmorillonite เป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ระยะระหว่างชั้นสามารถขยายตัวได้ ทำให้มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงและอาจเกิดการแทรกสอดของโมเลกุลยางระหว่างชั้นที่เป็นระเบียบของแร่ดินเหนียว (Intercalation) ในขณะที่ สารตัวเติมชนิดอื่นไม่สามารถขยายตัวได้ ดังนั้น การที่คอมพอสิตของสารตัวเติมแร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ได้รับการปรับสภาพผิวแล้ว มีค่าความแข็งแรงสูงมากนี้น่าจะเป็นผลมาจากการมีผิวสัมผัสที่ดีหรืออาจมีการขยายตัวของแร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ปรับสภาพผิวแล้วร่วมกับผลของความหนาแน่นของโครงสร้างร่างแห

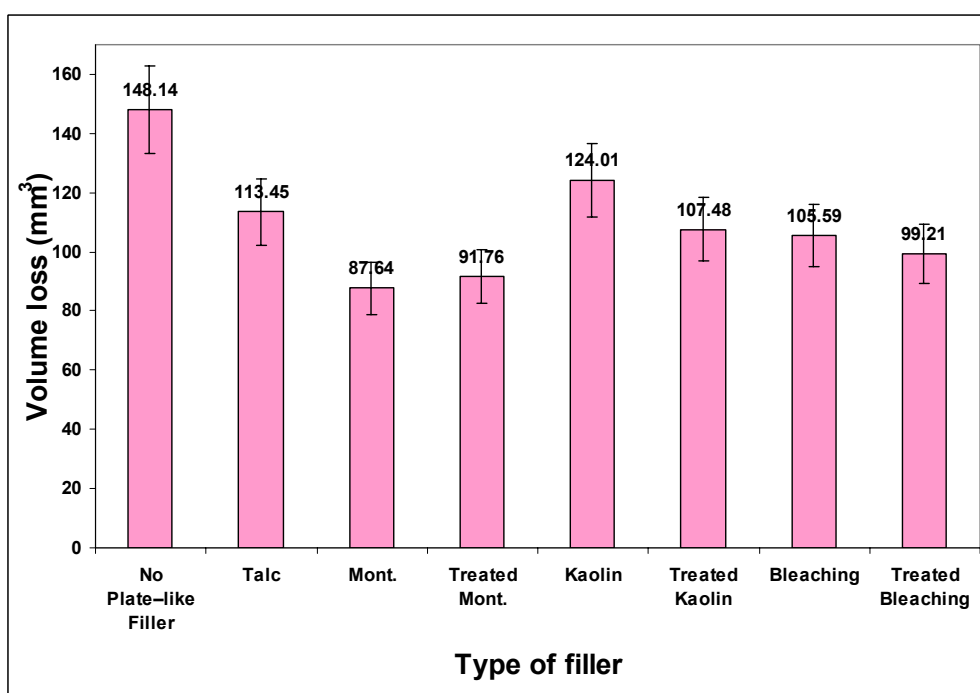
รูปที่ 4.22

ผลความแข็งแรงที่ผิวของยางคอมพอสิตแบบปกติ



รูปที่ 4.23

ปริมาตรที่สึกหรอของยางคอมพอสิตต่างๆ ในการทดสอบความต้านทานการสึกหรอ



สมบัติด้านอื่นๆ :

สมบัติความทนทานต่อการสึกหรอของยางคอมพอสิต (Abrasion Resistance) เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถทนต่อแรงที่กระทำในการขัดถูต่อผิวหน้าของยางคอมพอสิตนั้น ซึ่งค่า volume loss ที่อ่านได้จากรูปที่ 4.23 หมายถึงปริมาตรของผิวหน้าของยางคอมพอสิตนั้นที่หายไปเมื่อได้รับการขัดสี กล่าวคือ ถ้าค่าที่ได้มีค่าน้อย แสดงว่า เนื้อของผิวหน้าของยางคอมพอสิตนั้นหายไปน้อย สามารถทนทานต่อการสึกหรอได้ดี นั่นเอง

รูปที่ 4.23 แสดงผลความทนทานต่อการสึกหรอของยางคอมพอสิตแบบปกติ จะเห็นได้ว่า คอมพอสิตที่ไม่มีการใช้สารตัวเติมแบบแผ่น จะมีความทนทานต่อการสึกหรอที่ต่ำอย่างมาก (ปริมาตรของผิวหน้าของยางหายไปมากที่สุด) ในขณะที่ คอมพอสิตของสารตัวเติมแร่ดินเหนียว montmorillonite ทั้งก่อนและหลังได้รับการปรับสภาพผิว (Mont. และ Treated Mont.) จะสามารถทนทานต่อการสึกหรอได้ดีกว่าสารตัวเติมอื่นๆ อย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากปริมาตรที่หายไปจากการขัดสีนั้น เป็นการหลุดออกของสารตัวเติมเกือบทั้งสิ้น ดังนั้น การที่แร่ดินเหนียว montmorillonite ทั้งก่อนและหลังการปรับสภาพผิวมีความต้านทานต่อการสึกหรอที่ดี แสดงถึง การยึดเหนี่ยวกับยางที่ดีกว่าสารตัวเติมอื่น ทั้งนี้อาจเกี่ยวเนื่องกับความสามารถในการขยายตัวได้ของแร่ดินเหนียว montmorillonite ในขณะที่ คอมพอสิตที่มีสารตัวเติมเป็นแร่ดินเหนียว kaolinite (Kaolin) นั้น มีสามารถทนทานต่อการสึกหรอต่ำที่สุด และการปรับสภาพผิวของสารตัวเติมแร่ดินเหนียว kaolinite สามารถช่วยลดการสึกหรอได้ค่อนข้างมาก

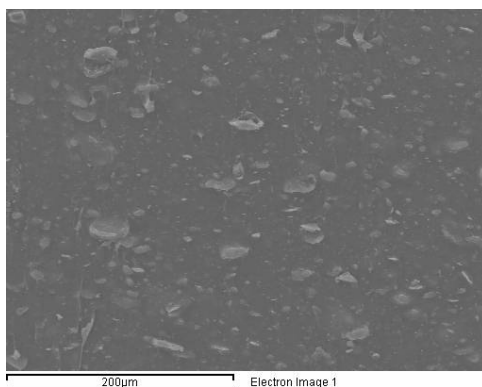
เมื่อทำการถ่ายภาพพื้นที่ผิวหัก (Fractured surface) ของยางคอมพอสิตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ที่กำลังขยาย 100 เท่า ของยางคอมพอสิตที่บดผสมด้วยสารตัวเติมแบ่งทาลค์ม, แร่ดินเหนียว montmorillonite และแร่ดินเหนียว kaolinite ทั้งก่อนและหลังการปรับสภาพผิว ดังแสดงในรูปที่ 4.24 (c.) และ (d.) จะเห็นได้ว่า คอมพอสิตของสารตัวเติมแร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว (Treated Mont.) และแร่ดินเหนียว kaolinite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว (Treated Kaolin) เมื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเติมที่ไม่ได้ปรับสภาพผิวของแต่ละชนิด จะเห็นได้ว่า การกระจายตัวของสารตัวเติมที่ได้รับการปรับสภาพผิวมีลักษณะที่ดีกว่า กล่าวคือ กลุ่มก้อนของสารตัวเติมมีขนาดเล็กกว่า โดยคอมพอสิตของแร่ดินเหนียว kaolinite ที่ได้รับการปรับสภาพผิวแล้วนั้น พบเศษสารตัวเติมที่หลุดร่อนในปริมาณที่น้อยกว่าคอมพอสิตของสารตัวเติมที่ไม่ได้รับการปรับสภาพผิวซึ่งผลที่

ได้สอดคล้องกับความต้านทานการสึกหรอและสมบัติเชิงกลต่างๆ ที่ดีขึ้นหลังการปรับสภาพผิวแล้ว เมื่อเปรียบเทียบกับคอมพอสิตของสารตัวเติมแป้งทัลคัม พบว่า แป้งทัลคัมมีการกระจายตัวในยางคอมพอสิตได้ดีใกล้เคียงกับแร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว ดังนั้น การที่แป้งทัลคัมมีโมดูลัสและความต้านทานการสึกหรอที่ค่อนข้างต่ำนั้น น่าจะเกิดจากสมบัติที่อ่อนนุ่มและหลุดร่อนง่ายของแป้งทัลคัมเอง

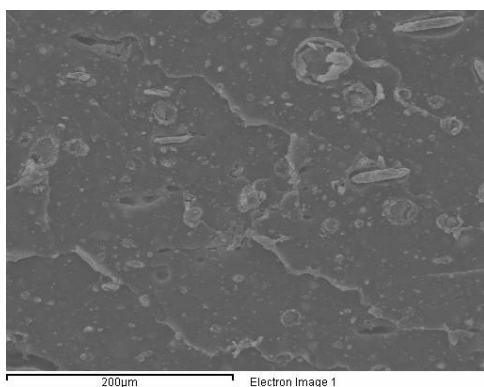
ส่วนด้านการศึกษาความเข้ากันได้ของยางธรรมชาติกับยางโบรโมบิวไทล์ เมื่อใช้สารตัวเติมต่างๆ กัน ได้ทำการทดลองโดยการย้อมสีด้วยออกไซด์ของโอสเมียมเตตรอกไซด์ (Osmium tetroxide) และนำมาถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากภาพถ่ายไม่พบการแยกเฟสของยางธรรมชาติและยางโบรโมบิวไทล์อย่างชัดเจนในทุกตัวอย่าง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

รูปที่ 4.24

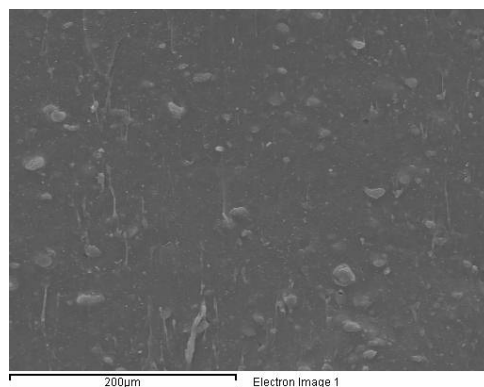
ภาพถ่ายพื้นผิวที่ผิวหักของยางคอมพอลิที่มีสารตัวเติมเป็น (a.) แป้งทัลคัม (b.) แร่ดินเหนียว montmorillonite (c.) แร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว (d.) แร่ดินเหนียว kaolinite (e.) แร่ดินเหนียว kaolinite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว โดยใช้ SEM



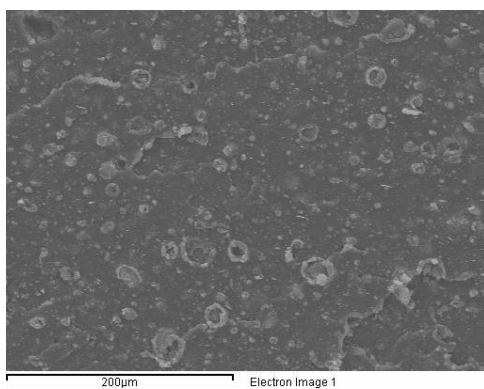
(a.)



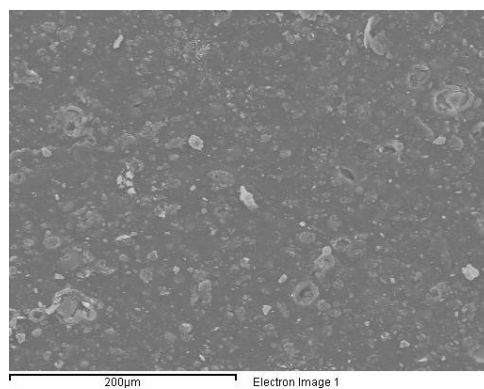
(b.)



(c.)



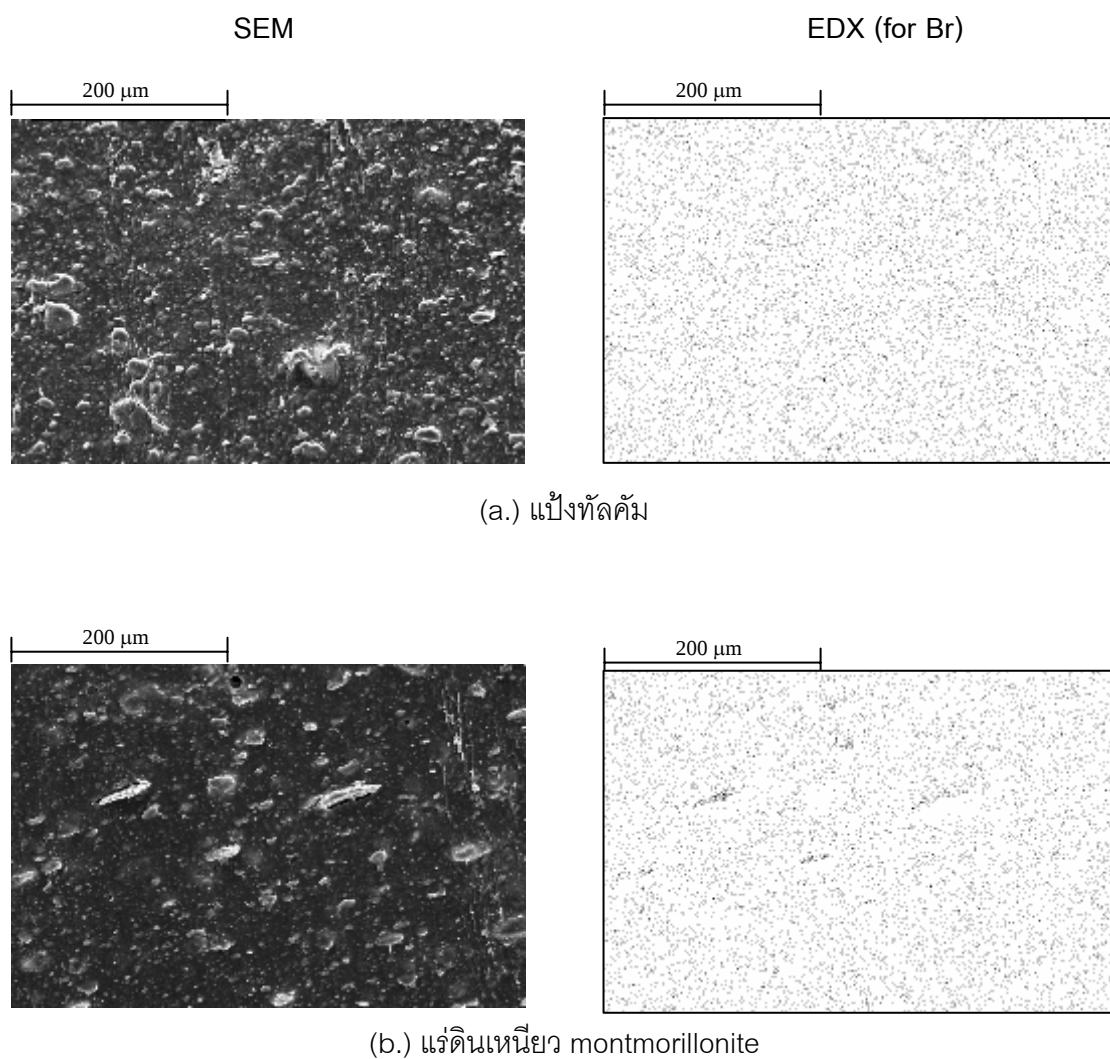
(d.)

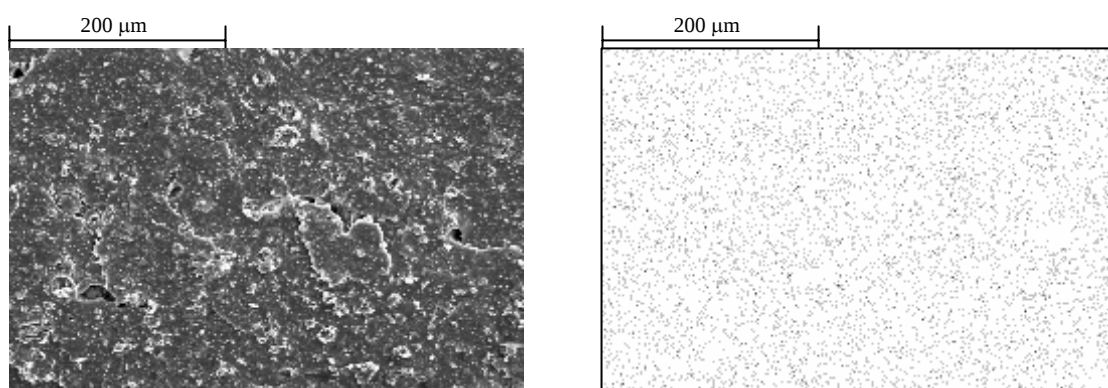


(e.)

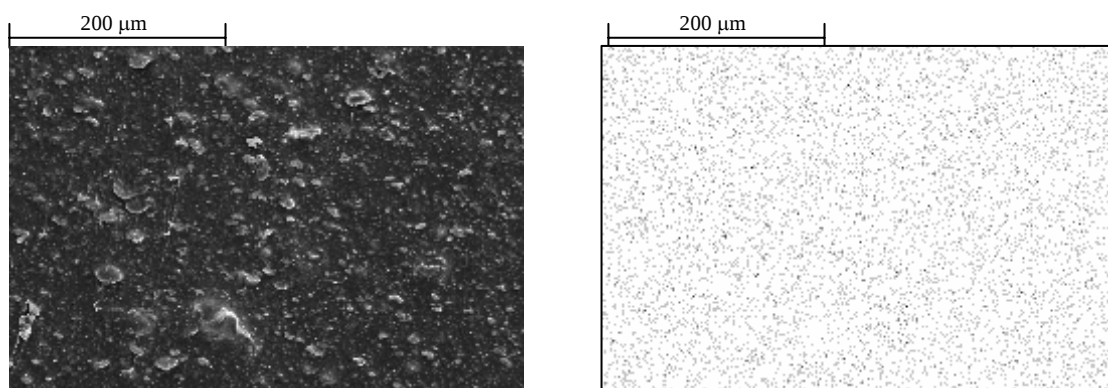
รูปที่ 4.25

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

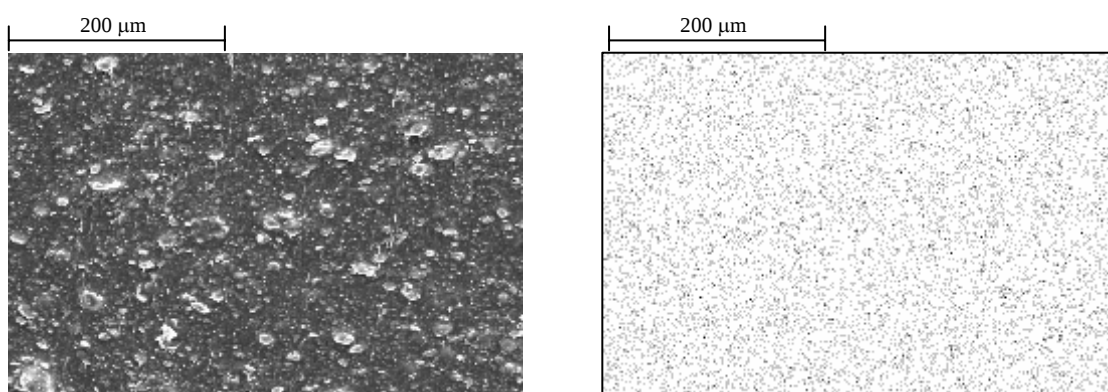




(c.) แร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว



(d.) แร่ดินเหนียว kaolinite



(e.) แร่ดินเหนียว kaolinite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว

4.5 ผลของตัวประสาน (Compatibilizer) ต่อสมบัติต่างๆของยางคอมพอสิต

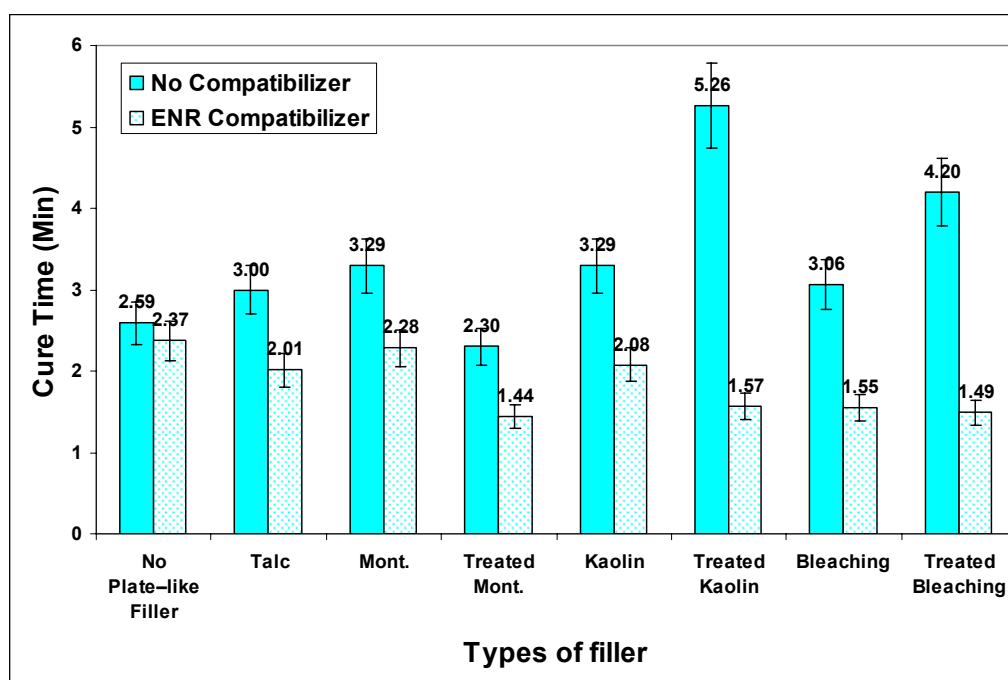
ส่วนนี้จะเป็นการศึกษาผลของตัวประสาน (Compatibilizer) ต่อสมบัติต่างๆ ของยางคอมพอสิต ซึ่งในขั้นตอนการบดผสมนั้น จะนำไปตามสูตร B ในตารางที่ 3.1 ซึ่งมีการบดผสมร่วมกับยาง ENR ในปริมาณ 10 phr เรียกการบดประเภทนี้ว่า “แบบที่ใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน”

สมบัติการคงรูป :

เมื่อพิจารณาเวลาในการขึ้นรูปของคอมพอสิตแบบที่ใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน ดังแสดงในรูปที่ 4.26 และตารางที่ 4.4 สำหรับ แร่ดินเหนียว montmorillonite เมื่อเปรียบเทียบกับที่ปรับสภาพผิวด้วย octadecylamine แล้ว ปรากฏว่า เมื่อใส่ยาง ENR เป็นตัวประสานแล้วเวลาที่ยางเริ่มคงรูปและเวลาในการขึ้นรูปของยางคอมพอสิตทุกสูตรมีค่าลดลงจากที่ไม่ได้ใส่ตัวประสาน เมื่อเปรียบเทียบกับยางคอมพอสิตแบบปกติ เนื่องจากจากหมู่ epoxy ที่เกิดจากการเติมยาง ENR ไปเป็นตัวประสาน ช่วยทำให้ปฏิกิริยาการคงรูปของยางคอมพอสิตเร็วขึ้น (Poh, Ismail, Quah, & Chin, 2001)

รูปที่ 4.26

ผลเวลาในการขึ้นรูปของยางคอมพอสิตแบบที่มียาง ENR เป็นตัวประสาน
เปรียบเทียบกับยางคอมพอสิตแบบปกติ



ตารางที่ 4.5

สมบัติการคงรูปของยางคอมพोजิตแบบที่มียาง ENR เป็นตัวประสาน ที่อุณหภูมิ 180°C

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

หมายเหตุ # นิยามของ t_2 และ t_{90} เหมือนในรูปที่ 3.9 ในบทที่ 3 ΔT = ผลต่างระหว่างแรงบิดสูงสุด ($T_{\max}$) และแรงบิดน้อยสุด ($T_{\min}$)

มีหน่วยเป็น dNm

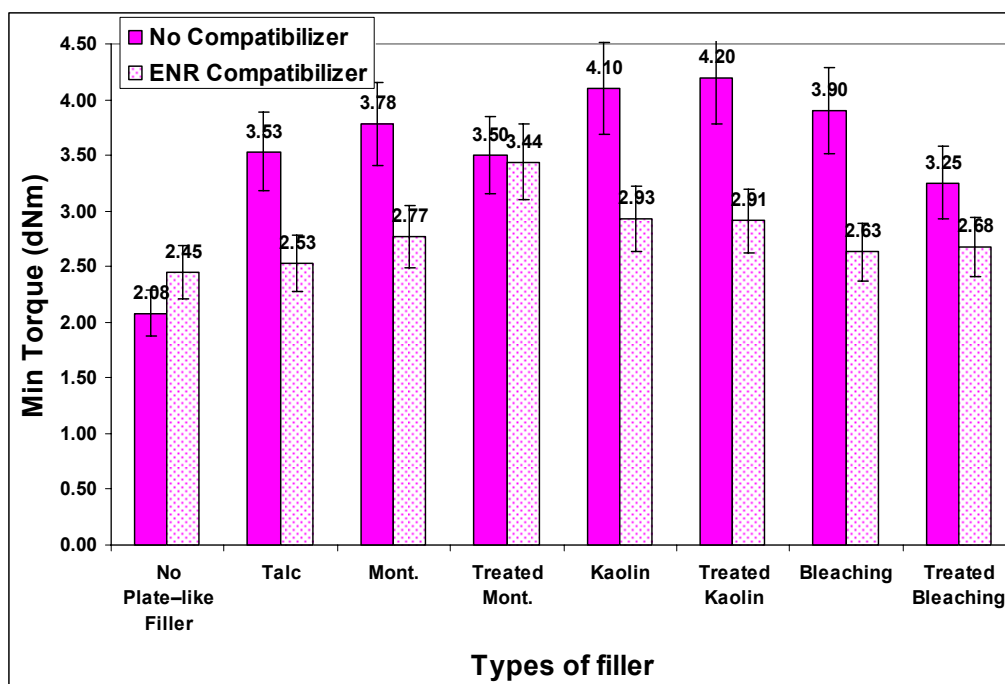
ค่าในวงเล็บ () คือ สมบัติการคงรูปเมื่อไม่มียาง ENR เป็นตัวประสาน

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

ลง เกิดแรงต้านทานต่อการไหลน้อยลง โดยยาง ENR ทำให้ค่าแรงบิดต่ำสุดลดลงได้ในคอมพอสิตของสารตัวเติมทุกชนิด

รูปที่ 4.27

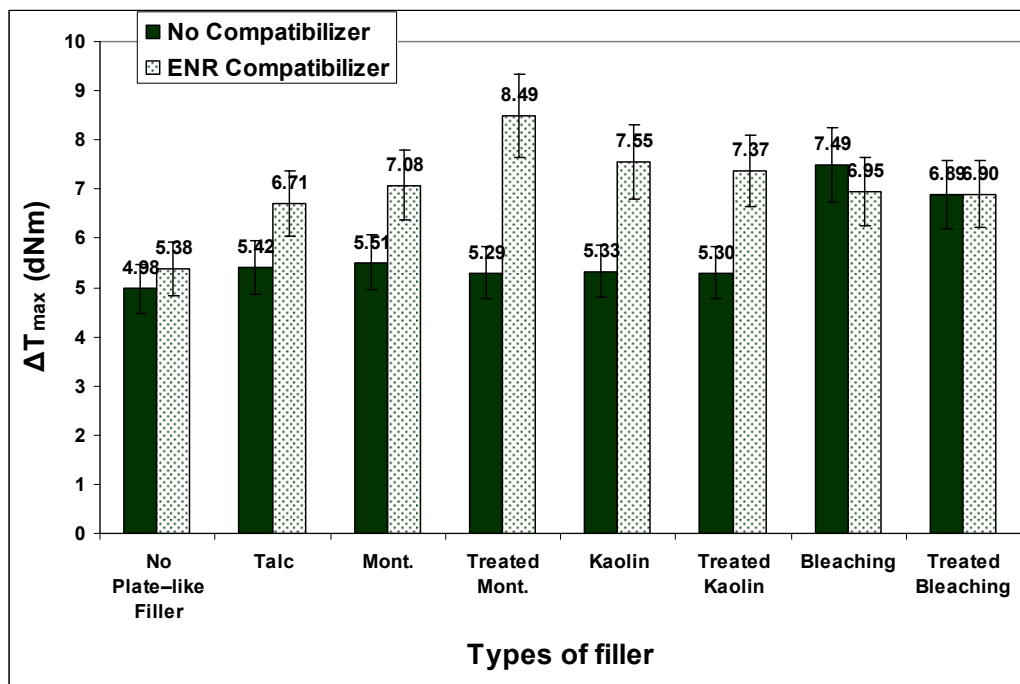
ผลค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum Torque) ของยางคอมพอสิตแบบที่ใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน เปรียบเทียบกับยางคอมพอสิตแบบปกติ



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

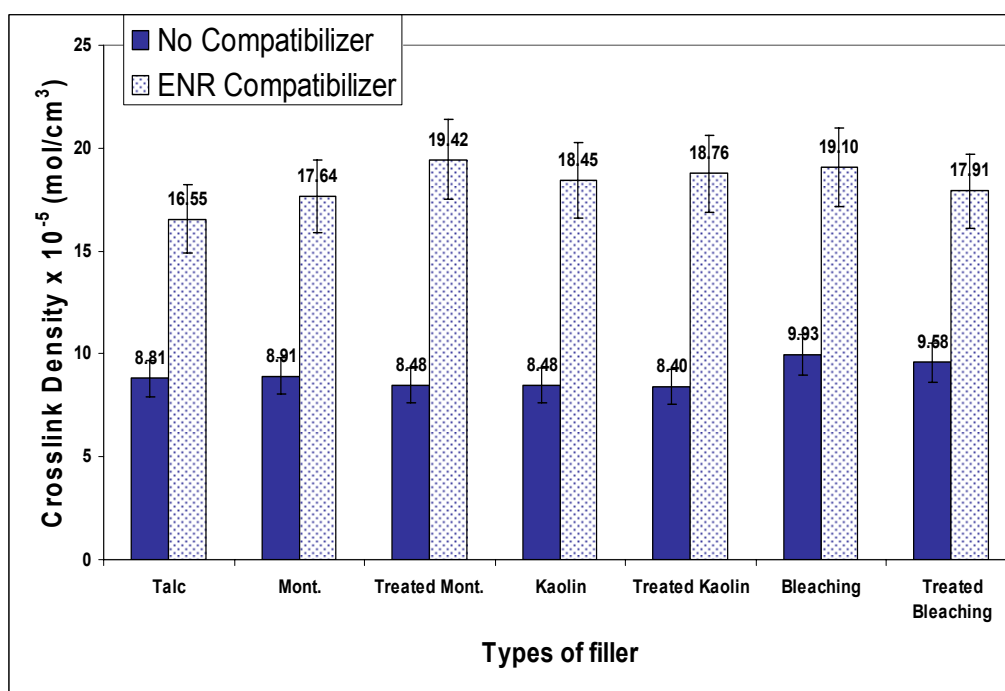
รูปที่ 4.28

ผลค่าผลต่างของแรงบิด ($\Delta T_{\max}$) ของยางคอมพอสิตแบบที่ใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน
เปรียบเทียบกับยางคอมพอสิตแบบปกติ



รูปที่ 4.29

ผลค่าปริมาณของการเชื่อมประสานของยางคอมพอสิตแบบที่ใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน
เปรียบเทียบกับยางคอมพอสิตแบบปกติ



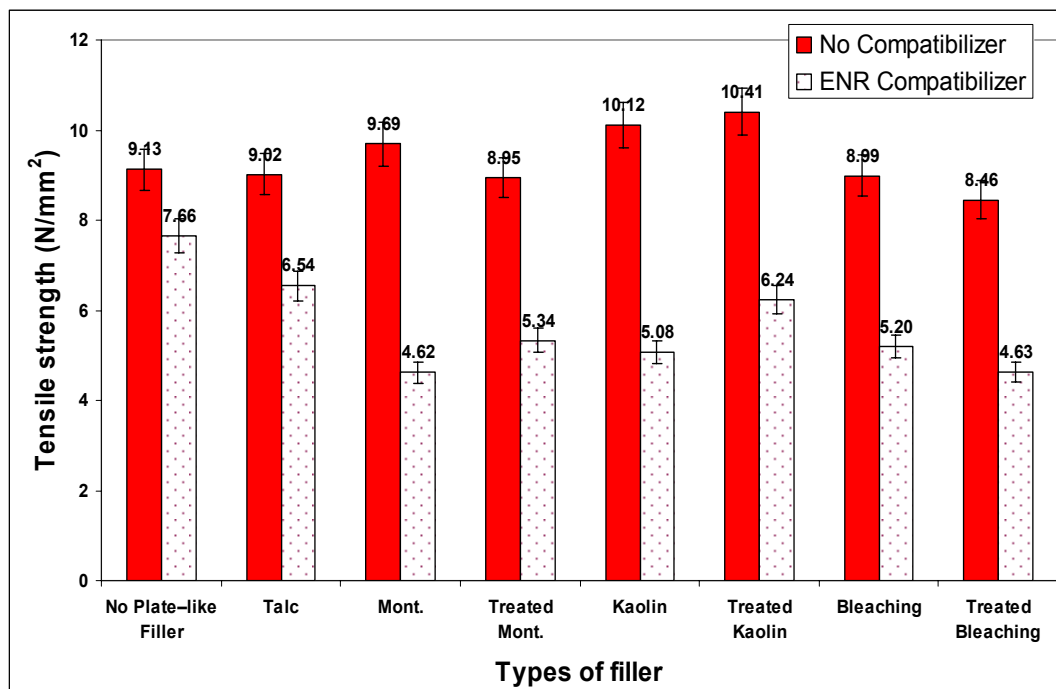
ค่าปริมาณของโครงสร้างร่างแหที่ทำการคำนวณหาโดยวิธีการวัดการบวมตัวในตัวทำละลาย (Solvent-swelling measurement) ของยางคอมพอสิตที่ใช้ยาง ENR เป็นตัวประสานเปรียบเทียบกับยางคอมพอสิตที่แบบปกติ แสดงในรูปที่ 4.29 จะเห็นได้ว่าผลที่ได้สอดคล้องกับผลต่างของค่าแรงบิดในรูปที่ 4.28 กล่าวคือ เมื่อใช้ยาง ENR เป็นตัวประสานให้กับยางคอมพอสิตทำให้มีปริมาณของโครงสร้างร่างแหเพิ่มขึ้น โดยในการวิเคราะห์วิธีนี้ พบว่า เมื่อใช้ยาง ENR ทำให้ค่าปริมาณของโครงสร้างร่างแหมีค่าสูงขึ้นในทุกตัวอย่าง อย่างไรก็ตาม การหาค่าปริมาณของโครงสร้างร่างแหโดยดูจากการบวมตัวนี้อาจวัดค่าปริมาณของโครงสร้างร่างแหของยางผสมที่ใช้ยาง ENR 10 phr ได้มากกว่าความจริงเล็กน้อย เนื่องจากยาง ENR มีความสามารถในการบวมตัวในโทลูอีนต่ำกว่ายางธรรมชาติ

สมบัติการดึงยึด :

เมื่อพิจารณาในส่วนของสมบัติเชิงกลในรูปที่ 4.30 – 4.33 พบว่า เมื่อใช้ยาง ENR เป็นตัวประสานให้กับยางคอมพอสิต ทำให้ค่าโมดูลัสของยางคอมพอสิตเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่าตัวในทุกตัวอย่าง ส่งผลให้คอมพอสิตมีความแข็งมากขึ้นและทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดและค่าการยืดตัว ณ จุดขาด มีค่าลดลงมากด้วยเช่นกัน โดยเป็นผลของยาง ENR ที่ทำให้ปริมาณของโครงสร้างร่างแหภายในยางคอมพอสิต มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งโดยปกติแล้ว เมื่อปริมาณของโครงสร้างร่างแหเพิ่มขึ้น จะทำให้ยางมีสมบัติเปลี่ยนจากแข็งยืดหยุ่นไปเป็นแข็งเปราะ เป็นผลให้ความแข็งแรง (Stiffness) ของยางมีค่าเพิ่มขึ้น แต่จะแตกหักได้ง่ายขึ้นด้วย

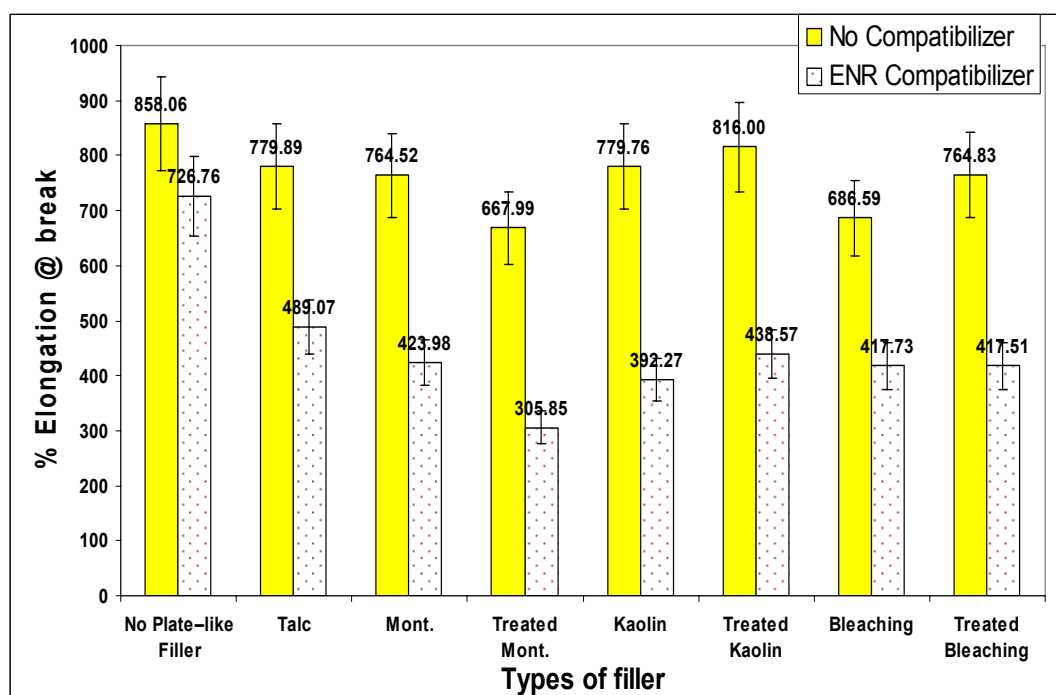
รูปที่ 4.30

ผลความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ของยางคอมพอสิต
แบบที่ใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน เปรียบเทียบกับยางคอมพอสิตแบบปกติ



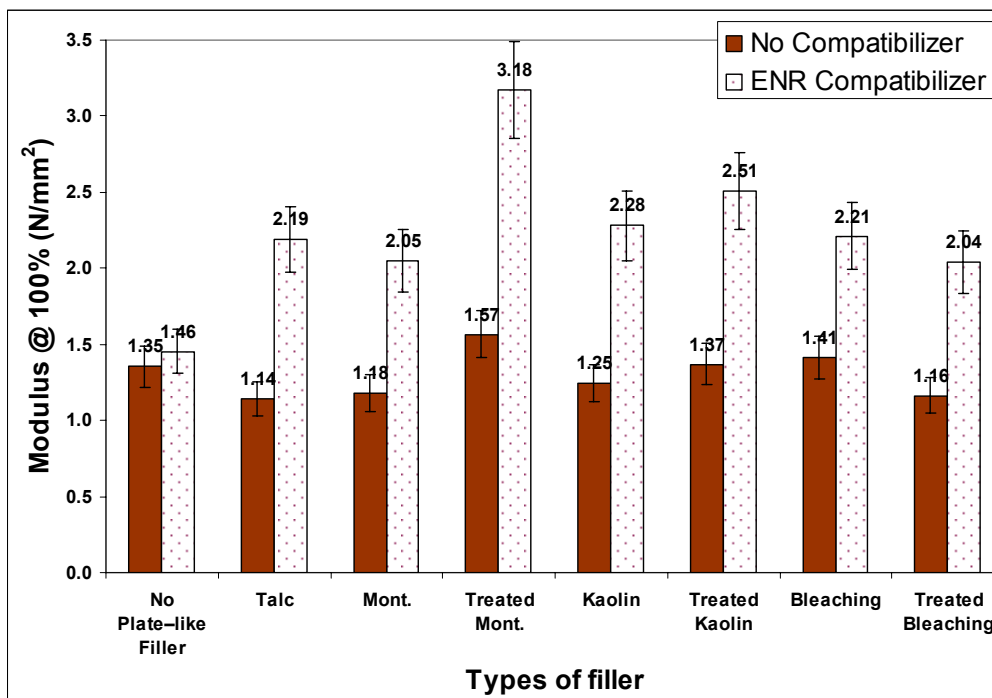
รูปที่ 4.31

ผลค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation @ break) ของยางคอมพอสิต
แบบที่ใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน เปรียบเทียบกับยางคอมพอสิตแบบปกติ



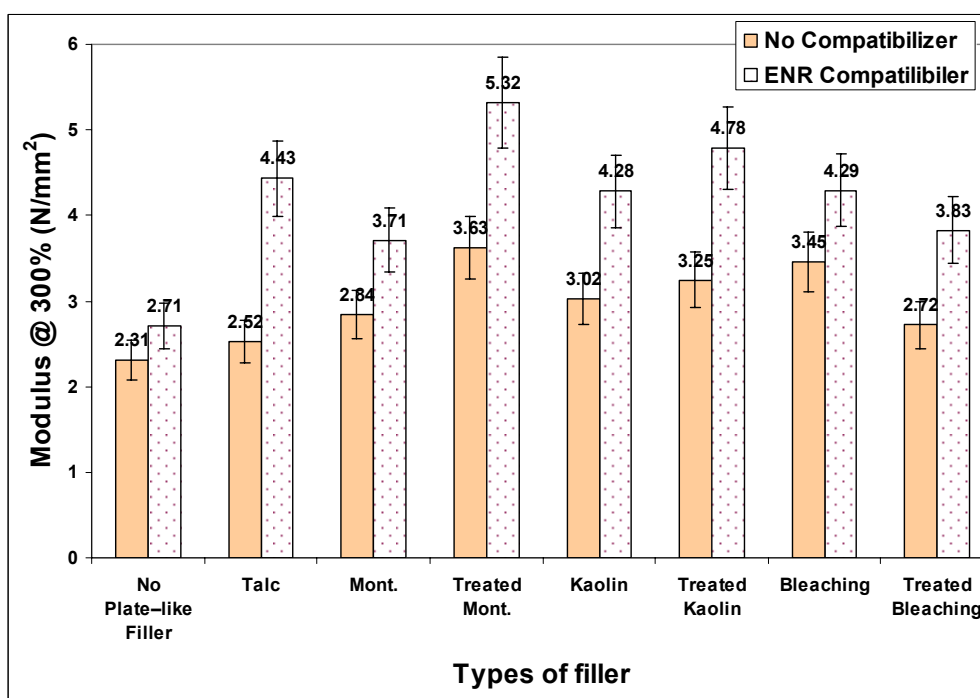
รูปที่ 4.32

ผลโมดูลัส (Modulus) ที่ความเครียด (Strain) เท่ากับ 100% ของยางคอมพอสิต
แบบที่ใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน เปรียบเทียบกับยางคอมพอสิตแบบปกติ



รูปที่ 4.33

ผลโมดูลัส (Modulus) ที่ความเครียด (Strain) เท่ากับ 300% ของยางคอมพอสิต
แบบที่ใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน เปรียบเทียบกับยางคอมพอสิตแบบปกติ



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

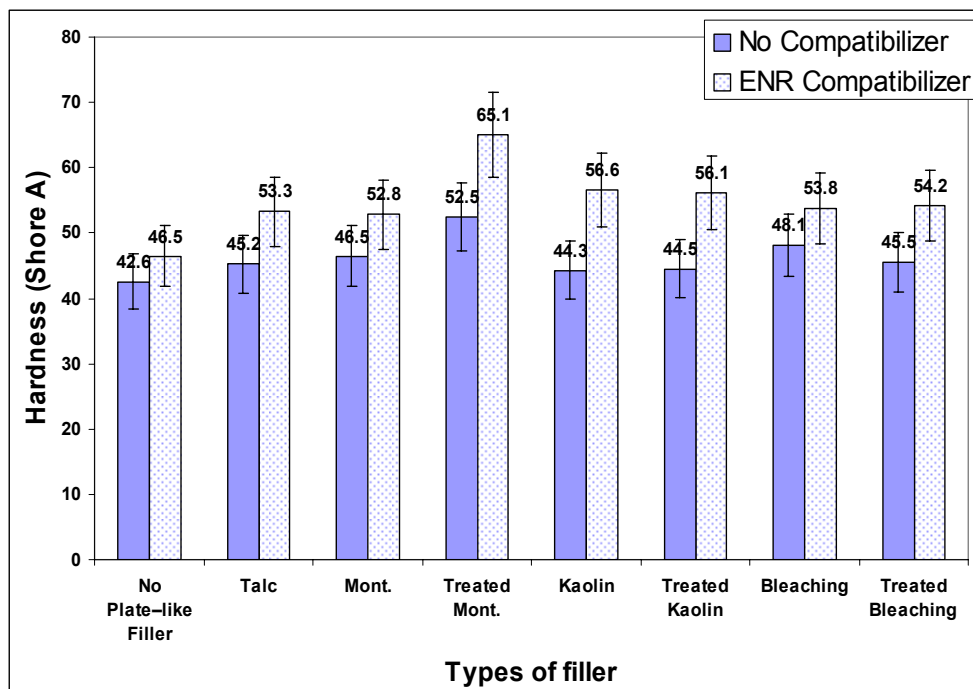
สมบัติความแข็งแรง :

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

รูปที่ 4.35 แสดงผลการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (Compression Set) ของยางคอมพอสิตแบบที่มียาง ENR เป็นตัวประสาน เมื่อเปรียบเทียบกับยางคอมพอสิตแบบปกติ จะเห็นได้ว่า เมื่อใช้สารตัวเติมแบบแผ่นจะทำให้ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่ใช้สารตัวเติมแบบแผ่น (No Plate-like Filler) อีกทั้งเมื่อมีการใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน จะมีค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอมพอสิตที่ไม่ได้ใช้ตัวประสานทุกตัวอย่าง แสดงถึงว่า การเติมยาง ENR ทำให้ ยางคอมพอสิตเกิดความเสถียรของพันธะยางกับสารตัวเติมเพิ่มมากขึ้น เป็นผลให้การยุบตัวเนื่องจากแรงอัดจึงลดลง (Lewis et al., 2003)

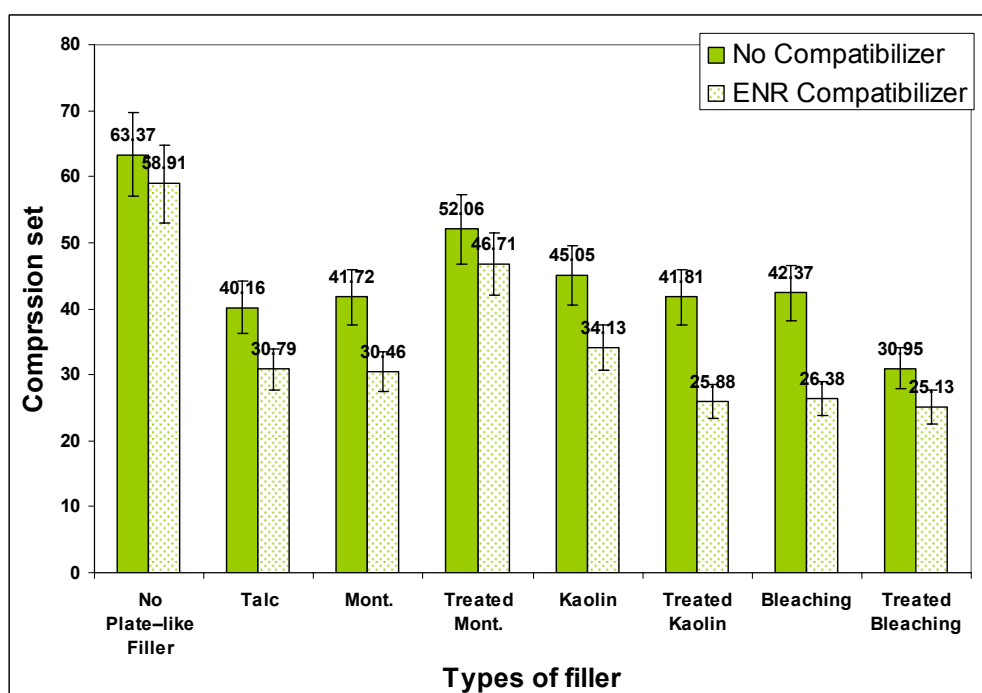
รูปที่ 4.34

ผลความแข็งแรงที่ผิวของยางคอมพอลิธแบบที่ใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน
เปรียบเทียบกับยางคอมพอลิธแบบปกติ



รูปที่ 4.35

ผลการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของยางคอมพอลิธแบบที่มียาง ENR เป็นตัวประสาน
เปรียบเทียบกับยางคอมพอลิธแบบปกติ

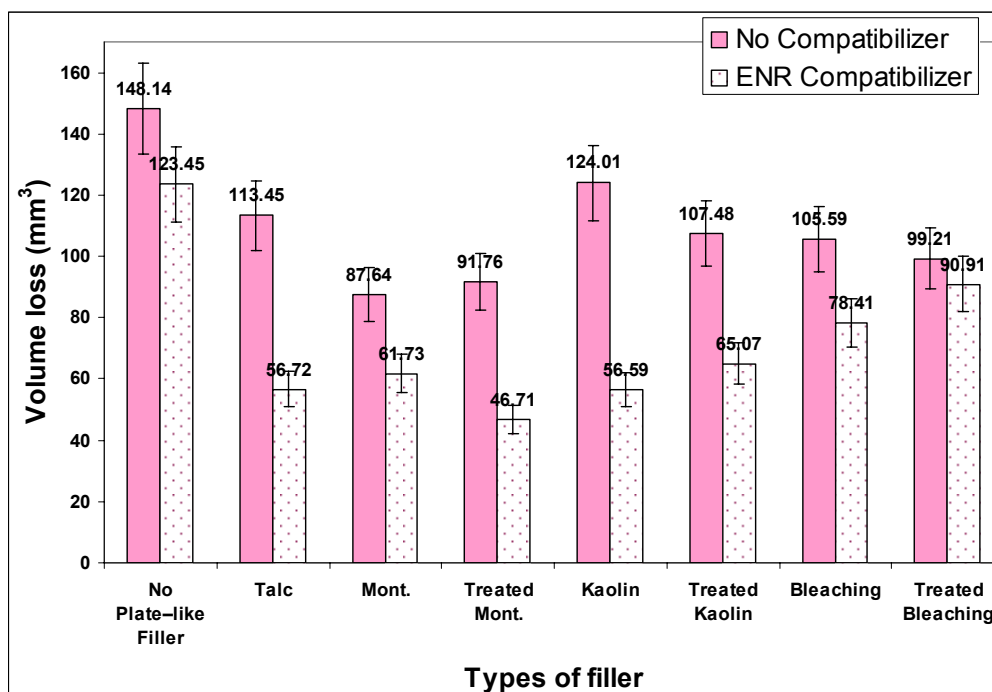


สมบัติด้านอื่นๆ :

รูปที่ 4.36 แสดงผลความทนทานต่อการสึกหรอ (Abrasion Resistance) ของยางคอมพอสิตแบบที่ใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน เมื่อเปรียบเทียบกับยางคอมพอสิตแบบปกติ จะเห็นได้ว่า ยางคอมพอสิตที่มียาง ENR เป็นตัวประสาน จะมีค่าความทนทานต่อการสึกหรอที่ดีขึ้นทุกตัว โดยยางคอมพอสิตที่ใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน และใช้สารตัวเติมแร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ปรับปรุงสภาพผิวแล้ว (Treated Mont.) มีค่าความทนทานต่อการสึกหรอที่ดีที่สุด โดยการใช้ยาง ENR เป็นตัวประสานสามารถช่วยปรับปรุงการทนทานต่อการสึกหรอของคอมพอสิตของแร่ดินเหนียว kaolinite (Kaolin) ได้ดีที่สุดในแง่ของคอมพอสิตของแป้งทัลคัม (Talc) แต่ส่งผลน้อยต่อคอมพอสิตของแร่ดินเหนียวขัดสี (Bleaching) ซึ่งสอดคล้องกับความหนาแน่นของโครงสร้างร่างแหเช่นเดียวกัน ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่าถ้าต้องการให้ยางคอมพอสิตมีคุณสมบัติเด่นในด้านความทนทานต่อการสึกหรอ นอกจากที่จะสามารถใช้สารตัวเติมแร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ปรับปรุงสภาพผิวแล้ว การเติมยาง ENR ก็ช่วยได้เช่นกัน

รูปที่ 4.36

ปริมาณการสึกหรอของยางคอมพอสิตแบบที่ใช้ยาง ENR เป็นตัวประสานเปรียบเทียบกับยางคอมพอสิตแบบปกติ ในการทดสอบการต้านการสึกหรอ



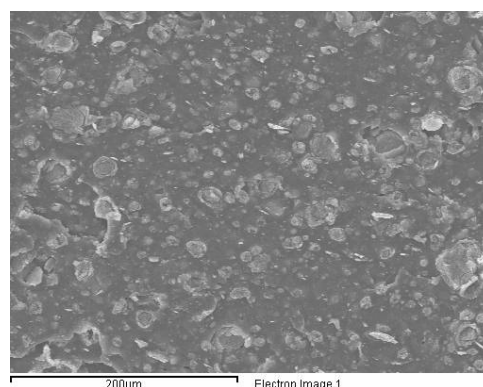
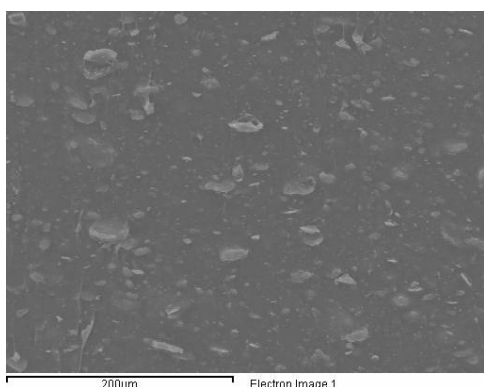
และจากการพิจารณาภาพถ่าย SEM ของยางคอมพอสิต เมื่อใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน เปรียบเทียบกับเมื่อไม่ใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน ดังแสดงในรูปที่ 4.37 พบว่าการใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน ช่วยให้เกิดการกระจายตัวของสารตัวเติมที่ดีขึ้น เกิดการรวมกลุ่มก้อนของสารตัวเติมน้อยลง ทำให้ มีผิวสัมผัสของสารตัวเติมกับยางที่ดีขึ้น มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับค่าโมดูลัสที่สูงขึ้นมากและความต้านทานการสึกหรอที่ดีขึ้น ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

รูปที่ 4.37

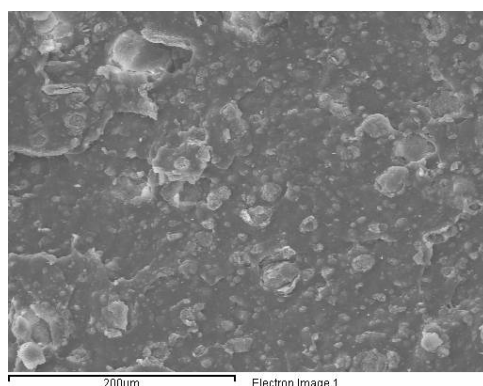
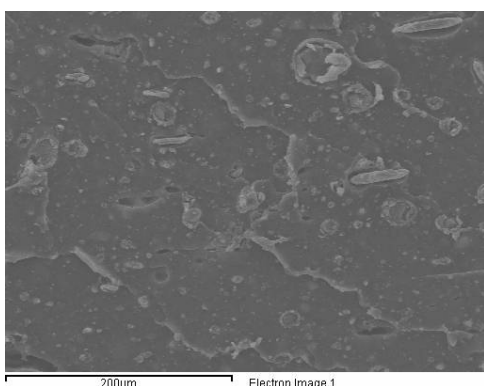
ภาพถ่ายพื้นที่ผิวหักของยางคอมพอสิตแบบปกติ เปรียบเทียบกับที่ใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน และมีสารตัวเติมเป็น (a) แป้งทัลคัม (b) แร่ดินเหนียว montmorillonite (c) แร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว (d) แร่ดินเหนียว kaolinite (e) แร่ดินเหนียว kaolinite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว โดยใช้ SEM

ไม่ใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน

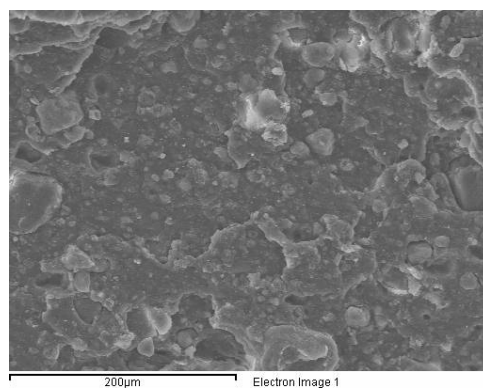
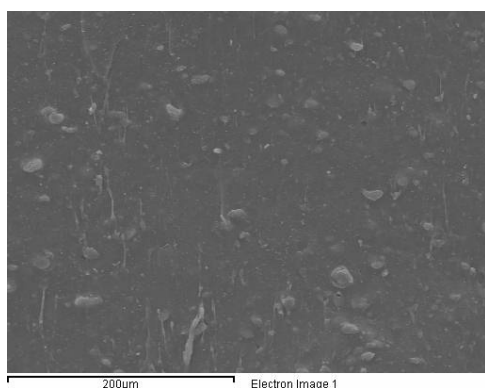
ใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน



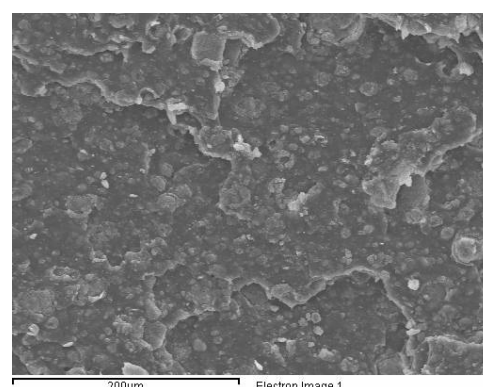
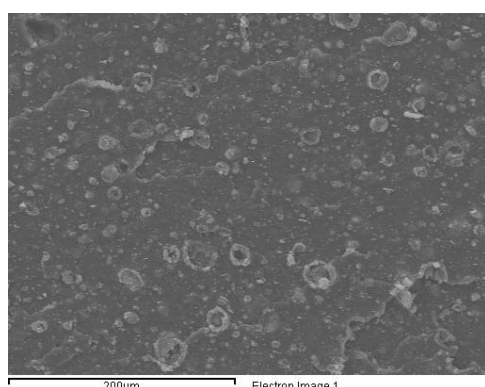
(a) แป้งทัลคัม



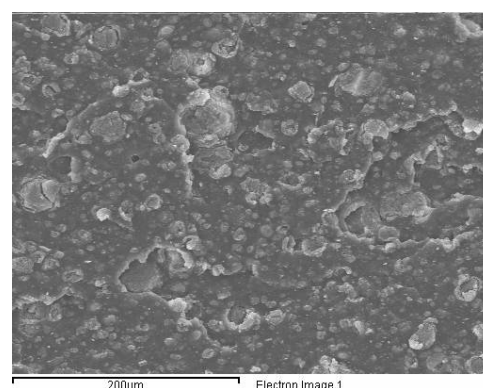
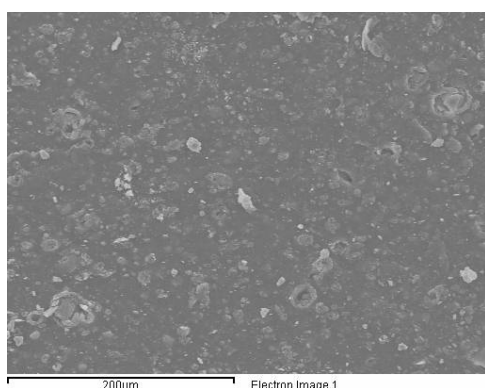
(b) แร่ดินเหนียว montmorillonite



(c) ออแกนโนเคลย์ของแร่ดินเหนียว montmorillonite



(d) แร่ดินเหนียว kaolinite



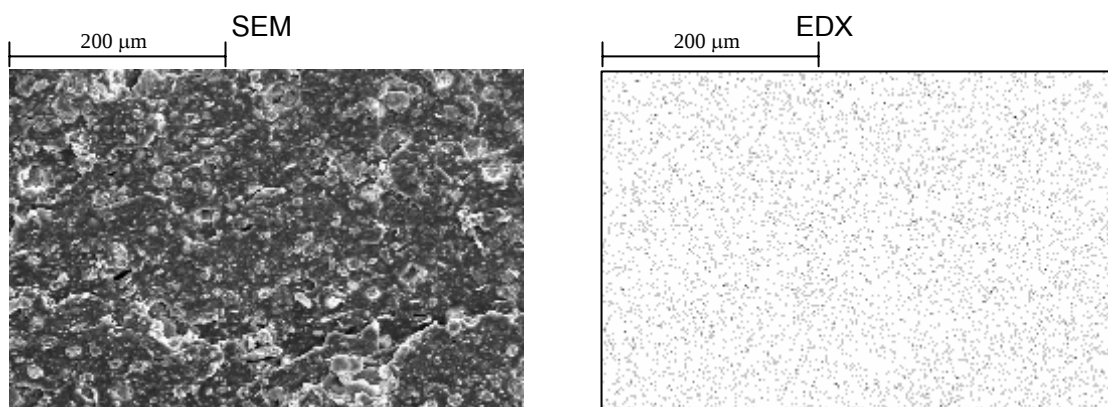
(e) ออแกนโนเคลย์ของแร่ดินเหนียว kaolinite

พิจารณาภาพถ่าย SEM ของยางคอมพอสิต ควบคู่กับเทคนิคจุลวิเคราะห์โดยทดสอบด้วยเครื่อง Energy Dispersive Spectroscopy X-Ray (EDX) ดังแสดงในรูปที่ 4.38 พบว่า เมื่อใช้ยาง ENR เป็นตัวประสานทำให้ โบรมินที่อยู่ในยางโบรโมบิวไทล์ มีการกระจายที่ดีในทุกๆ ตัวอย่างของยางคอมพอสิต เช่นเดียวกับกรณีที่ไม่ใส่ยาง ENR

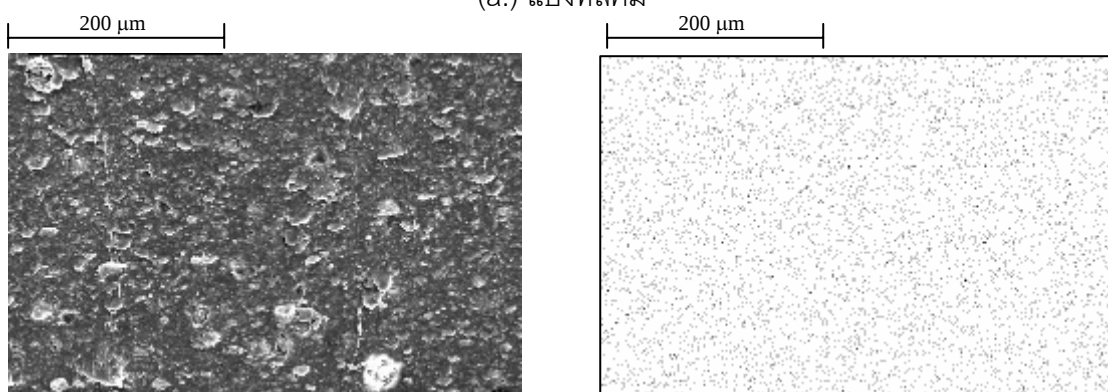
รูปที่ 4.38

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

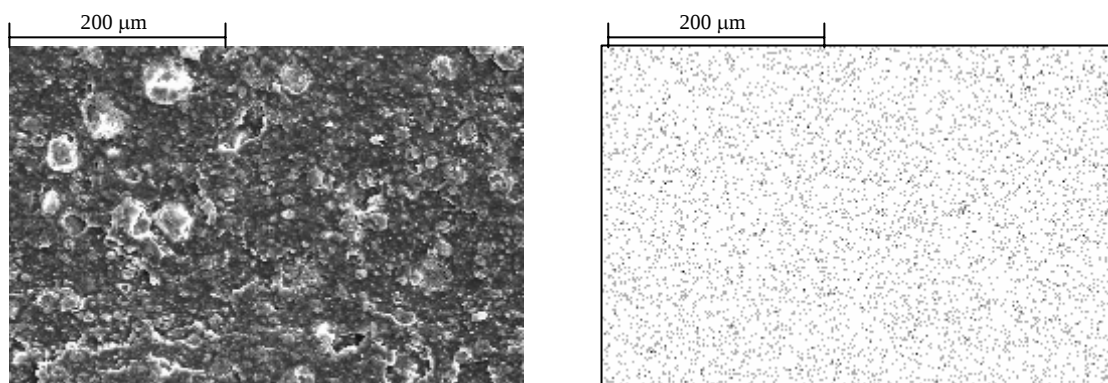
(b.)



(a.) แป้งทัลคัม



(b.) แร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว



(c.) แร่ดินเหนียว kaolinite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว

4.6 ผลของสารตัวเติมและตัวประสาน ENR ต่อสมบัติการซึมผ่านของก๊าซของ ยางคอมพอสิต

เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการทดสอบการซึมผ่านของก๊าซมีราคาสูงมาก ดังนั้น เพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย เมื่อได้รับผลของการทดสอบสมบัติในด้านต่างๆของยางคอมพอสิต ตามที่กล่าวไปข้างต้นแล้ว สรุปได้ว่า ยางคอมพอสิตที่สมควรจะนำไปทดสอบทดสอบการซึมผ่านของก๊าซ คือ ยางคอมพอสิตของยางโบรโมบิวไทล์อย่างเดียวยังไม่ได้ผสมยางธรรมชาติและไม่ได้มีการใช้สารตัวเติมชนิดใดเลย เพื่อเป็นการเปรียบเทียบว่าเมื่อมีการผสมยางธรรมชาติและการใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ แล้วมีผลต่อการซึมผ่านของก๊าซอย่างไรบ้าง รวมทั้ง ยางคอมพอสิตแบบปกติที่ไม่มีการเติมสารตัวเติมแบบแผ่นชนิดใดเลย และที่ใช้สารตัวเติมเป็น

- แป้งทัลคัม เนื่องจากเป็นสารตัวเติมที่ใช้กันทั่วไป เนื่องจากมีสมบัติเด่นด้านการกักเก็บก๊าซได้ดี
- แร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว เนื่องจาก มีสมบัติที่ดีด้านความแข็งแรงที่ผิว และความทนทานต่อการสึกหรอ
- แร่ดินเหนียว kaolinite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว เนื่องจาก มีสมบัติที่ดีด้านความทนทานต่อแรงดึงยึด

และยางคอมพอสิตแบบที่ใช้ยาง ENR เป็นตัวประสาน ที่ไม่มีการเติมสารตัวเติมแบบแผ่นชนิดใดเลย และที่ใช้สารตัวเติมเป็น

- แป้งทัลคัมคัล เนื่องจากเป็นสารตัวเติมที่ใช้กันทั่วไป เนื่องจากมีสมบัติเด่นด้านการกักเก็บก๊าซได้ดี
- แร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ปรับสภาพผิวแล้ว เนื่องจาก มีสมบัติที่ดีด้านความแข็งแรงที่ผิว และความทนทานต่อการสึกหรอ

ผลการวัดการซึมผ่านของก๊าซของยางคอมพอสิต ดังแสดงในรูปที่ 4.39 จะเห็นได้ว่า คอมพอสิตของยางยางโบรโมบิวไทล์อย่างเดียวย (BIIR) มีค่าการซึมผ่านของก๊าซดีที่สุด เมื่อบดผสมร่วมกับยางธรรมชาติ (BIIR & NR) ทำให้ ค่าการซึมผ่านของก๊าซแยกลง 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 เนื่องจาก ยาง ENR มีความมีขั้วสูงกว่าแป้งทัลคัม จึงไม่ส่งผลทางบวกต่อการกักเก็บก๊าซ

ในขณะที่ ยางคอมพอสิตที่เหลือ ได้แก่ ยางคอมพอสิตแบบปกติที่มีสารตัวเติมเป็นแร่ดินเหนียว montmorillonite และแร่ดินเหนียว kaolinite ที่ปรับปรุงสภาพผิวแล้วนั้น (BIIR & NR – Treated Mont. และ Kaolin.) สามารถกักเก็บก๊าซได้ดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเติมสองชนิดแรก นอกจากนี้ยังพบว่า การบดผสมร่วมกับยาง ENR สามารถช่วยลดการซึมผ่านของก๊าซของยางคอมพอสิตที่มีสารตัวเติมเป็นแร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ปรับปรุงสภาพผิวแล้ว (BIIR & NR & ENR – Treated Mont.) ได้เล็กน้อย เนื่องจากยาง ENR ช่วยให้เกิดการกระจายตัวและผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวและยางที่ดีขึ้น

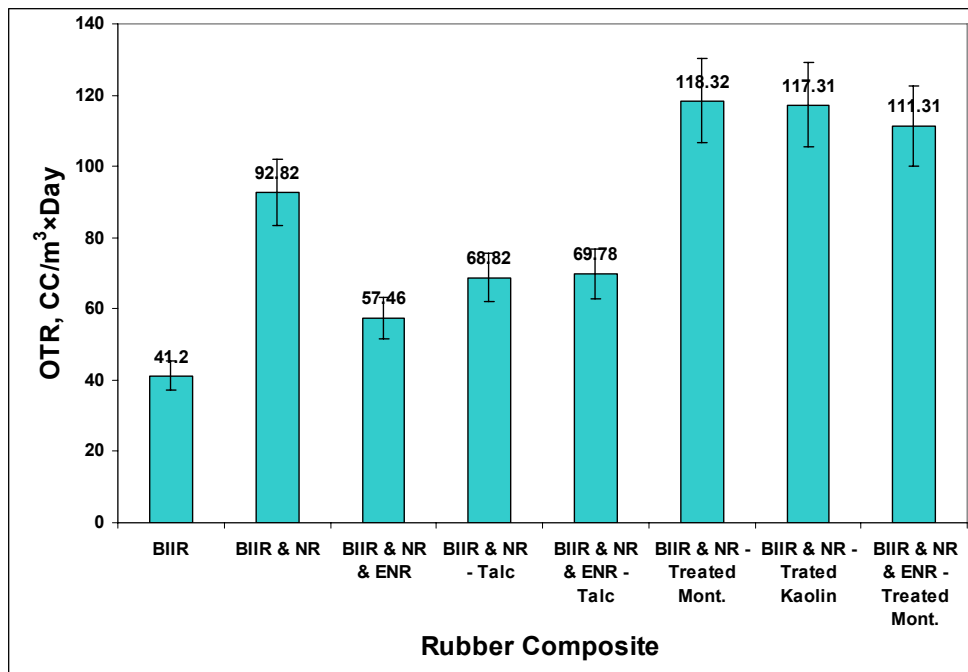
ถึงแม้ว่า แป้งทัลคัมคัล (Talc) จะมีความสามารถในการกักเก็บก๊าซได้ดี แต่ทว่า ในด้านความแข็งแรง (Hardness) และการทนทานต่อการขัดสี (Abrasion) ไม่ดีเท่ากับแร่ดินเหนียว montmorillonite ที่ปรับปรุงสภาพผิวแล้ว และความต้านทานต่อการดึงยืด (Tensile) ไม่ดีเท่ากับแร่ดินเหนียว kaolinite ที่ปรับปรุงสภาพผิวแล้ว เช่นกัน

4.7 ราคาต่อหน่วยของสูตรยางต่างๆที่ศึกษาในงานวิจัยนี้

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

รูปที่ 4.39

ผลการซึมผ่านของก๊าซของยางคอมพอสิต



ตารางที่ 4.6

ราคาต่อหน่วยของสูตรยางต่างๆ ใน 1 กิโลกรัม

สูตรยาง (ไม่รวมค่าสารเคมีต่างๆที่ใช้เหมือนกัน)	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 มีการปรับปรุงสูตรของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางโบริโมบิวไทล์โดยใช้สารตัวเติมชนิดที่ต่างกัน 4 ชนิด รวมทั้งมีการปรับสภาพผิวของสารตัวเติมและการใช้ยาง ENR เป็นตัวประสานอีกด้วย จากการทดลอง พบว่า สมบัติของยางคอมพอสิตแต่ละสูตรมีลักษณะเด่นที่ต่างกัน ดังนั้น ผู้วิจัยจึงลองทำการประยุกต์สมบัติของยางคอมพอสิตที่ได้กับผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง 3 ชนิด ดังนี้

➤ ยางในลูกฟุตบอล

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

➤ ยางในรถยนต์

ยางของรถยนต์ก็มีลักษณะคล้ายกับยางในของลูกฟุตบอล แต่ต้องสมบัติของยางรถยนต์นั้น ต้องมีความทนทานต่อการรับแรงที่มากกว่า ดังนั้น สูตรยางที่แนะนำ คือ ยางคอมพอสิตที่มีสารตัวเติมเป็นแป้งทัลคัม เพราะว่ามีสมบัติในการต้านทานการซึมผ่านของก๊าซได้ดี ($57.46 \text{ CC/m}^3 \cdot \text{Day}$) ร่วมกับแร่ดินเหนียว kaolinite ทั้งก่อนและหลังการปรับสภาพผิวแล้ว เพราะมีความทนทานต่อแรงดึงที่ดีที่สุด เท่ากับ 10.12 และ 10.41 N/mm^2 ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเติมทั้ง 4 ชนิด

➤ ดอกยาง

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