



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การปรับปรุงสมบัติเชิงกล สมบัติการไหล การสุกตัว การต้านทานการเปลี่ยน
สีของยางธรรมชาติโดยสารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร

โดย ดร. ระพีพันธ์ แดงตันกี และคณะ

พฤษภาคม 2553

สัญญาเลขที่ RDG5250031

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การปรับปรุงสมบัติเชิงกล สมบัติการไหล การสึกตัว การต้านทานการเปลี่ยนสีของ
ยางธรรมชาติโดยสารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร

คณะผู้วิจัย

สังกัด

ดร. ระพีพันธ์ แดงตันกี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
นาย ศักดิ์ชัย สมเชื้อ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
นางสาว สุธารัตน์ เจริญสุขใจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
นางสาว สุนันทา คงบุญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ชุดโครงการวิจัยแห่งชาติ : ยางพารา

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปรายงานสำหรับผู้บริหาร

ชื่อโครงการ การปรับปรุงสมบัติเชิงกล สมบัติการไหล การสุกตัว การต้านทานการเปลี่ยนสีของยางธรรมชาติ
โดยสารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร
(Improvement of mechanical properties rheological properties curing properties and anti-
colorless properties of NR filled with nano TiO_2)

ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงาน และ ที่อยู่

ชื่อ สกุล ดร. ระพีพันธ์ แดงตันกี

หน่วยงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ที่อยู่ ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
พระนครเหนือ 1518 ถ.พิบูลสงคราม บางซื่อ กทม. 10800

โทรศัพท์/โทรสาร 02-9132500-24 ext. 1558/ 02-5561306

E-mail rdg@kmutnb.ac.th

นักศึกษาที่ร่วมวิจัย

1. นาย ศักดิ์ชัย สมเชื้อ
2. นางสาว สุภารัตน์ เจริญสุขใจ
3. นางสาว สุนันทา คงบุญ

ปัญหาที่ทําวิจัยและความสำคัญ

การผลิตผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารเติมแต่งนั้น ความสามารถในการกระจายตัวในการผสมของไทเทเนียมไดออกไซด์และสมบัติการไหลของยางธรรมชาติที่เปลี่ยนไปตลอดจนสมบัติเชิงกล การสุกตัวและการต้านทานการเปลี่ยนสีของยางเมื่ออยู่ในสภาวะภูมิอากาศภายนอกเป็นคุณสมบัติที่มีความจำเป็น ดังนั้นแนวคิดในการทำวิจัยนี้จึงเป็นการผสมระหว่างคุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์และยางธรรมชาติให้เกิดประโยชน์สูงสุดซึ่งไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถทำให้มีอนุภาคเล็กลงในระดับนาโนได้ นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์มีพื้นผิวเพิ่มขึ้นอย่างมากซึ่งทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเพิ่มประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดำแสง (photo catalyst) เนื่องจากมีรีดอกซ์โพเทนเชียลเพิ่มขึ้นนั่นเอง จากสมบัติและประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นเมื่อไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถทำให้มีอนุภาคขนาดเล็กลงในระดับนาโนเมตร การนำไปปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติจึงเป็นสาเหตุให้ต้องมีการวิจัยและพัฒนาโดยมุ่งให้นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดประโยชน์สูงสุด

วัตถุประสงค์

เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของยางธรรมชาติโดยใช้สารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรโดยหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตยางธรรมชาติที่ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และปรับปรุงสมบัติเชิงกล สมบัติการไหล การสุกตัว การต้านทานการเปลี่ยนสีของยาง

ผลการดำเนินงาน

ผลการดำเนินงาน พบว่าสมบัติเชิงกลของยางเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์และพบว่าขนาดอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์มีผลต่อสมบัติเชิงกลของยางกล่าวคือ อนุภาคเล็กลงถึงขนาดนาโนเมตรทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าขนาดอนุภาคระดับไมโครเมตร และจากผลการศึกษาด้านการเปลี่ยนสีของยางธรรมชาติพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์จะทำให้มีค่าความเข้มสีที่ลดลง ซึ่ง

ไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรจะช่วยยืดอายุการใช้ของยางธรรมชาติในสภาวะภายนอกอาคารได้ดีขึ้น ปริมาณที่เหมาะสมที่สุดของการใช้สารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ คือ 5 phr และขนาดอนุภาคที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง คือสารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 50 นาโนเมตร จะทำให้ได้ยางธรรมชาติที่ป้องกันการเสื่อมสภาพจากแสงแดดและยังช่วยยืดอายุการใช้งานของยางธรรมชาติ

สรุปผลการวิจัย

จากการนำยางธรรมชาติมาผสมสารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรและไมโครเมตร พบว่าสารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรที่ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 50 นาโนเมตรเหมาะสมกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับไมโครเมตร เนื่องจากเมื่อนำมาทดสอบด้วยเครื่องวัดความหนืดหมุนนี้, เครื่องวัดค่าความทนต่อแรงดึง, เครื่องวัดความแข็งและเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์จะให้ค่าที่ดีและเหมาะสมกับการใช้งานมากกว่า

ข้อเสนอแนะที่คาดว่าจะควรวิจัยเพิ่มเติม และวิธีที่ควรพัฒนาต่อยอดสู่ภาคปฏิบัติ

1. วิเคราะห์หาชนิดของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณสมบัติของสารประกอบยางธรรมชาติ
2. ควรมีการทดสอบสภาวะการใช้งานจริงในแสงแดดปกติ
3. ควรมีการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้งานจริง เช่น กระเบื้องยางที่โดนแสงแดดส่องถึงหรือยางรองพื้นภายนอกอาคาร เป็นต้น

ผลงานทางวิชาการที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

วารสารทางวิชาการในระดับชาติหรือนานาชาติอย่างน้อย 1 ฉบับ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงสมบัติเชิงกล สมบัติการไหล การสึกตัว การต้านทานการเปลี่ยนสีของยางธรรมชาติโดยสารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร โดยใช้เครื่องผสมแบบเปิดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนผสมของยางธรรมชาติต่อปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้มีค่าเท่ากับ 5 , 10 และ 20 phr ตามลำดับ นำชิ้นงานที่เตรียมได้แต่ละอัตราส่วนมาศึกษาสมบัติเชิงกล การไหล การสึกตัว การต้านทานการเปลี่ยนสี ผลการศึกษาพบว่าสมบัติเชิงกลและความเหนียวนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์และพบว่าขนาดอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์มีผลต่อสมบัติเชิงกลของยางยิ่งมีอนุภาคเล็กลงถึงขนาดนาโนเมตรทำให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าขนาดอนุภาคระดับไมโครเมตร และจากผลการศึกษาการต้านทานการเปลี่ยนสีของยางธรรมชาติพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์จะทำให้มีค่าความเข้มสีที่ลดลง ซึ่งไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรสามารถต้านทานการเปลี่ยนสีจากแสงยูวีได้ดีกว่า ดังนั้นจึงช่วยยืดอายุการใช้ของยางธรรมชาติในสภาวะภายนอกได้ดีขึ้น

Abstract

The research was aimed to study mechanical, rheological curing and anti-decolourant properties of NR filled with nano TiO_2 . Firstly, rubber and fillers were fed in to two roll mill at 60°C . The ratios of TiO_2 were 5, 10, 20 phr respectively. The results showed that nano TiO_2 particles filled with NR have greater mechanical and rheological properties than those filled micro particles. Also, The nano particles TiO_2 filled with NR exhibited greater anti-decolourant. As a results, it could be suggested that nano particle TiO_2 have improved anti-UV property and could be increased shelf life of NR.

เนื้อหา

ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

อุตสาหกรรมการแปรรูปยางธรรมชาติในประเทศไทยเป็นอุตสาหกรรมที่ต่อเนื่องจากการผลิตวัตถุดิบยางธรรมชาติ ดังนั้นการพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพในการแข่งขันจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่สามารถสะท้อนไปสู่วัตถุดิบยางธรรมชาติภายในประเทศ เป็นที่ทราบกันดีว่าการผลิตผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติจำเป็นต้องมีการเติมแต่งปรับปรุงคุณสมบัติของยาง เช่น สารเสริมแรง สารป้องกันการเสื่อมสภาพ สารป้องกันความร้อนเป็นต้น ในบรรดาสารปรับแต่งคุณสมบัติของยาง สารเคมีที่นิยมใช้กับยางในปัจจุบันคือไทเทเนียมไดออกไซด์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นสารที่ค้นพบครั้งแรกโดย วิลเลียม เกรเจอร์ ในปี 1791 มีลักษณะทางกายภาพถือเป็นสารสีขาวทึบแสง มีคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดำแสงและต้านทานเชื้อแบคทีเรียได้ ซึ่งในปัจจุบันเป็นวัตถุดิบหลักใน เครื่องสำอางค์ ครีมกันแดด สบู่ ยาสีฟัน สารให้สีขาว การใช้งานไทเทเนียมไดออกไซด์ในสูตรยางปัจจุบันมุ่งเน้นเป็นสารปรับแต่งให้ยางธรรมชาติมีสีขาว ด้วยเทคโนโลยีปัจจุบันไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถทำให้มีขนาดอนุภาคเล็กลงในระดับนาโนได้ คุณสมบัติของนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์มีพื้นผิวเพิ่มขึ้นอย่างมากทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดำแสง (photo catalyst) จากสมบัติและประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นจึงต้องมีการวิจัยและพัฒนาโดยมุ่งให้นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดประโยชน์สูงสุดเมื่อใช้ในผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติซึ่งคาดหวังว่ายางธรรมชาติที่เติมนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์จะปรับปรุงสมบัติการไหล สมบัติทางกล รวมทั้งการซีดจางลงเมื่ออยู่ในสภาวะภูมิอากาศภายนอกของผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติได้

วัตถุประสงค์

1. เพื่อหาขั้นตอนและวิธีการผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรและไมโครเมตรลงในยางธรรมชาติ
2. เพื่อศึกษาถึงปริมาณที่เหมาะสมในการเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรและไมโครเมตรในการปรับปรุงสมบัติเชิงกล สมบัติการไหลและการสึกดัวในยางธรรมชาติ

3. เพื่อปรับปรุงสมบัติการเปลี่ยนสีหรือการซีดจางลงของยางเมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมภายนอกโดยเปรียบเทียบระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรและไมโครเมตร
4. เพื่อศึกษาขนาดอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล สมบัติการไหล การสึกตัวและการเปลี่ยนสีหรือซีดจางลงของยางธรรมชาติ

ทฤษฎี แนวคิดในการวิจัยและผลงานที่เกี่ยวข้อง

แนวทางในการผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ลงในยางธรรมชาติจากเอกสารที่สืบค้น พบว่า การผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ลงในยางธรรมชาติเตรียมได้ด้วยวิธีไฮโดรไลซิสของไทเทเนียมเตตระไอโซพอกไซด์ (TiOP) ผสมลงใน Poly(ethylene oxide-6-amide-6) (PEBAX) ^[1] พบว่าในอัตราส่วน 80:20 ของ PEBAX : TiOP ทำให้มีความสามารถในการซึมผ่านของแก๊ส (gas permeability) ต่ำที่สุดและความสามารถในการซึมผ่านของแก๊สจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่ม TiOP จาก 20 %โดยน้ำหนัก ไปเป็น 50 %โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของ PEBAX : TiOP ยังเป็นตัวกำหนดความยืดหยุ่นแล้วความสามารถในการซึมผ่านของแก๊สยังสามารถใช้อธิบายพื้นฐานวิทยาและสมบัติเชิงกลได้อีกด้วย และยังได้มีการค้นคว้าความสามารถของไทเทเนียมไดออกไซด์และซิลิกอนไดออกไซด์ ที่มีผลต่อการปลดปล่อยความเค้น (Stress relaxation) ของยางธรรมชาติ ^[2] พบว่าการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ 20 ส่วนใน 100 ส่วนของยาง (phr) ทำให้มีการปลดปล่อยความเค้นสูงที่สุดโดยสังเกตจากความชันของเส้นกราฟการปลดปล่อยความเค้น (The Negative slopes of relaxation curves) ที่ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 20 phr มีความชัน 0.034 และซิลิกอนไดออกไซด์ 20 phr มีความชัน 0.0542 แล้วเมื่อเพิ่มปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์มากกว่า 20 phr จะส่งผลให้ค่าการปลดปล่อยความเค้นลดลง นอกจากนี้ยังได้ศึกษาใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรเพื่อเคลือบบนสภาพพื้นผิวต่าง ๆ ในปริมาณ 5-30 %โดยน้ำหนัก โดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ ^[3] พบว่าการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ 20 %โดยน้ำหนัก จะทำให้ความไม่ยืดหยุ่นสูงที่สุดและความไม่ยืดหยุ่นยังขึ้นกับสภาพพื้นผิวที่ไทเทเนียมไดออกไซด์ไปเคลือบอยู่ด้วยซึ่งความไม่ยืดหยุ่นของซิลิกอนไดออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีค่าสูงสุด รองลงมาเป็นการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรและกรดสเตียริกที่เคลือบบนไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรตามลำดับ และยังได้มีการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับการใช้ไทเทเนียมได

ออกไซด์เคลือบบนพื้นผิวของยางธรรมชาติด้วยวิธีลิวติฟิเคชัน (LPD) โดยใช้ซิลิกอนไดออกไซด์เป็นชั้นกลาง^[4] พบว่าการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนยางธรรมชาติสามารถดูดกลืนแสงยูวีได้ที่ต่ำกว่า 380 นาโนเมตรและเพิ่มการสะท้อนกลับที่ตามองเห็นอีกด้วย ตัวเร่งปฏิกิริยาดำแสงซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ช่วยในการยืดอายุการใช้งานของยางธรรมชาติ นอกจากนั้นได้ศึกษาค้นคว้าการดูดซับอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นยาง พบว่า^[5]โครงสร้างจะมีความหนาแน่นมาก ถ้าใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีอนุภาคนาโนเล็กจะมีปฏิกิริยาที่พื้นผิวดี การเร่งปฏิกิริยาดำแสงจะเกิดได้เมื่อใช้เมทิลินบลูเป็นสารที่ทำให้สีโดยที่การซึมซาบของไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นยางสามารถทำให้สารละลายเมทิลินบลูเกิดการสลายตัวได้ภายใต้สภาวะการฉายแสงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าประสิทธิภาพการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาดำแสงลดลงเมื่อใช้เมทิลินบลูในปริมาณที่ลดลง อย่างไรก็ตามการนำแผ่นยางไปซึมซาบด้วยไทเทเนียมมีประโยชน์มากกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นผง เพราะตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นแผ่นสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้และยังสามารถทำซ้ำได้

วิธีการ

เตรียมยางธรรมชาติที่ผสมสารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์

ในขั้นตอนการผสมยางกับสารเคมีในการทดลองนี้แบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือ การเตรียมยางมาสเตอร์แบทช์และการผสมยางมาสเตอร์แบทช์กับยางธรรมชาติและสารเคมีเพื่อให้ได้สัดส่วนตามต้องการ ในขั้นตอนแรกใช้เครื่องผสมแบบเปิดสองลูกกลิ้ง (Two roll mill) ที่อุณหภูมิ 60 °C นวดยางธรรมชาติเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 60 phr เป็นเวลา 3 นาที จึงนำออกจากเครื่องผสม ในขั้นตอนที่สองนำยางมาสเตอร์แบทช์ลงผสมกับยางธรรมชาติใหม่และสารเคมีในอัตราส่วนตามกำหนดใช้เวลาในการผสม 12 นาทีโดยใช้สูตรการผสมตามตารางที่ 1 สาเหตุที่ต้องทำการผสมแบบมาสเตอร์แบทช์เนื่องมาจากการทดลองผสมเบื้องต้นพบว่าการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่ดีเมื่อผสมเข้าไปแบบผสมตามอัตราส่วนที่ต้องการซึ่งสังเกตด้วยตาเปล่าได้จากสีของยางคอมพาวด์ในแต่ละจุดมีความเข้มไม่เท่ากันจึงต้องใช้การผสมแบบมาสเตอร์แบทช์ จากนั้นนำยางคอมพาวด์ที่ได้ไปทดสอบหาค่าความหนืดมูนนี่ของยางตามมาตรฐาน ASTM D 1646-98a และทดสอบสมบัติการไหลด้วยเครื่อง Capillary Rheometer ตามมาตรฐาน ASTM D 3835-08 และนำไปขึ้นรูปเป็นยางสุกโดยใช้เครื่อง Compression moulding แล้วนำมาทดสอบค่าความทนแรงดึงตาม

มาตรฐาน ASTM D 412-98 ทดสอบความแข็งของยางตามมาตรฐาน ASTM D 2240 ทดสอบทดสอบค่าการเปลี่ยนแปลงสีของยางที่ผ่านการฉายแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. ยางธรรมชาติอัดแท่ง (STR 5L) (Polymer innovation, Thailand)
2. ซิงก์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) (Commercial Grade, Polymer innovation, Thailand)
3. กรดสเตียริก (Stearic acid) (Commercial Grade, Polymer innovation, Thailand)
4. 2-เมอร์แคปโทเบนโซไทอะโซล (2-mercaptobenzothiazole, MBT)(Commercial Grade, Polymer innovation, Thailand)
5. กำมะถัน (Sulphur, S₈) (Commercial Grade, Polymer innovation, Thailand)
6. ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titaniumdioxide, TiO₂)
 - อนุภาคระดับนาโนเมตรขนาด 50 นาโนเมตร (nano material technology, Singapore)
 - อนุภาคระดับไมโครเมตรขนาด 0.17 ไมโครเมตร (AR grade)(MERSK)

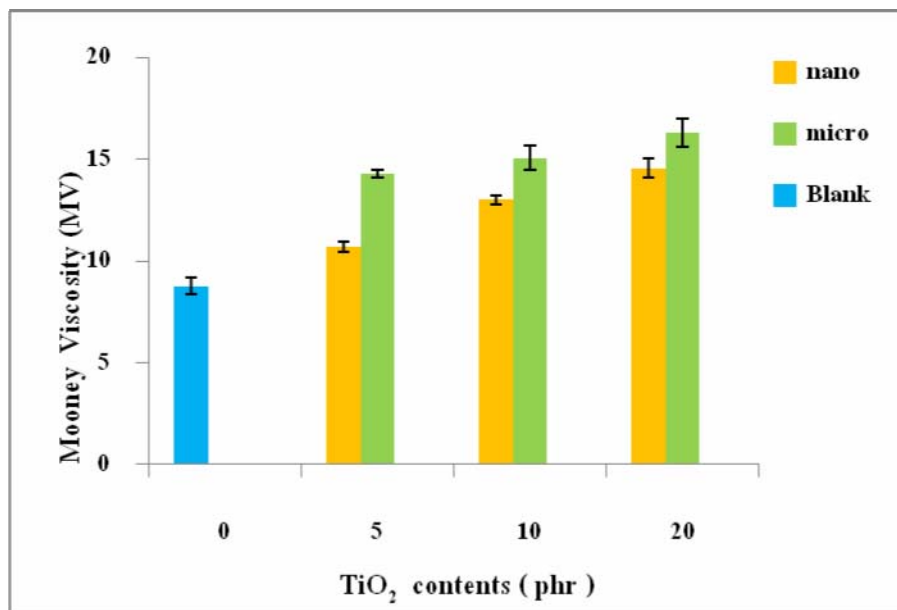
ตารางที่ 1 สูตรการผสมสารเคมีของยาง

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (phr)
ยางธรรมชาติ NR-STR 5L	100
ซิงก์ออกไซด์ (Zinc oxide)	4
กรดสเตียริก (Stearic acid)	2
ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO ₂)	5 , 10 , 20
เมอร์แคปโทเบนโซไทอะโซล (MBT)	0.7
กำมะถัน (Sulphur)	3

หมายเหตุ : phr (parts per hundred of rubber)

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย

1) การทดสอบความหนืดมูนนี่



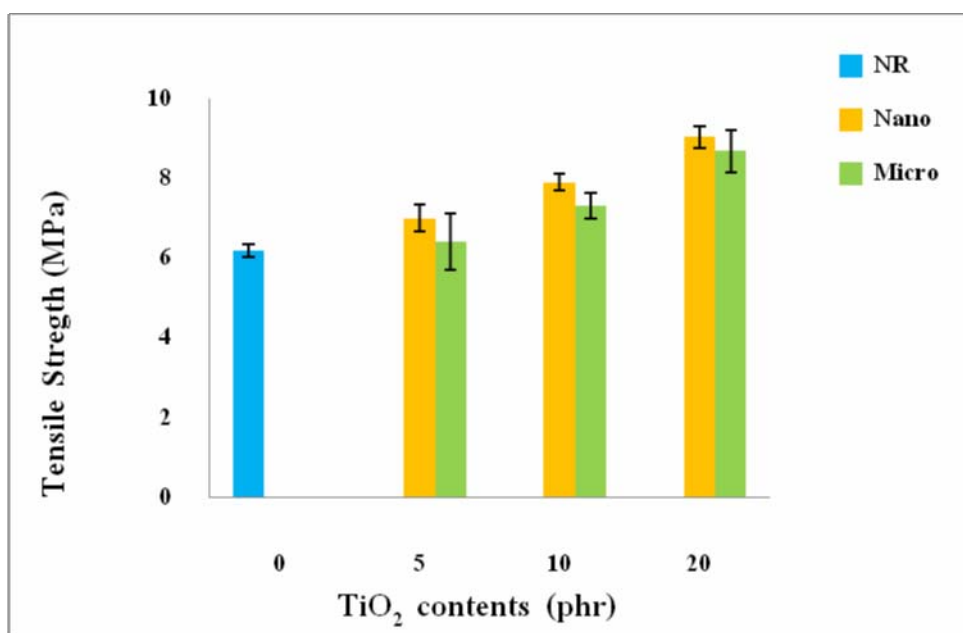
รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคระดับนาโนเมตรและไมโครเมตรกับความหนืดมูนนี่ของยาง (Mooney viscosity)

จากรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรและไมโครเมตรกับความหนืดมูนนี่โดยใช้มาตรฐาน ASTM D 1646-98a ตามรูปที่ 1 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ขึ้นจะทำให้ค่าความหนืดมูนนี่เพิ่มขึ้นและยางที่ใช้สารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรจะให้ค่าความหนืดมูนนี่ที่ต่ำกว่ายางที่ใช้สารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับไมโครเมตรในทุกอัตราส่วน เนื่องจากขนาดอนุภาคของสารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดเล็กและเข้าผสมกับยางธรรมชาติได้ดีกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า ดังนั้นจะเห็น

ได้ว่าปริมาณและขนาดของอนุภาคของสารเติมแต่งมีผลต่อค่าความเหนียวของยางซึ่งผลที่เกิดขึ้นมาจากการผสมและการเข้ากันของยางกับสารเติมแต่งในปริมาณของสารเติมแต่งที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติ

2) การทดสอบสมบัติเชิงกลของยาง

2.1 การทดสอบการทนต่อแรงดึง (Tensile Strength)

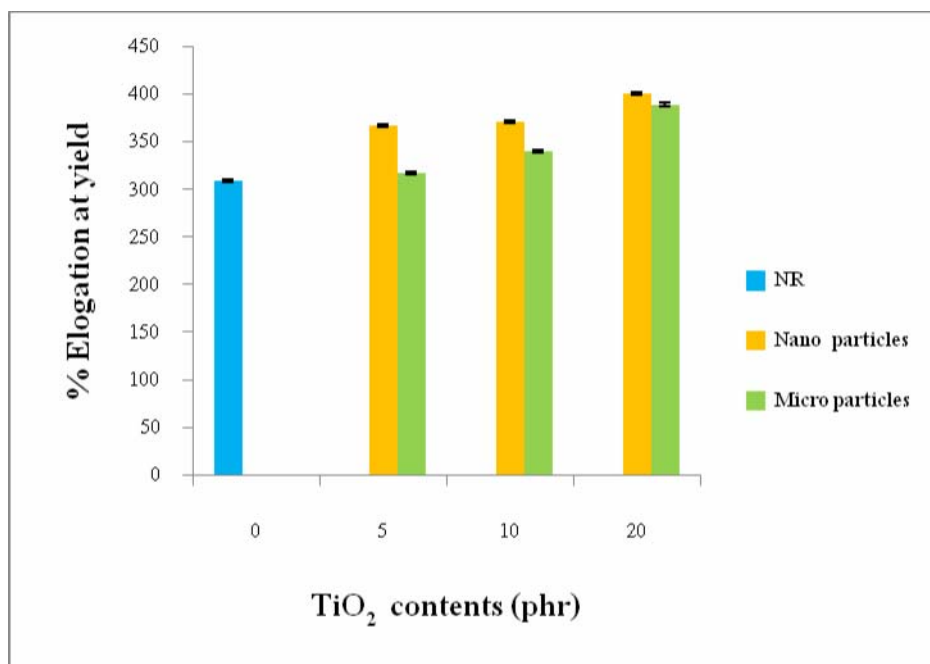


รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนต่อแรงดึง (MPa) กับปริมาณสารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับไมโครเมตรและนาโนเมตร (phr)

จากรูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนต่อแรงดึง (MPa) ที่ได้จากการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 412-98 กับปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับไมโครเมตรและขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร พบว่า การใช้สารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะให้ค่าความทนต่อแรงดึงที่สูงขึ้น และการใช้สารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรจะให้ค่าความทนต่อแรงดึงมากกว่าการใช้สารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับไมโครเมตรในทุกอัตราส่วน เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นสารเติมแต่งชนิดเสริมแรงของยางธรรมชาติ เมื่อเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ลงไปในยาง

ธรรมชาติจะทำให้เกิดการขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลของยาง ส่งผลให้สมบัติเชิงกลดีขึ้นและผลการทดสอบแรงดึงยังส่งผลสอดคล้องไปกับผลการทดสอบความหนืดมูนนี้กล่าวคือ ยางธรรมชาติผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรให้สมบัติดีกว่าขนาดอนุภาคระดับไมโครเมตรในทุกอัตราส่วน

2.2 การทดสอบการยืด (Elongation)

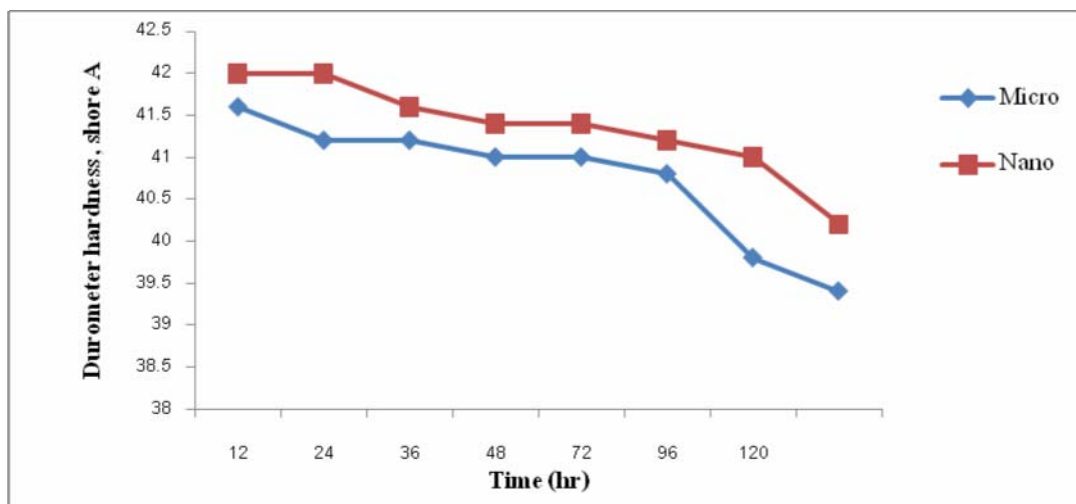


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะยืด(%Elongation at yield) กับปริมาณสารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับไมโครเมตรและนาโนเมตร (phr)

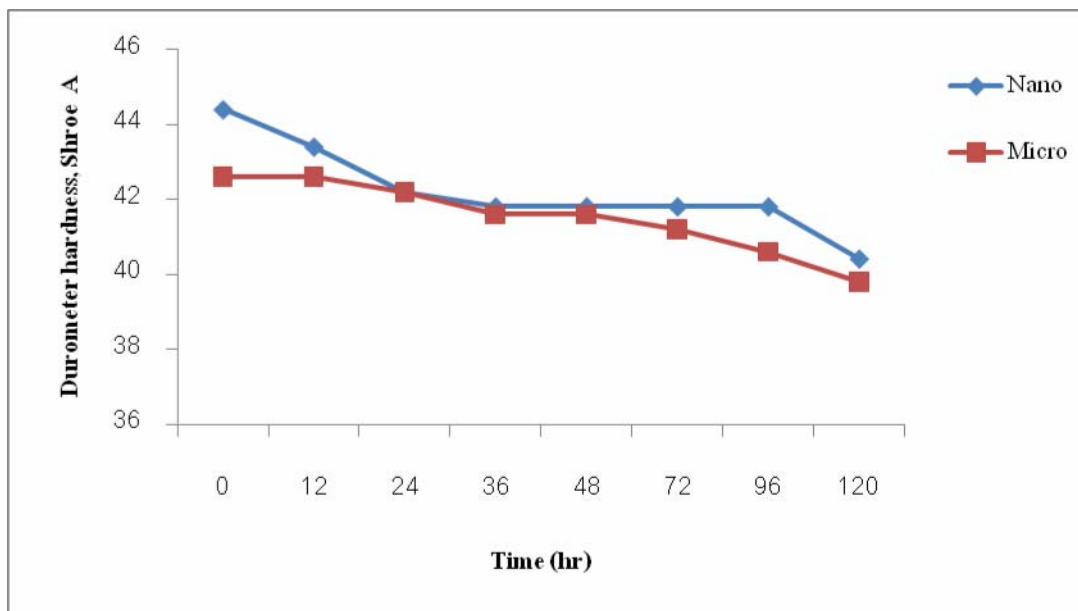
เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างระยะยืดกับปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับไมโครเมตรและนาโนเมตร รูปที่ 3 พบว่า การใช้สารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะให้ค่าระยะยืดที่สูงขึ้นและการใช้สารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรจะให้ค่าระยะยืด (Elongation) มากกว่าการใช้สารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับไมโครเมตร

จากผลการทดลอง ระยะยืดดึงที่ได้มีผลเป็นไปในทิศทางเดียวกับค่าความทนแรงดึง กล่าวคือ ยางธรรมชาติผสมอนุภาคนาโนมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีกว่ายางธรรมชาติที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคระดับไมโครเมตร

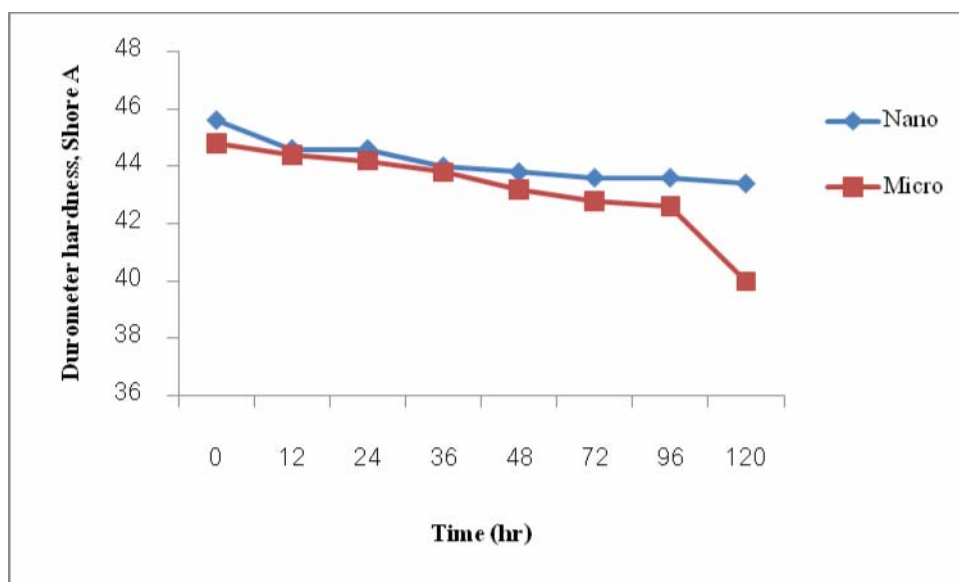
2.3 การทดสอบค่าความแข็ง(Hardness)



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับระยะเวลาการฉายแสงยูวีของยางธรรมชาติที่ใช้สารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนและไมโครเมตรที่ปริมาณ 5 phr



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับระยะเวลาการฉายแสงยูวีของยางธรรมชาติที่ใช้สารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนและไมโครเมตรที่ปริมาณ 10 phr

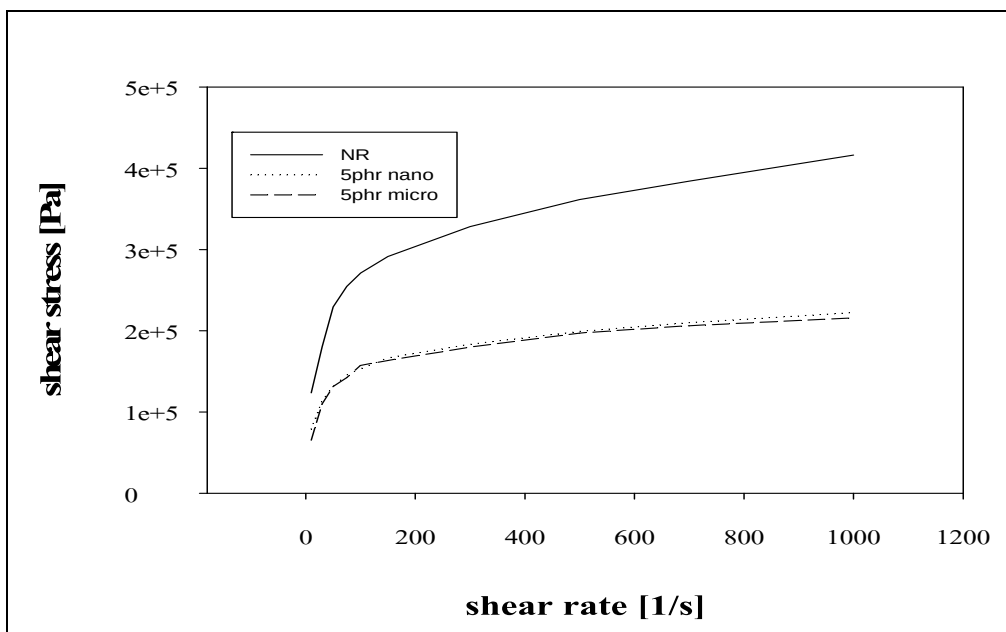


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับระยะเวลาการฉายแสงยูวีของยางธรรมชาติที่ใช้สารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนและไมโครเมตรที่ปริมาณ 20 phr

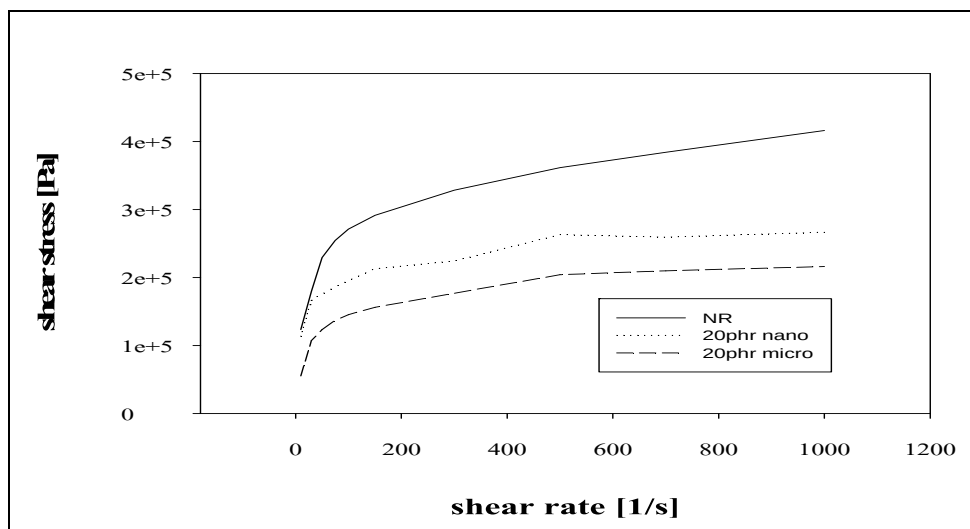
จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับระยะเวลาการฉายแสงยูวีตามมาตรฐาน ASTM D 2240 ของยางธรรมชาติที่ใช้สารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนและไมโครเมตรที่ปริมาณต่างๆตามรูปที่ 4.1 ถึง 4.3 พบว่าสารประกอบยางธรรมชาติในทุกอัตราส่วนมีค่าความแข็งลดลงเมื่อเพิ่มระยะเวลาการฉายแสงยูวีและยางที่ใช้สารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรมีค่าความแข็งของยางมากกว่ายางที่ใช้สารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับไมโครเมตรเนื่องจากอนุภาคนาโนสามารถกระจายแรงกดที่ผิวได้ดีกว่า

หากกล่าวโดยรวมแล้ว สมบัติเชิงกลทั้งค่าการทนแรงดึง การยืดตัวและความแข็งของยางธรรมชาติที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรมีสมบัติที่ดีขึ้นกว่าการเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับไมโครเมตรอย่างเห็นได้ชัด

2.4 การทดสอบสมบัติการไหล



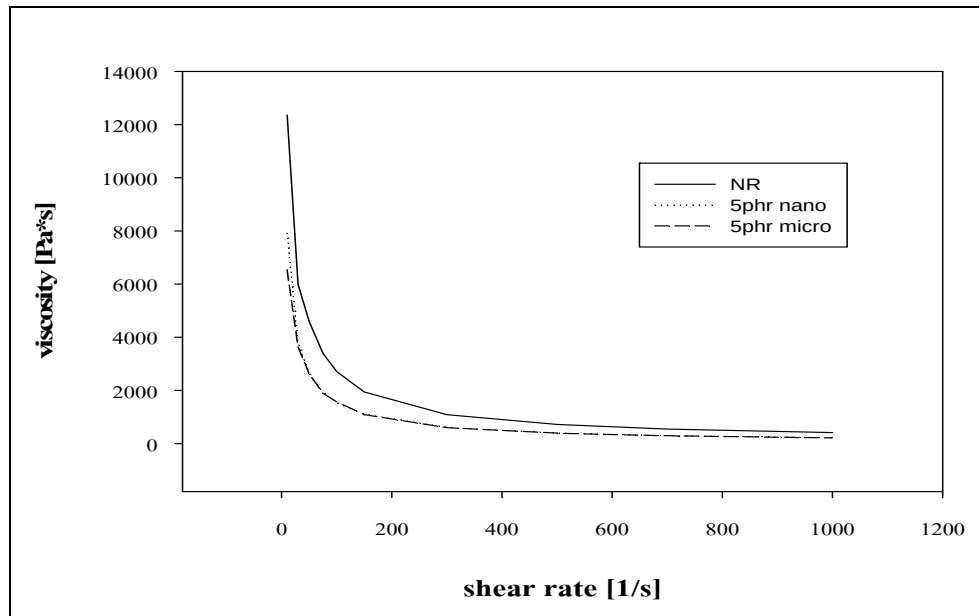
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนของยางธรรมชาติที่ใช้สารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนและไมโครเมตรที่ปริมาณ 5 phr



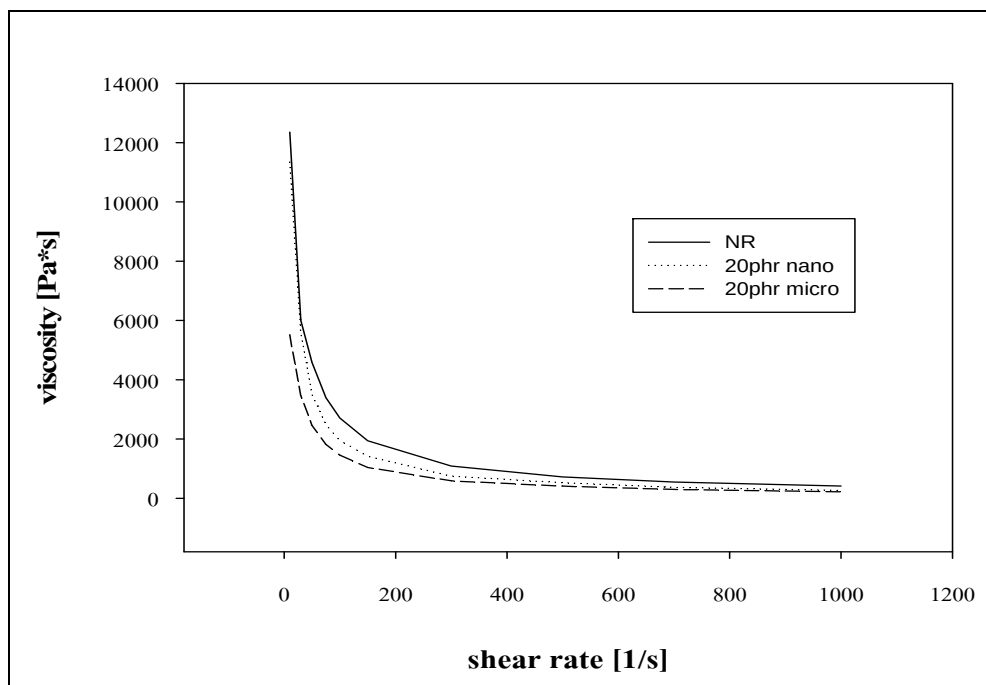
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนของยางธรรมชาติที่ไม่ผสมและยางธรรมชาติที่ผสมสารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนและไมโครเมตรที่ปริมาณ 20 phr

ผลของขนาดอนุภาคยางที่ส่งผลต่อค่าความเค้นเฉือนดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6 โดยทำการทดสอบที่อัตราเฉือน $10 - 1000 \text{ s}^{-1}$ เมื่ออัตราเฉือนสูงขึ้นจะทำให้ความเค้นเฉือนเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรง ซึ่งเป็นพฤติกรรมการไหลของยาง เมื่อเปรียบเทียบที่อัตราเฉือนต่างๆ พบว่า ยางธรรมชาติที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ มีค่าความเค้นเฉือนสูงที่สุดและเมื่อเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ลงไปจะทำให้ค่าความเค้นเฉือนมีค่าลดลงทั้งนี้เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์จะเข้าไปแทรกระหว่างสายโซ่ของยางทำให้ยางเกิดการคลายตัวออกและเกาะกันอย่างหลวมๆเมื่อมีแรงมากระทำจึงทำให้สายโซ่มีความเค้นเฉือนลดลงแต่ผลของขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรและไมโครเมตรจะทำให้ผลของค่าความเค้นเฉือนไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อปริมาณสารเติมแต่งน้อยดังแสดงในรูปที่ 5 แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของสารตัวเติมมากขึ้นจะเห็นความแตกต่างของค่าความเค้นเฉือนที่ขนาดอนุภาคต่างกัน กล่าวคือ เมื่อเพิ่มปริมาณสารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์เป็น 20 phr ค่าความเค้นเฉือนของยางที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรจะให้ค่าความเค้นเฉือนมากกว่าขนาดอนุภาคระดับไมโครเมตร ทั้งนี้เนื่องจากขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรมีขนาดเล็กสามารถกระจายตัวเข้า

ไปแทรกในสายโซ่ของยางได้ดีกว่าทำให้การคลายตัวของสายโซ่ของยางก่อนการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลเกิดขึ้นได้ยากกว่าส่งผลให้ค่าความเค้นเฉือนที่ได้มีค่ามากกว่า



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอัตราเฉือนของยางธรรมชาติที่ไม่ผสมและยางธรรมชาติที่ผสมสารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนและไมโครเมตรที่ปริมาณ 5 phr

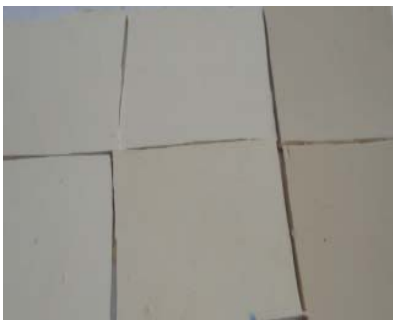


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอัตราเฉือนของยางธรรมชาติที่ไม่ผสมและยางธรรมชาติที่ผสมสารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนและไมโครเมตรที่ปริมาณ 20 phr

ผลของอนุภาคที่ส่งผลต่อความหนืดดังรูปที่ 7 และ 8 พบว่าเมื่ออัตราเฉือนสูงขึ้นส่งผลให้ความหนืดลดลงซึ่งเป็นพฤติกรรมการไหลแบบ Pseudo plastic ทั่วไป เนื่องจากการเพิ่มอัตราเฉือนทำให้สายโซ่เกิดการยืดดึงและคลายตัวออกทำให้ความหนืดลดลงและเมื่อเทียบกับอัตราเฉือนเดียวกันพบว่า ยางที่ไม่ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์มีความหนืดสูงที่สุด เมื่อเพิ่มปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้ความหนืดมีค่าลดลงทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคของสารเติมแต่งที่เข้าไปแทรกในสายโซ่ของยางทำให้ยางคลายตัวออกจากกันจึงทำให้ความหนืดมีค่าลดลง ผลของปริมาณของสารเติมแต่งสอดคล้องกับค่าความเค้นเฉือน คือ เมื่อปริมาณของสารเติมแตงน้อยขนาดอนุภาคจะไม่ส่งผลต่อค่าของความหนืดดังรูปที่ 7 แต่เมื่อปริมาณของสารเติมแต่งเพิ่มขึ้นเป็น 20 phr ดังรูปที่ 8 พบว่า ยางที่ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรจะให้ค่าความหนืดสูงกว่ายางที่ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับไมโครเมตรทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคระดับนาโนเมตรมีขนาดเล็กสามารถแทรกเข้าไประหว่างสายโซ่ของยางได้ดีและสอดคล้องกับผลการทดสอบการเกิดแรงเฉือน

3) การทดสอบการต้านทานการเปลี่ยนสีของยาง

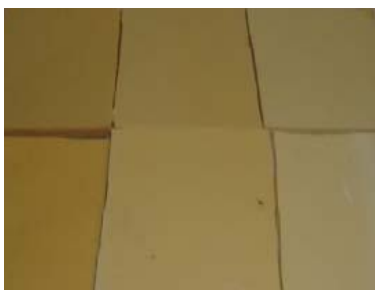
3.1 การทดสอบการต้านทานการเปลี่ยนสีของยางด้วยแสงฟลูออเรสเซนซ์



รูปที่ 9 ยางที่ผ่านการฉายแสงฟลูออเรสเซนซ์ในระยะเวลาต่างๆ

เมื่อทำการทดสอบการต้านทานการเปลี่ยนสีโดยการฉายแสงฟลูออเรสเซนซ์ของยางธรรมชาติที่มีการเติมสารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรและไมโครเมตร ตามรูปที่ 9 พบว่า การนำยางธรรมชาติผสมสารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ (0, 5, 10 และ 20 phr) ไปฉายแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่มีความเข้มแสง 40 วัตต์ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ให้มีปริมาณสูงขึ้นไม่สามารถเห็นความเปลี่ยนแปลงสีของยางอย่างชัดเจนมากนัก ทางผู้วิจัยจึงนำมาทดสอบกับแสงยูวี เพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของสีอย่างชัดเจนและจำลองสภาวะการใช้งานภายนอกอาคาร

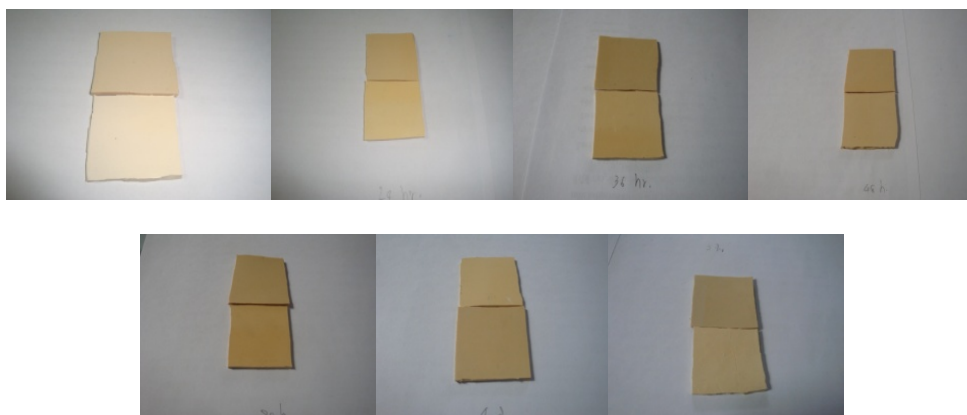
3.2 การทดสอบการต้านทานการเปลี่ยนสีของยางด้วยแสงยูวี



รูปที่ 10 ยางที่ผ่านการฉายแสงยูวีในระยะเวลาต่างๆ

เมื่อทำการทดสอบการต้านทานการเปลี่ยนสีของยางธรรมชาติที่มีการเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรและไมโครเมตร ตามรูปที่ 10 พบว่า การนำยางธรรมชาติที่ใช้สารเติมแต่งไทเทเนียม

ไดออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ (0 , 5 , 10 และ 20 phr) ไปฉายแสงยูวีที่มีความเข้มแสง 40 วัตต์ เห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารเติมแต่งให้มีปริมาณสูงขึ้นยางธรรมชาติจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสีได้น้อยลง เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดำยแสงเมื่อเพิ่มปริมาณลงไปมากจะช่วยป้องกันการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากแสงแดดได้และจากการสังเกตลักษณะกายภาพด้วยสายตาเห็นได้ว่าปริมาณสารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ 5 phr จะเห็นการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนที่สุด ดังนั้นจึงเลือกชิ้นงานตัวอย่างจากการเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 5 phr มาเพื่อเปรียบเทียบสมบัติ



รูปที่ 11 ยางที่ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภากระดับนาโนเมตรและไม่โครเมตรในปริมาณ 5 phr ผ่านการฉายแสงยูวีในระยะเวลาต่างๆ

เมื่อนำยางธรรมชาติที่เติมสารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภากระดับนาโนเมตรและไม่โครเมตรในปริมาณ 5 phr ที่ผ่านการฉายแสงยูวีในระยะเวลาต่างๆ (รูปที่ 11) นำมาเปรียบเทียบการต้านทานการเปลี่ยนแปลงสี พบว่ายางธรรมชาติที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภากระดับไมโครเมตรมีการเปลี่ยนแปลงสีที่มากกว่าขนาดอนุภากระดับนาโนเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าจากการจำลองสภาวะการใช้งานจริง เมื่อชิ้นงานทดสอบด้วยแสงยูวียางธรรมชาติที่ใช้สารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภากระดับไมโครเมตรทำให้อย่างธรรมชาติมีการคงสภาพของสีที่น้อยกว่ายางธรรมชาติที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภากระดับนาโนเมตร

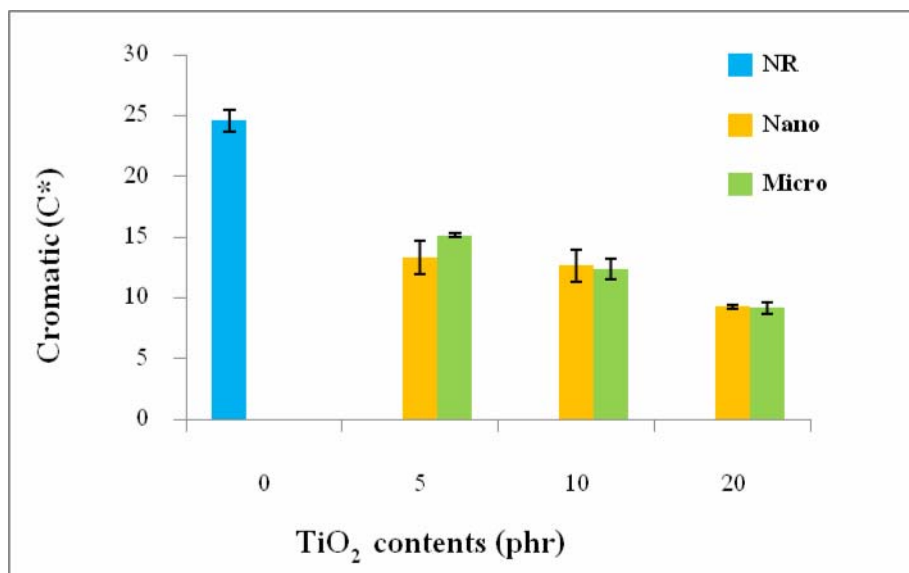


รูปที่ 12 ภาพตัดขวางของยางที่ใช้สารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรและไมโครเมตรที่ผ่านการฉายแสงยูวี

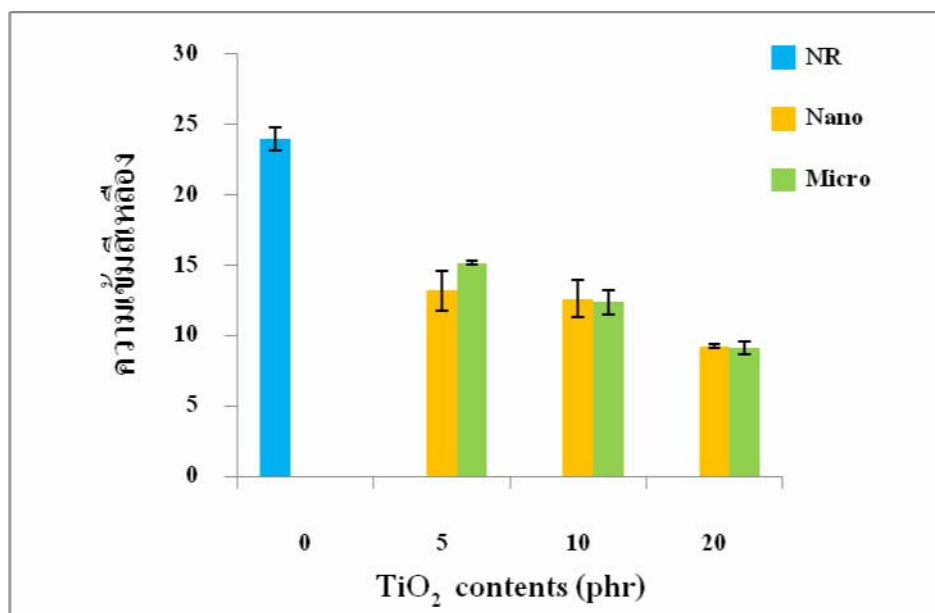
เมื่อนำยางที่ใช้สารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรและไมโครเมตรมาตัดตามขวางเพื่อสังเกตลักษณะภายในดังรูปที่ 12 พบว่า การเปลี่ยนสีของยางที่ใช้สารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดขึ้นที่บริเวณผิวหน้าและบริเวณที่สัมผัสกับแสงยูวีเท่านั้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถช่วยป้องกันการเสื่อมสภาพของยางได้ดี เพราะจากการทดลองตามสภาวะที่กำหนด การเสื่อมสภาพของยางที่ใช้สารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์จะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวเท่านั้นไม่สามารถมองเห็นความแตกต่างเมื่อตัดตามขวางได้อย่างชัดเจน

4) การทดสอบค่าการเปลี่ยนแปลงสีของยางที่ผ่านการฉายแสงยูวีด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

จากการทดลองเบื้องต้นในข้อ 3 เป็นการทดสอบการต้านทานการเปลี่ยนแปลงสีของยางธรรมชาติโดยการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีเบื้องต้นด้วยตาเปล่า ดังนั้นจึงนำยางธรรมชาติมาตรวจสอบด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์เพื่อดูค่าความเข้มของสีและค่าความเข้มสีเหลือง

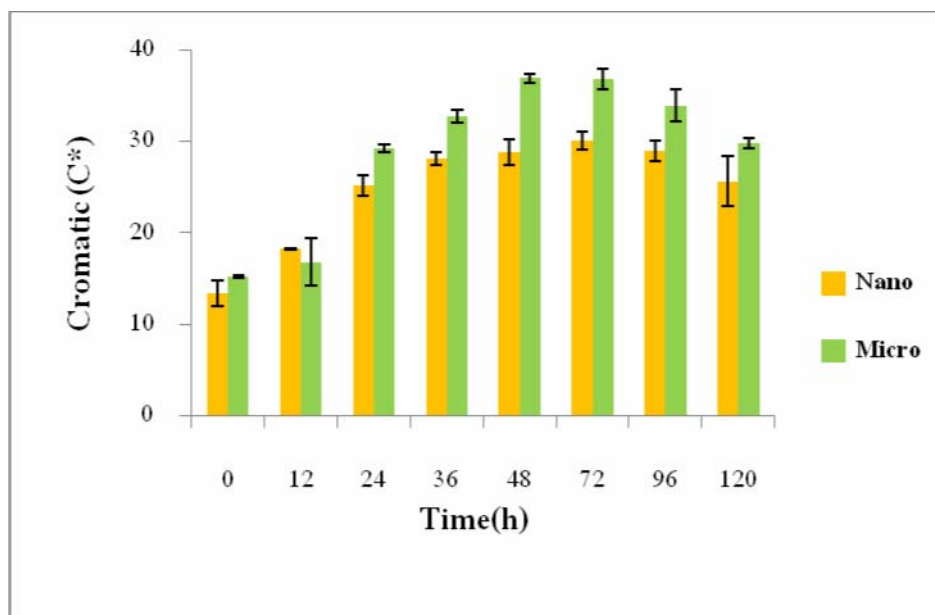


รูปที่ 13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสี (C^*) กับปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรและไมโครเมตร (phr) ที่ไม่ผ่านการฉายแสง

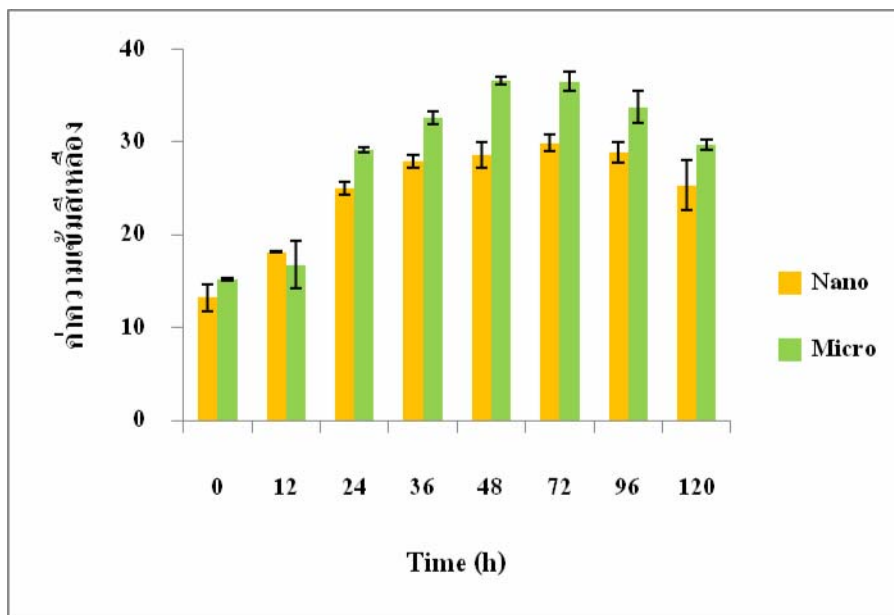


รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสีเหลืองกับปริมาณสารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรและไมโครเมตร (phr) ที่ไม่ผ่านการฉายแสง

ในการเติมสารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์จากรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสี (C^*), ความเข้มสีเหลืองกับปริมาณสารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรและไมโครเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ แสดงในรูปที่ 13 และรูปที่ 14 พบว่า เมื่อใช้สารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรและไมโครเมตรในปริมาณที่สูงขึ้นทำให้ค่าความเข้มของสีลดลงเมื่อเทียบกับยางที่ไม่เติมสารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากเมื่อเติมสารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ลงไปจะช่วยป้องกันการเสื่อมสภาพของยางและการใช้สารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรที่ปริมาณ 5 phr จะให้ค่าความเข้มสีที่น้อยกว่าการใช้สารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับไมโครเมตร แต่เมื่อปริมาณของสารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรจะให้ค่าความเข้มสีที่ไม่แตกต่างจากการใช้สารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับไมโครเมตร ซึ่งผลของค่าความเข้มสีและค่าความเข้มสีเหลืองของยางให้ผลสอดคล้องกัน



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสี(C^*) กับไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรและไมโครเมตรปริมาณ 5 phr ที่เวลาต่าง ๆ (h)



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นสัมพัทธ์กับไทเทเนียมไดออกไซด์มีอนุภาคระดับนาโนเมตรและไมโครเมตรในปริมาณ 5 phr ที่เวลาต่าง ๆ (h)

เมื่อพิจารณารูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของสี(C*) กับปริมาณสารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรและไมโครเมตรในปริมาณ 5 phr ที่เวลาต่าง ๆ (12, 24, 36, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง) ตามรูปที่ 15 พบว่า เมื่อนำยางที่มีสารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ 5 phr ไปฉายแสงยูวี และนำไปตรวจสอบด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์พบว่าค่าความชื้นของสีจะเพิ่มขึ้นไปเรื่อย ๆ จนถึงเวลาที่ 72 ชั่วโมงค่าความชื้นจะมีค่าสูงสุดและลดลงเมื่อใช้ระยะเวลาเท่ากับ 96 และ 120 ชั่วโมงตามลำดับ ซึ่งน่าจะเป็นสาเหตุมาจากการเสื่อมสภาพที่ผิวของยางธรรมชาติและเมื่อพิจารณาค่าความชื้นสัมพัทธ์ของยางในรูปที่ 16 พบว่า ยางที่มีสารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ 5 phr มีค่าความชื้นสัมพัทธ์ของยางจะเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ จนถึงเวลาที่ 72 ชั่วโมงค่าความชื้นสัมพัทธ์จะมีค่าสูงสุดเช่นเดียวกับค่าความชื้น ทั้งนี้จากการพิจารณาความแตกต่างของขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรและไมโครเมตรของไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถเห็นความแตกต่างได้อย่างชัดเจนในทุกๆระยะเวลาตามการทดลองซึ่งทั้งความชื้นและความชื้นสัมพัทธ์ของอนุภาคระดับนาโนเมตรไทเทเนียมไดออกไซด์ให้ค่าความชื้นที่ต่ำกว่า

ดังนั้นจากผลการทดลองทั้งหมดจึงสรุปได้ว่า ปริมาณที่เหมาะสมที่สุดของการใช้สารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ คือ 5 phr และขนาดอนุภาคที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง คือสารเติมแต่งไทเทเนียมได

ออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร ซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 50 นาโนเมตร เนื่องจากจะได้ยางธรรมชาติที่ป้องกันการเสื่อมสภาพจากแสงแดดและยังช่วยยืดอายุการใช้งานของยางธรรมชาติ

สรุปผลการทดลอง

การเปรียบเทียบยางธรรมชาติที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรและไมโครเมตรจากการทดสอบความหนืดโดยใช้เครื่องทดสอบความหนืดของยาง (Mooney viscometer) พบว่ายางธรรมชาติที่ผสมสารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรมีความหนืดมุนี้น้อยกว่ายางธรรมชาติที่ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับไมโครเมตร ในด้านสมบัติการไหลของสารประกอบยางธรรมชาติ พบว่า ค่าความเค้นเฉือนของยางธรรมชาติที่ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรมีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติที่ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับไมโครเมตรแสดงถึงความสามารถในการแทรกเข้าไปในสายโซ่โมเลกุลของยาง และเมื่อเพิ่มปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ให้มีปริมาณที่สูงขึ้นจะทำให้ค่าความหนืดมุนี้นี้สูงตามไปด้วยและในการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางด้วยเครื่องวัดค่าการทนต่อแรงดึงและเครื่องวัดความแข็งที่ผิว พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรลงไปในยางธรรมชาติมีผลให้ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงกลที่ดีและจะเห็นได้ว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรมีค่าความทนแรงดึงและระยะยืดตัวตลอดทั้งความแข็งที่ผิวที่สูงกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับไมโครเมตร ในส่วนของการต้านทานการเปลี่ยนสียางที่ผ่านการฉายแสงยูวี พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์จะช่วยทำให้ค่าความเข้มสีและความเข้มสีเหลืองลดลงและเมื่อนำมาเปรียบเทียบระหว่างสารเติมแต่งไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรกับไมโครเมตร พบว่าขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรมีค่าความเข้มสีและค่าความเข้มสีเหลืองน้อยกว่าในเวลาการทดสอบที่เท่ากัน หากกล่าวโดยสรุปแล้วอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนเมตรให้ผลการทดลองในทุกรูปแบบที่ดีกว่าขนาดอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับไมโครเมตร ทั้งนี้เนื่องมาจากความสามารถด้านการแทรกตัวเข้าไประหว่างสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติที่ดีกว่านั่นเอง

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษารูปแบบผลึกของนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อาจส่งผลต่อสมบัติของยางธรรมชาติที่ต้องการเติม
2. ควรมีการศึกษารสเกลือผิวของนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีผลต่อสมบัติของยางธรรมชาติ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Zoppi, R.A., Neves, S.das. and Nunes, S.P., Polymer 41 (2000) 5461-5470.
- [2] Meera, A.P., Said, S. and Grohens, Y., Industrial & Engineering Chemistry Research (2007)
- [3] Supaphol, P., Thanomkiat, P., Junkasem, J. and Dangtungee, R., Polymer Testing 26 (2007) 20-37.
- [4] Jin, M., Zhang, X., Numata, T., Murakami, T. and Fujishima, A., Surface and Coatings Technology 202 (2008)1364-1370.
- [5] Sriwong, C., Wongnawa, S., and Patarapaiboolchai, O., Catalysis Communication, 9 (2008) 213-218
- [6] พงษ์ธร แซ่ฮุย, ยาง ชนิด สมบัติและการใช้งาน, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2548.
- [7] พงษ์ธร แซ่ฮุย, สารเคมียาง, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2548.
- [8] อรุษา สรวารี, สารเติมแต่งพอลิเมอร์ เล่ม 1, ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- [9] พงษ์ธร แซ่ฮุย, ชาริต สิริสิงห, ยาง กระบวนการผลิตและการทดสอบ, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2550.
- [10] Billmeyer, Jr., F. W. and Saltzman, M., *Principles of Color Technology*, 2nd Edition, Wiley, New York, 1981.

สรุปข้อคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิต่อโครงการ

“การปรับปรุงสมบัติเชิงกล สมบัติการไหล การสกตัว การต้านทานการเปลี่ยนสีของยางธรรมชาติโดยใช้สารเติมแต่ง Tio_2 ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร”

สัญญาเลขที่ **RDG5250031**

ข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ	ชี้แจงโดยนักวิจัย
<u>ความเห็นด้านการพิมพ์ (Editorial)</u> - หน้า 8 หัวข้อปัญหาที่ทำวิจัยและความสำคัญ: อ่านแล้วไม่เข้าใจ นักวิจัยควรทบทวนการเขียนใหม่ - หน้า 12 กราฟ MV ไม่ใช่ MU - รูปที่ 4 หน้า 15 เป็นภาพที่ไม่สามารถเห็นความแตกต่างได้ชัดเจน ข้อมูลซ้ำซ้อนกันหลาย ข้อมูล อาจจะแยกเป็น 3 ภาพ ภาพที่ 5 phr, 10 phr และ 20 phr ดังเช่นภาพในหัวข้อ 2.4	- แก้ไขในหน้า 8 เรียบร้อย - แก้ไขในหน้า 12 เรียบร้อย - แก้ไขโดยแยกออกเป็น 3 รูป ในหน้า 15 และ 16
<u>ความเห็นด้านวิชาการ (Technical)</u> - หัวข้อการทดลองและสรุปผลไม่ได้กล่าวถึงวิธีการทดลอง เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ข้อที่ 1 ในหน้า 9 - ผลการทดสอบ Mooney Viscosity และ Tensile Strength ไม่น่าจะถูกต้อง เพราะค่าทั้งสองต่ำมากเกินไปปกติ ทั้งนี้ไม่น่าจะแน่ใจว่านักวิจัยบดจนยางเหลวมากหรือไม่ ควรระบุวิธีการเตรียม compound ด้วยการทดสอบ elongation ทำหรือไม่ นักวิจัยเรียก elongation at yield โดยทั่วไปทางเทคโนโลยีการใช้ elongation at break (E.B.) ซึ่งถ้าวัดตามวิธีการ E.B. ค่าที่แสดงก็ต่ำ ไม่น่าจะถูกต้อง นักวิจัยควรทบทวนวิธีการทดสอบสมบัติ tensile ของยางใหม่ และควรทำความเข้าใจกับค่าที่ปกติของ compound จาก NR ด้วย เพื่อการตรวจสอบความถูกต้องของวิธีการ และผลที่ได้ให้เป็นที่น่าเชื่อถือ ทั้งนี้ควรทบทวนทำความเข้าใจเรื่องของเทคโนโลยียางเพิ่มเติม	- เพิ่มเติมวิธีการทดลองในหน้า 12 - ค่า mooney viscosity และ tensile strength ไม่น่าจะต่ำกว่าปกติ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Hanafi Ismail และคณะ (polymer testing 21 (2002) 139-144) พบว่ามีค่า MV เท่ากับ 1.8-1.9 MV ซึ่งในงานวิจัยนี้มี MV อยู่ที่ 8-9 MV และงานวิจัยของ M. Arroyo และคณะ (polymer 44 (2003) 2447-2453) พบว่าค่า strength ของยางธรรมชาติเท่ากับ 4.25 MPa ซึ่งงานวิจัยนี้มีค่า tensile strength เท่ากับ 6 MPa ส่วนในกรณีการรายงานผลเป็นค่า Elongation at yield เนื่องจาก ram ของเครื่อง tensile testing มีค่า maximum ที่ 500% elongation จึงรายงานผลเป็น elongation at yield แทน ซึ่งสามารถระบุได้โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D412 วิธีการเตรียมคอมพาวด์ได้แก้ไขและระบุไว้ในหน้า 12