



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟสำหรับใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงในยางธรรมชาติ

โดย ดร. กนกทิพย์ บุญเกิดและคณะ

มิถุนายน 2555

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟสำหรับใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงในยางธรรมชาติ

คณะผู้วิจัย		สังกัด
1. อ.ดร.กนกทิพย์	บุญเกิด	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. ผศ.ดร.ธนากร	วาสนาเพียรพงศ์	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
3. นายเศรษฐณัชัย	เด็บบัวแก้ว	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชุดโครงการวิจัยแห่งชาติ: ยางพารา

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปย่อรายงานสำหรับผู้บริหาร

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟสำหรับใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงในยางธรรมชาติ
(ภาษาอังกฤษ) PREPARATION OF ACTIVATED CARBON FROM COFFEE RESIDUE FOR USING AS A REINFORCING FILLER IN NATURAL RUBBER

ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานสังกัด และที่อยู่

ชื่อ-สกุล	อ.ดร.กนกทิพย์ บุญเกิด
หน่วยงาน	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330
โทรศัพท์/โทรสาร	02-218-5541/02-218-5561
E-mail address	K.BOOKERD@GMAIL.COM

ผู้ร่วมวิจัย	ชื่อ-สกุล	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนากร วาสนาเพียรพงศ์
นักศึกษา	ชื่อ-สกุล	นายเศรษฐณัฐย์ เตียบัวแก้ว

งบประมาณทั้งโครงการ	120,000 บาท
ระยะเวลาดำเนินการ 9 เดือน	ตั้งแต่วันที่ 15 สิงหาคม 2553 ถึงวันที่ 15 พฤษภาคม 2554

ปัญหาที่ทำการวิจัยและความสำคัญ

สารตัวเติมเสริมแรงถือเป็นหัวใจสำคัญในอุตสาหกรรมยาง การสรรหาวัสดุกลุ่มใหม่นอกเหนือจากคาร์บอนแบล็ก และซิลิกาแบบตกผลึก ที่มีราคาถูก ขั้นตอนในการแปรรูปก่อนนำมาใช้ไม่ยุ่งยาก และผลิตจากวัตถุดิบที่มีลักษณะเป็น “Renewable” จึงเป็นสิ่งที่ต้องเร่งศึกษา กากกาแฟเป็นขยะที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมกาแฟสำเร็จรูปและการบริโภคกาแฟสด ถึงแม้ว่าจะมีการนำกากกาแฟกลับมาใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนระหว่างกระบวนการผลิตกาแฟสำเร็จรูปก็ตาม แต่ปริมาณกากกาแฟต่อวันก็มีมากกว่าความต้องการ ดังนั้นหากสามารถนำกากกาแฟซึ่งผลิตจากวัตถุดิบประเภท renewable มาเตรียมเป็นสารตัวเติมเพื่อทดแทนการใช้สารตัวเติมทางการค้าทั้งหมดหรือบางส่วนก็จะทำให้เกิดการพัฒนาอุตสาหกรรมยางแบบยั่งยืนต่อไป

วัตถุประสงค์

- เพื่อศึกษาทดลองนำเอากากกาแฟมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์สำหรับใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงในยางธรรมชาติ

ผลการดำเนินงาน

สารตัวเติมชนิดต่างๆ ที่เตรียมได้จากกากกาแฟประกอบไปด้วยอนุภาคกากกาแฟ ถ่าน และถ่านกัมมันต์ โดยอนุภาคกากกาแฟเตรียมได้จากการบดเปียกด้วยหม้อบดความเร็วสูงโดยใช้น้ำเป็นตัวกลางหลังจากนั้นอบให้แห้งแล้วนำมาบดด้วยเครื่องบดด้วยแรงสั่น หลังจากนั้นคัดแยกขนาดด้วยตะแกรงร่อนให้มีขนาดต่ำกว่า 149 ไมครอน ถ่านเตรียมได้จากการเผากากกาแฟที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะไนโตรเจน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ถ่านกัมมันต์เตรียมได้จากการนำถ่านที่ได้ไปกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอุณหภูมิที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์คือ 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส ทั้งถ่านและถ่านกัมมันต์จะถูกทำให้มีขนาดเล็กลงโดยการบดด้วยวิธี current jet mill หลังจากนั้นทำการคัดแยก

ขนาดด้วยตะแกรงร่อนให้มีขนาดต่ำกว่า 149 ไมครอน จากการวัดขนาดอนุภาคของสารตัวเดิมที่เตรียมได้ พบว่า ถ่านและ ถ่านกัมมันต์มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกันและมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคกากกาแฟโดยประมาณครึ่งหนึ่ง อย่างไรก็ตามพื้นที่ผิวของ ถ่านและถ่านกัมมันต์ที่เตรียมที่อุณหภูมิ 700 และ 800 องศาเซลเซียส มีค่าสูงกว่าอนุภาคกากกาแฟเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส มีค่าสูงกว่าสารตัวเดิมชนิดอื่นมาก ค่าพีเอชของถ่านและถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีค่าใกล้เคียงกันและมีค่าสูงกว่าค่าพีเอชของอนุภาคกากกาแฟ เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการคงรูปและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเดิมชนิดต่างๆ ที่เตรียมได้จากกากกาแฟที่ปริมาณ 10 ถึง 50 phr พบว่า การเติมถ่านและถ่านกัมมันต์ทั้งสามชนิดทำให้ยางธรรมชาติมีความเหนียวที่เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่การเติมอนุภาคกากกาแฟทำให้ความเหนียวของยางธรรมชาติลดลง นอกจากนี้การเติมถ่านและถ่านกัมมันต์ยังทำให้ยางธรรมชาติมีระยะเวลาสกอร์ช (t_2) และระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสม (t_{90}) ลดลง ส่วนการเติมอนุภาคกากกาแฟไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาสกอร์ชและระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสมมากนัก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความเป็นกรดของอนุภาคกากกาแฟขัดขวางกระบวนการคงรูปของยางธรรมชาติ จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเดิมชนิดต่างๆ ที่เตรียมได้จากกากกาแฟ พบว่า ถ่านมีประสิทธิภาพในการเสริมแรงมากที่สุด โดยทำให้ยางธรรมชาติมีมอดูลัส ความต้านแรงดึง และความต้านการฉีกขาดสูงที่สุด ปริมาณการเติมถ่านที่เหมาะสมที่ทำให้ยางธรรมชาติมีความต้านแรงดึงและความต้านการฉีกขาดสูงที่สุดอยู่ที่ 10 และ 20 phr ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบลักษณะการคงรูป ความเหนียว และสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่เติมถ่านซึ่งเป็นสารตัวเดิมที่เตรียมได้จากกากกาแฟที่มีประสิทธิภาพการเสริมแรงสูงที่สุดกับยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเดิมเชิงการค้าได้แก่ เชม์ดำเกรดเสริมแรง (N330) เชม์ดำเกรดกึ่งเสริมแรง (N774) และแคลเซียมคาร์บอเนต ผลการทดลองที่ได้ พบว่า ยางธรรมชาติที่เติมถ่านมีความเหนียว ระยะเวลาสกอร์ช และระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสมใกล้เคียงกับยางธรรมชาติที่เติม เชม์ดำเกรด N774 และมีค่ามากกว่ายางธรรมชาติที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตแต่น้อยกว่ายางธรรมชาติที่เติมเชม์ดำเกรด N330 เมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล พบว่ายางธรรมชาติที่เติมถ่านมีความต้านแรงดึงต่ำกว่ายางธรรมชาติที่เติมสารตัวเดิมเชิงการค้าทั้งสามชนิด แต่มีความต้านการฉีกขาดและความแข็งแรงมากกว่ายางธรรมชาติที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนต จากผลการทดลองข้างต้น พบว่า ถ่านที่เตรียมได้จากกากกาแฟด้วยกระบวนการคาร์บอนในเซชันสามารถนำมาใช้เป็นสารตัวเติมไม่เสริมแรงสำหรับยางธรรมชาติได้

สรุปผลการวิจัย

การนำกากกาแฟซึ่งเป็นวัตถุดิบเหลือทิ้งจากธรรมชาติ มีปริมาณมากและหาได้ง่ายในประเทศไทย มาเตรียมให้อยู่ในรูปของอนุภาคกากกาแฟ ถ่าน และถ่านกัมมันต์ พบว่า ถ่านซึ่งเตรียมได้จากกระบวนการคาร์บอนในเซชัน สามารถเพิ่มสมบัติเชิงกลให้กับยางธรรมชาติได้มากที่สุด ถึงแม้ว่าถ่านกัมมันต์ที่ทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส จะมีพื้นที่ผิวมากที่สุดก็ตาม เมื่อเทียบกับสารตัวเดิมเชิงการค้าพบว่า สมบัติเชิงกล (ความต้านการฉีกขาดและความแข็งแรง) ของยางธรรมชาติที่เติมถ่านมีค่ามากกว่ายางธรรมชาติที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นสารตัวเติมไม่เสริมแรงเชิงการค้า แต่มีน้อยกว่าเชม์ดำเกรด N330 ซึ่งเป็นสารตัวเติมประเภทเสริมแรงและเชม์ดำเกรด N774 ซึ่งเป็นสารตัวเติมประเภทกึ่งเสริมแรงเชิงการค้า

ข้อเสนอแนะที่คาดว่าจะควรวิจัยเพิ่มเติม และวิธีการที่ควรพัฒนาต่อยอดสู่ภาคปฏิบัติจริง

จากการทดลองจะเห็นได้ว่า เมื่อเปรียบเทียบสารตัวเดิมชนิดต่างๆ ที่เตรียมได้จากกากกาแฟ ถ่านมีประสิทธิภาพในการเสริมแรงสูงที่สุด ดังนั้นการทำให้ถ่านมีขนาดอนุภาคที่เล็กลงกว่าเดิม อาจทำให้ถ่านมีประสิทธิภาพการเสริมแรงที่เพิ่มมากขึ้น

ผลงานทางวิชาการที่คาดว่าจะเกิดขึ้น บทความวิจัยระดับชาติ

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้กากกาแฟเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ สารตัวเติมชนิดต่างๆ ที่เตรียมได้จากกากกาแฟประกอบด้วยอนุภาคกากกาแฟ ถ่าน และถ่านกัมมันต์ ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาคด้วยเลเซอร์พบว่า ขนาดอนุภาคของถ่านและถ่านกัมมันต์มีค่าใกล้เคียงกันและมีขนาดเล็กกว่าขนาดอนุภาคของอนุภาคกากกาแฟครึ่งหนึ่ง อย่างไรก็ตามพื้นที่ผิวของถ่านและถ่านกัมมันต์ที่เตรียมที่อุณหภูมิ 700 และ 800 องศาเซลเซียสมีค่าสูงกว่าอนุภาคกากกาแฟเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสมีค่าสูงกว่าสารตัวเติมชนิดอื่นมาก ค่าพืเอชของถ่านและถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีค่าใกล้เคียงกันและมีค่าสูงกว่าค่าพืเอชของอนุภาคกากกาแฟ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเสริมแรงของสารตัวเติมที่เตรียมได้จากกากกาแฟ พบว่าอนุภาคกากกาแฟมีประสิทธิภาพการเสริมแรงต่ำที่สุดเนื่องจากมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ที่สุดและมีความเป็นกรดซึ่งขัดขวางกระบวนการคงรูปของยางทำให้ปริมาณการเชื่อมขวางของยางคงรูปน้อยลง ผลของการเติมถ่านและถ่านกัมมันต์ในยางธรรมชาติพบว่า ลักษณะการคงรูป ความหนืดมูนนี้ และสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเสริมแรงของสารตัวเติมชนิดต่างๆ ที่เตรียมได้จากกากกาแฟพบว่า ถ่านมีประสิทธิภาพการเสริมแรงสูงสุดโดยทำให้ยางธรรมชาติมีความต้านแรงดึง ความต้านการฉีกขาด มอดูลัส และความแข็งแรงสูงสุด ปริมาณการเติมถ่านที่เหมาะสมที่ทำให้ยางธรรมชาติมีความต้านแรงดึง และความต้านการฉีกขาดสูงสุดคือที่ปริมาณ 10 และ 20 ส่วนในยางธรรมชาติ 100 ส่วนตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบลักษณะการคงรูป ความหนืดมูนนี้ และสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่เติมถ่านซึ่งเป็นสารตัวเติมที่เตรียมได้จากกากกาแฟที่มีประสิทธิภาพการเสริมแรงสูงที่สุดกับยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมเชิงการค้าได้แก่ เขม่าดำเกรดเสริมแรง (N330) เขม่าดำเกรดกึ่งเสริมแรง (N774) และแคลเซียมคาร์บอเนต แม้ว่าลักษณะการคงรูปและความหนืดมูนนี้ของยางธรรมชาติที่เติมถ่านมีค่าใกล้เคียงกับยางธรรมชาติที่เติม N774 แต่ความสามารถในการเพิ่มสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่เติมถ่านก็ยังมีค่าน้อยกว่ายางธรรมชาติที่เติม N330 และ N774 อย่างไรก็ตามพบว่า ยางธรรมชาติที่เติมถ่านมีความต้านการฉีกขาดและความแข็งแรงสูงกว่ายางธรรมชาติที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนต จากผลการทดลองข้างต้นพบว่า ถ่านที่เตรียมได้จากกากกาแฟด้วยกระบวนการคาร์บอนในเซชันสามารถนำมาใช้เป็นสารตัวเติมเนื้อสำหรับยางธรรมชาติได้

Abstract

The objective of this research is to study the possibility of the use of coffee residue as filler in natural rubber. The various forms of filler were prepared from coffee residue including coffee residue particle (CRP), char, and activated carbon. The result from a laser particle size analyzer indicated that the particle size of char and activate carbon were comparable and nearly half of that of CRP. However, the BET surface area of char and two activated carbons prepared at 700 and 800°C were only slightly higher than that of CRP. Interestingly, the activated carbon prepared at 600°C had tremendously higher BET surface area than the others. The pH value of char and all activated carbons were also comparable and higher than that of CRP. Among various forms of filler prepared from coffee residue, it was found that CRP showed the lowest reinforcing efficacy. It was not only due to its largest particle size but also its acidity nature inhibiting curing process, thus giving the vulcanizates with lower crosslink density. The presence of char and all three different activate carbons showed nearly similar trend on the cure characteristics, Mooney viscosity, and mechanical properties but different in degree. Importantly, it was observed that amongst fillers prepared from coffee residue, char had highest reinforcing efficacy. This was evident by highest tensile and tear strength, modulus and hardness. The optimum loading for tensile and tear strength was observed at 10 and 20 phr, respectively. Then, the effect of char, highest reinforcing filler from coffee residue, on the cure characteristics, Mooney viscosity, and mechanical properties was compared with the commercial fillers including reinforcing CB (N330), semi-reinforcing CB (N774), and inert calcium carbonate. Char showed similar effect on the cure characteristics and Mooney viscosity as did N774. But the ability to enhance mechanical properties of char was much lower than that of CB both N330 and N774. With the exception of tensile strength, char gave mechanical properties more or less better than CaCO_3 . Therefore, coffee residue that was turned into char by carbonization can be used as inert filler for natural rubber.

ความสำคัญและความเป็นมาของการวิจัย

สารตัวเติมเสริมแรงถือเป็นหัวใจสำคัญในอุตสาหกรรมยาง ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากคุณสมบัติโดยทั่วไปของยางไม่สูงพอที่นำไปใช้งานได้เลย จำเป็นต้องมีการเติมสารตัวเติมกลุ่มที่สามารถเสริมแรงเข้าไป สำหรับในอุตสาหกรรมยาง สารตัวเติมเสริมแรงที่นิยมใช้มีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิด คือ คาร์บอนแบล็กหรือผงเขม่าดำซึ่งเตรียมได้จากกระบวนการเผาไหม้อย่างไม่สมบูรณ์ของก๊าซธรรมชาติหรือน้ำมัน และซิลิกาแบบตกผลึกซึ่งมีลักษณะเป็นผงสีขาวเตรียมได้จากการตกตะกอนสารละลายอัลคาไลซิลิเกตในกรด เนื่องจากปัญหาคาน้ำมันซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบสำคัญสำหรับการผลิตคาร์บอนแบล็กมีการถดถอยขึ้นอย่างรวดเร็ว อีกทั้งปริมาณสุทธิของวัตถุดิบสำหรับการผลิตที่เหลืออยู่ในธรรมชาติก็ลดลงอย่างรวดเร็วเช่นกัน ส่งผลให้คาร์บอนแบล็กมีราคาสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่ซิลิกาแบบตกผลึกถึงแม้จะมีราคาต่ำกว่าแต่ต้องใช้ร่วมกับสารประกอบไฮโดรเจนเพื่อทำให้ซิลิกาเกิดการกระจายตัวที่ดีในเนื้อยาง แต่สารประกอบไฮโดรเจนที่ใช้จะต้องสั่งซื้อจากบริษัทต่างชาติเป็นส่วนใหญ่ การสรรหาวัสดุกลุ่มใหม่ ที่มีราคาถูก ขั้นตอนในการแปรรูปก่อนนำมาใช้ไม่ยุ่งยาก และสิ่งที่สำคัญอีกประการก็คือ จะต้องผลิตจากวัตถุดิบที่มีลักษณะเป็น “Renewable” จึงเป็นสิ่งที่ต้องเร่งศึกษา เพื่อทำให้เกิดการพัฒนาแบบยั่งยืนขึ้น

ถ่านกัมมันต์มีชื่อภาษาอังกฤษว่า แอคทีฟคาร์บอน (active carbon) หรือ แอกทิเวเตด คาร์บอน (activated carbon) วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์มีอยู่ด้วยกันหลายชนิด ส่วนใหญ่มักเป็นพวกอินทรีย์สารซึ่งประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ โดยทั่วไปมักเป็นพวกเซลลูโลสที่มาจากพืชและต้นไม้ เช่น ไม้ยางพารา ไม้ไผ่ เศษไม้เหลือทิ้ง และวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเช่น แกลบ กะลา มะพร้าว ขี้เลื่อย โดยถ่านกัมมันต์จะเตรียมได้จากการเผาอินทรีย์สารด้วยความร้อนสูงในสถานะที่ไม่มีอากาศได้เป็นถ่านซึ่งมีสมบัติพิเศษในเรื่องการดูดซับสูงเนื่องจากมีรูพรุนขนาดเล็กเกิดขึ้นจำนวนมากและขนาดรูพรุนก็แตกต่างกันตั้งแต่ระดับไมโครเมตรจนถึงระดับนาโนเมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรรมวิธีในการผลิตและวัตถุประสงค์ในการใช้งาน จากการมีรูพรุนจำนวนมากทำให้ถ่านกัมมันต์ที่สามารถเกิดอันตรกิริยาที่ดีกับวัสดุหลัก ซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญของสารตัวเติมชนิดเสริมแรงในยาง จากลักษณะทางกายภาพเบื้องต้นของถ่านกัมมันต์จึงทำให้เกิดความสนใจที่จะลงศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการใช้ถ่านกัมมันต์เป็นสารตัวเติมเสริมแรงในยางธรรมชาติ การเลือกกากกาแฟเป็นวัตถุดิบในการเตรียมถ่านกัมมันต์ก็เนื่องมาจาก กากกาแฟเป็นขยะที่เกิดขึ้นทั้งจากอุตสาหกรรมกาแฟสำเร็จรูปและการบริโภคกาแฟสด ถึงแม้ว่าจะมีการนำกากกาแฟกลับมาใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนระหว่างกระบวนการผลิตกาแฟสำเร็จรูปก็ตาม แต่ปริมาณกากกาแฟต่อวันก็มากเกินกว่าความต้องการ ดังนั้นหากสามารถนำกากกาแฟซึ่งผลิตจากวัตถุดิบประเภท renewable มาใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์เพื่อทดแทนการใช้สารตัวเติมเชิงการค้าทั้งหมดหรือบางส่วนก็จะทำให้เกิดการพัฒนาอุตสาหกรรมยางแบบยั่งยืนต่อไป

วัตถุประสงค์

- เพื่อศึกษาทดลองนำกากกาแฟมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์สำหรับใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงในยางธรรมชาติ

ทฤษฎี แนวคิดในการวิจัย และผลงานที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันมีงานวิจัยจำนวนมากที่เกี่ยวข้องกับการนำวัตถุดิบจากแหล่งธรรมชาติหรือขยะจากอุตสาหกรรมต่าง ๆ มาดัดแปลงเพื่อใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงในยาง ขั้นตอนหรือกระบวนการดัดแปลงจะแตกต่างกันออกไปขึ้นกับคุณลักษณะของวัตถุดิบที่นำมาใช้ ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำวัสดุต่าง ๆ มาใช้ทดแทนสารตัวเติมเสริมแรงในอุตสาหกรรมยางได้แก่ งานวิจัยของ Jincheng, Yuehui, and Jihu (2005) [1] ซึ่งนำดินขาวมาใช้เป็นสารเสริมแรงยางธรรมชาติ โดยคณะวิจัยได้ศึกษาเกี่ยวกับการใช้คาร์บอนแบล็ก ปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้คณะวิจัยเลือกใช้ดินขาวก็เนื่องมาจากดินขาวมี SiO_2 ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของซิลิกาแบบตกตะกอนอยู่ถึง 44.66% นอกจากนี้แล้วดินขาวยังเป็นวัสดุที่มีราคาถูก หาได้ง่าย สำหรับขั้นตอนในการดัดแปลงดินขาวเพื่อนำมาใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรง เริ่มจากการบดดินขาวด้วย air flow milling ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบด

อยู่ที่ไม่เกิน 0.9 ไมครอน จากนั้นนำดินขาวที่ผ่านการบดมาด้วยความร้อนด้วยตะแกรงร่อน แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ผ่านตะแกรงร่อนละเอียดขนาด 1250 เมช ใช้สัญลักษณ์ (#1) และกลุ่มที่ผ่านตะแกรงร่อนละเอียดขนาด 4500 เมช แทนด้วยสัญลักษณ์ (#2) ดินขาวทั้งสองกลุ่มจะถูกปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริกก่อนที่จะเติมลงในยาง ทั้งนี้เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้กับยางธรรมชาติ จากการทดลองพบว่า ยางคงรูปที่มีการเติมดินขาว 60 phr กลุ่ม (#2) ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าจะมีความทนแรงดึงสูงกว่ายางคงรูปที่เติมดินขาวกลุ่ม (#1) ในขณะที่ค่าความแข็ง Shore A ของยางคงรูปที่เติมดินขาวทั้งสองกลุ่มมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลระหว่างยางที่เติมคาร์บอนแบล็กกับยางที่เติมดินขาวกลุ่ม (#2) ในปริมาณที่เท่ากัน พบว่า ยางที่เติมดินขาวให้ค่าความทนแรงดึงสูงกว่ายางที่เติมคาร์บอนแบล็กประมาณ 2 MPa ในขณะที่ยางคงรูปที่เติมคาร์บอนแบล็กมีค่าความแข็ง Shore A สูงกว่า

ศิริพรและณรงฤทธิ์ (2550) [2] ได้นำเถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุที่ได้จากการเผาถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแหล่งต่าง ๆ ภายในประเทศ ดังนี้ แม่เมาะ บ้านโป่ง และระยอง มาใช้เป็นสารเสริมแรงยางธรรมชาติที่เทียบกับการใช้ซิลิกาแบบตกตะกอน ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเถ้าลอยจากทั้ง 3 แหล่ง อยู่ในช่วงประมาณ 20-50 ไมครอน ปริมาณ SiO_2 ในเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะและบ้านโป่งจะอยู่ที่ประมาณ 35% ในขณะที่จากระยะของจะอยู่ที่ 27% พื้นผิวของเถ้าลอยและซิลิกาแบบตกตะกอนจะถูกปรับปรุงด้วยสารคู่ควบไฮโดรเจนซิลิโคน Si69 ก่อนที่จะถูกเติมลงในยาง ทั้งนี้เพื่อเพิ่มการกระจายตัวและการยึดเกาะระหว่างเถ้าลอยหรือซิลิกาแบบตกตะกอนกับยางธรรมชาติ จากการทดลองพบว่า ยางคงรูปที่เติมเถ้าลอยจากแหล่งต่าง ๆ ที่ 30 phr (คิดจากปริมาณ SiO_2 ที่อยู่ในเถ้าลอย) จะมีความทนแรงดึงและความต้านทานการฉีกขาดใกล้เคียงกับยางคงรูปที่เติมซิลิกาแบบตกตะกอนที่ 30 phr แต่เมื่อปริมาณที่เติมเพิ่มมากขึ้น ยางคงรูปที่เติมเถ้าลอยจากแหล่งต่าง ๆ จะมีความทนแรงดึงและความต้านทานการฉีกขาดลดลง ในขณะที่เมื่อปริมาณซิลิกาแบบตกตะกอนมากขึ้น ยางคงรูปที่ได้จะมีสมบัติดังกล่าวเพิ่มขึ้น

นอกเหนือจากตัวอย่างข้างต้นแล้ว เถ้าแกลบเป็นสารตัวเติมอีกชนิดหนึ่งที่น่าสนใจจากนักวิจัยจำนวนมาก ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากเถ้าแกลบมีองค์ประกอบของ SiO_2 อยู่ในปริมาณสูง เริ่มตั้งแต่ 49 % จนถึง 98% ขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ในการเผาแกลบ งานวิจัยของ Sae-Oui, Rakdee, and Thanmathorn (2002) [3] เป็นหนึ่งในงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาผลของเถ้าแกลบต่อสมบัติต่าง ๆ ของยางธรรมชาติ เถ้าแกลบที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิด คือ เถ้าแกลบที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ (RHA-LC, 3.4%) และเถ้าแกลบที่มีปริมาณคาร์บอนสูง (RHA-HC, 7.0%) ผลการทดลองพบว่า เถ้าแกลบทั้งสองชนิดส่งผลต่อสมบัติการคงรูปและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติในแนวโน้มเดียวกันดังนี้ การเติมเถ้าแกลบทำให้ระยะเวลาสกอร์ชและระยะเวลาในการคงรูปยางที่ 90% ลดลง ยิ่งเติมเถ้าแกลบมากระยะเวลาสกอร์ชและระยะเวลาในการคงรูปยางที่ 90% ก็จะลดลงมากขึ้น เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลของยางที่ได้ พบว่า การเติมเถ้าแกลบส่งผลทำให้สมบัติความทนแรงดึง ความต้านทานการฉีกขาด และความต้านทานการขัดถูของยางลดลง โดยสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ของยางที่เติมเถ้าแกลบจะใกล้เคียงกับของยางที่เติมสารตัวเติมกลุ่มที่ไม่เสริมแรง คือ ทดกัม เกลิน และแคลเซียมคาร์บอเนต

ซึ่งจากตัวอย่างงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่า ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความสามารถในการเสริมแรงยางของสารตัวเติมก็คือ ขนาด พื้นที่ผิว และหมู่ฟังก์ชันเคมีที่ผิวของสารตัวเติม โดยสารตัวเติมที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวมาก ดังนั้นจึงสามารถเกิดอันตรกิริยาที่ดีกับโมเลกุลของยาง ส่งผลให้สมบัติเชิงกลต่าง ๆ ของยางสูงขึ้น ในขณะที่หมู่ฟังก์ชันเคมีที่ผิวจะเกี่ยวข้องกับ การกระจายตัวของสารตัวเติมในยาง ถ้าหมู่ฟังก์ชันเคมีที่ผิวของสารตัวเติมสามารถเข้ากับยางได้ดีหรืออาจเกิดปฏิกิริยาเคมีกับยางได้ก็จะส่งผลให้การกระจายตัวของสารตัวเติมเกิดได้ดีขึ้น ประสิทธิภาพในการเสริมแรงก็จะเพิ่มขึ้น ดังนั้นในการเลือกวัสดุเหลือทิ้งเพื่อนำมาดัดแปลงสำหรับใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงในยาง เบื้องต้นต้องคำนึงถึงสมบัติทางกายภาพของวัสดุคือ จะต้องสามารถทำให้ขนาดเล็กลงได้ง่ายและขบวนการดัดแปลงไม่ยุ่งยากและมีต้นทุนต่ำ และเพื่อให้เกิดการพัฒนาแบบยั่งยืน ควรจะผลิตจากวัตถุดิบที่มีลักษณะเป็น “Renewable”

ถ่านกัมมันต์มีชื่อภาษาอังกฤษว่า แอกทิฟคาร์บอน (active carbon) หรือ แอกทิเวตเตดคาร์บอน (activated carbon) วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์มีอยู่ด้วยกันหลายชนิด ส่วนใหญ่มักเป็นพวกอินทรีย์สารซึ่งประกอบด้วยคาร์บอนและ

ไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ โดยทั่วไปมักเป็นพวกเซลล์โลสที่มาจากพืชและต้นไม้ เช่น ไม้ยางพารา ไม้ไผ่ เศษไม้เหลือทิ้ง และวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเช่น แกลบ กะลา มะพร้าว ขี้เลื่อย การเลือกกากกาแฟเป็นวัตถุดิบในการเตรียมถ่านกัมมันต์ก็เนื่องมาจาก กากกาแฟเป็นขยะที่เกิดขึ้นทั้งจากอุตสาหกรรมกาแฟสำเร็จรูปและการบริโภคกาแฟสด ถึงแม้ว่าจะมีการนำกากกาแฟกลับมาใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนระหว่างกระบวนการผลิตกาแฟสำเร็จรูปก็ตาม แต่ปริมาณกากกาแฟต่อวันก็มีมากเกินไปเกินกว่าความต้องการ ดังนั้นหากสามารถนำกากกาแฟซึ่งผลิตจากวัตถุดิบประเภท renewable มาใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์เพื่อทดแทนการใช้สารตัวเติมทางการค้าทั้งหมดหรือบางส่วนก็จะทำให้เกิดการพัฒนาอุตสาหกรรมยางแบบยั่งยืนต่อไป

การเตรียมถ่านกัมมันต์ โดยทั่วไปแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอน คือ การคาร์บอนไนเซชัน (carbonization) เป็นการเผาวัตถุดิบให้เป็นถ่าน โดยใช้อุณหภูมิในการเผาต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส ถ่านที่ได้จะมีปริมาณร้อยละของคาร์บอนที่สูง และตามด้วยขั้นตอนที่เป็นการนำวัตถุดิบที่เป็นถ่านแล้วไปทำให้มีรูพรุนเพิ่มขึ้น เรียกว่าการกระตุ้น (activation) แบ่งได้เป็นสองวิธี คือ การกระตุ้นทางกายภาพและการกระตุ้นทางเคมี การกระตุ้นทางกายภาพเป็นการกระตุ้นด้วยการใช้ก๊าซออกซิไดซ์ต่างๆ เช่น ไอน้ำ อิมิตวียังขวด ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซออกซิเจน เป็นต้น ถ่านกัมมันต์ที่ได้สามารถนำไปใช้ได้ทันที แต่อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นค่อนข้างสูงประมาณ 700-1200 องศาเซลเซียส การกระตุ้นทางเคมีเป็นการกระตุ้นด้วยการใช้สารเคมี เช่น แคลเซียมคลอไรด์ สังกะสีคลอไรด์ กรดฟอสฟอริก เป็นต้น การกระตุ้นทางเคมีจะใช้อุณหภูมิที่ไม่สูงมากนัก แต่ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีสารเคมีตกค้าง ทำให้ต้องล้างสารเคมีที่ติดมากับถ่านกัมมันต์ออกให้หมด นอกจากนี้อาจจะใช้การกระตุ้นทั้งสองวิธีร่วมกันก็ได้ คือ เมื่อใช้สารเคมีกระตุ้นแล้วนำไปกระตุ้นต่อโดยใช้ก๊าซออกซิไดซ์เพื่อเป็นการเพิ่มจำนวนรูพรุนให้มากขึ้น

สำหรับงานวิจัยนี้ในขั้นตอนการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ จะใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในการกระตุ้นเพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่ไม่มีสารเคมีตกค้าง เนื่องจากสารเคมีที่เหลืออยู่อาจทำปฏิกิริยากับสารเคมีต่างๆ ในสูตรยางซึ่งจะมีผลต่อสมบัติต่างๆ ของยางลงรูป

วิธีการ

1. การเตรียมสารตัวเติมชนิดต่างๆ จากกากกาแฟ

กากกาแฟที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ทรู คอฟฟี่ จำกัด โดยงานวิจัยนี้สารตัวเติมที่เตรียมจากกากกาแฟมีอยู่ด้วยกัน 3 ประเภท คือ อนุภาคกากกาแฟ ถ่าน และถ่านกัมมันต์ สำหรับรายละเอียดขั้นตอนการเตรียมมีดังนี้

1.1 อนุภาคกากกาแฟ (แทนด้วย CRP)

นำกากกาแฟมาบดเปียกด้วยหม้อบดความเร็วรอบสูง (hi-speed ball mill) โดยใช้หม้อบดปอร์ชเลนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำกากกาแฟที่ได้ไปบดเป็นเวลา 30 วินาที ด้วยเครื่องบดด้วยแรงสั่น (vibratory mill) โดยใช้หม้อบดที่ทำจากวัสดุชนิดทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์ หลังจากนั้นร่อนผ่านตะแกรงร่อนให้มีขนาดน้อยกว่า 149 ไมโครเมตร

1.2 ถ่าน (แทนด้วย Char)

นำกากกาแฟไปเผาให้เป็นถ่านที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะไนโตรเจนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นบดถ่านที่ได้ด้วยเครื่องบด current jet mill แล้วนำมาผ่านตะแกรงร่อนให้มีขนาดน้อยกว่า 149 ไมโครเมตร

1.3 ถ่านกัมมันต์ (แทนด้วย AC600 AC700 และ AC800)

นำถ่านที่ได้ไปกระตุ้นที่อุณหภูมิ 600 700 หรือ 800 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ต่อจากนั้นทำการบดด้วยเครื่องบด current jet mill แล้วนำมาผ่านตะแกรงร่อนให้มีขนาดน้อยกว่า 149 ไมโครเมตร

2. การตรวจสอบและวิเคราะห์สารตัวเติม

2.1 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของสารตัวเติม

ขนาดอนุภาคของสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ สามารถวิเคราะห์ได้จากเครื่อง Laser Particle Size Analyzer (Malvern Instrument รุ่น Mastersizer 2000) โดยทำการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของสารตัวเติมหลังผ่านการสั่นด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิคเป็นเวลา 10 นาที

2.2 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวของสารตัวเติม

วิเคราะห์โดยใช้วิธีการของ Brunauer Emmett และ Teller (BET) ซึ่งเป็นการหาปริมาตรก๊าซไนโตรเจนที่วัดดูดซับอย่างสามารถดูดซับไว้ได้ ด้วยเครื่อง BET Surface Area Analyzer (Beckman Coulter รุ่น SA 3100)

2.3 การตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีที่พื้นผิวของสารตัวเติม

โครงสร้างทางเคมีของสารตัวเติมที่ได้จากขั้นตอนต่าง ๆ สามารถตรวจสอบได้ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR (Thermo Scientific รุ่น Nicolet 6700) ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 4000 ถึง 500 cm^{-1}

2.4 การวิเคราะห์ค่าพีเอชของสารตัวเติม

นำสารตัวเติมที่เตรียมได้มาวิเคราะห์ความเป็นกรด-ด่าง ตามมาตรฐาน ASTM D1512

2.5 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของสารตัวเติม

นำสารตัวเติมที่เตรียมได้จากขั้นตอนต่าง ๆ มาวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของอนุภาคด้วย Scanning Electron Microscopy, SEM (JEOL รุ่น JSM-6480LV)

3. การเตรียมยางคอมพาวนด์

สูตรสารประกอบยางที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงในตารางที่ 1 โดยมีขั้นตอนการเตรียมยางคอมพาวนด์แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลัก ๆ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1: ทำการผสมยางกับสารเคมียางทั้งหมดตามตารางที่ 1 ยกเว้นกำมะถันและสารเร่ง TBBS ด้วยเครื่องผสมแบบปิด (Internal Mixer) ที่อุณหภูมิห้องผสม 50 องศาเซลเซียส ความเร็วในการหมุนของโรเตอร์ที่ 50 rpm ใช้ระยะเวลาในการผสมทั้งหมด 7 นาที เมื่อเสร็จแล้วนำยางที่ได้ออกมาพักไว้จนกระทั่งอุณหภูมิลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง

ขั้นตอนที่ 2: นำยางคอมพาวนด์ที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 มาผสมกับกำมะถันและสารเร่ง TBBS ด้วยเครื่องผสมแบบปิดเป็นเวลา 5 นาที เมื่อเสร็จแล้วนำยางที่ได้มารีดให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง หลังจากนั้นวางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 วัน

4. การเตรียมยางคงรูป

4.1 การหาเวลาที่เหมาะสมในการคงรูปยางคอมพาวนด์

นำยางคอมพาวนด์ประมาณ 4-5 กรัม มาศึกษาลักษณะการคงรูปด้วยเครื่อง Moving Die Rheometer, MDR (CG Engineering รุ่น TECH PRO A022S) ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส โดยทำการบันทึกค่าระยะเวลาสกร๊ช (t_s) และระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสม (t_{90})

4.2 การขึ้นรูปยางคงรูป

นำยางคอมพาวนด์มาขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแบบเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส กว้าง 200 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตรหนา 2 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ตามเวลา t_{90}

ตารางที่ 1 สูตรสารประกอบยาง

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (phr) ¹
ยางแผ่นรมควัน RSS3	100
สารตัวเติม ²	0,10, 20, 30, 40 และ 50
กรดสเตียริก	2
ซิงค์ออกไซด์	5
ไดเมทิลบิวทิลฟีนิลฟีนิลไดเอมีน (6PPD)	3
บิวทิลเบนโซโทอะโซลซัลฟิनाไมด์ (TBBS)	1.2
กำมะถัน	1.5

หมายเหตุ: ¹ phr: parts per hundred of rubber by weight

² สารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ประกอบด้วย อนุภาคกากกาแฟ ถ่าน ถ่านกัมมันต์ เขม่าดำเกรดเสริมแรง (N330) เขม่าดำเกรดกึ่งเสริมแรง (N774) และแคลเซียมคาร์บอเนต

5. การเตรียมยางคงรูป

5.1 การหาเวลาที่เหมาะสมในการคงรูปยางคอมพาวนด์

นำยางคอมพาวนด์ประมาณ 4-5 กรัม มาศึกษาลักษณะการคงรูปด้วยเครื่อง Moving Die Rheometer, MDR (CG Engineering รุ่น TECH PRO A022S) ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส โดยทำการบันทึกค่าระยะเวลาสกรอว์ (t_{90}) และระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสม (t_{c90})

5.2 การขึ้นรูปยางคงรูป

นำยางคอมพาวนด์มาขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแบบเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส กว้าง 200 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตรหนา 2 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ตามเวลา t_{c90}

6. การทดสอบ

6.1 ยางคอมพาวนด์

6.1.1 ความหนืดมูนนี่

นำยางคอมพาวนด์มาทดสอบหาค่าความหนืดมูนนี่ด้วยเครื่อง Mooney Viscometer ตามมาตรฐาน ISO 289-1

6.2 ยางคงรูป

6.2.1 การทดสอบความต้านแรงดึง

นำแผ่นยางที่ได้จากการขึ้นรูปมาตัดเป็นชิ้นทดสอบรูปดัมเบลตามมาตรฐาน ISO 37 type 2 แล้วทำการทดสอบความทนแรงดึงด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (Instron รุ่น 5843) ตามมาตรฐาน ISO 37 โดยใช้ความเร็วในการดึงขึ้นทดสอบ 500 มิลลิเมตรต่อนาที บันทึกค่ามอดูลัสที่ความเครียดร้อยละ 100 และมอดูลัสที่ความเครียดร้อยละ 300 ค่าความต้านแรงดึง (tensile strength) และความสามารถในการยืดออกจนขาด (elongation at break) โดยค่าที่รายงานเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบชิ้นตัวอย่าง อย่างน้อย 5 ชิ้นตัวอย่าง

6.2.2 การทดสอบความต้านทานการฉีกขาด

นำยางที่ผ่านการขึ้นรูปมาตัดเป็นชิ้นทดสอบรูปคันธนู (Die C, Nicked crescent) ทำการทดสอบชิ้นงานด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ตามมาตรฐาน ISO 34 โดยใช้ความเร็วในการดึงขึ้นทดสอบ 500 มิลลิเมตรต่อนาที บันทึกแรงดึงสูงสุดต่อความหนาของชิ้นทดสอบ (tear strength) โดยค่าที่รายงานเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบชิ้นตัวอย่าง อย่างน้อย 5 ชิ้น ตัวอย่าง

6.2.3 การทดสอบความแข็ง

ทำการทดสอบความแข็งของยางด้วยเครื่องวัดความแข็ง (Durometer Hardness) ชนิด shore A ตามมาตรฐาน ASTM D2240 โดยทำการวัดความแข็งของยางคงรูปที่ตำแหน่งต่าง ๆ กัน 3 จุด แล้วรายงานเป็นค่าเฉลี่ย

6.2.4 การหาความหนาแน่นของพันธะข้ามของยางคงรูปจากดัชนีการบวมตัว

ความหนาแน่นของพันธะข้ามในยางคงรูปสามารถหาได้จากอัตราการบวมตัวของยางในตัวทำละลาย โดยเริ่มจากการแช่ชิ้นทดสอบยางในโทลูอีนเป็นเวลา 7 วัน จากนั้นนำชิ้นทดสอบยางที่บวมตัวมาชั่งน้ำหนัก แล้วนำไปผึ่งลมให้แห้งเป็นเวลา 3 วัน ทำการชั่งน้ำหนักอีกครั้ง แล้วนำไปคำนวณหาความหนาแน่นของพันธะข้ามจากอัตราการบวมตัวของยาง นำค่าน้ำหนักของยางที่บวมตัวและยางที่แห้งมาแทนค่าในสมการที่ 1 เพื่อหาค่าสัดส่วนปริมาตรของยางที่บวมตัว (V_r) หลังจากนั้นนำค่า (V_r) ที่ได้ไปแทนค่าในสมการที่ 2 เพื่อหาค่าความหนาแน่นของพันธะข้าม (η_{swell}) โดยค่าความหนาแน่นของพันธะข้าม (η_{swell}) ที่รายงานเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบชิ้นตัวอย่าง 3 ชิ้นตัวอย่าง

$$V_r = \frac{\left[\frac{W_d}{\rho_d} - \frac{W_f}{\rho_t} \right]}{\left[\frac{W_d}{\rho_d} - \frac{W_f}{\rho_t} \right] - \left[\frac{W_s - W_d}{\rho_t} \right]} \quad (1)$$

$$-\ln(1-V_r) - V_r \chi V_r^2 = 2V_t \eta_{swell} V_r^{1/3} - \frac{2V_r}{f} \quad (2)$$

โดย	ρ_d	=	ความหนาแน่นของชิ้นทดสอบยาง (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
	ρ_f	=	ความหนาแน่นของสารตัวเติม (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
	ρ_t	=	ความหนาแน่นของโทลูอีน (มีค่าเท่ากับ 0.862 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
	W_d	=	น้ำหนักของชิ้นทดสอบที่แห้ง (กรัม)
	W_f	=	น้ำหนักของสารตัวเติมที่มีอยู่ในชิ้นทดสอบ (กรัม)
	W_s	=	น้ำหนักของชิ้นทดสอบหลังจากแช่ในโทลูอีน (กรัม)
	V_t	=	ปริมาตรของโทลูอีนต่อ 1 โมล (มีค่าเท่ากับ 106.2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล)
	χ	=	ค่าอันตรกิริยาระหว่างยางธรรมชาติกับโทลูอีน (มีค่าเท่ากับ 0.39)
	F	=	ฟังก์ชันของพันธะข้ามที่เป็นระบบการวัดค่าในซ์ด้วยกัมมะถัน (มีค่าเท่ากับ 4)

6.2.5 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาที่พื้นผิวของยางคงรูป

นำชิ้นทดสอบที่ได้จากการทดสอบสมบัติความต้านแรงดึงมาเคลือบด้วยทองคำก่อนทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy, SEM (JEOL รุ่น JSM-6480LV) โดยใช้ความต่างศักย์ 15 กิโลโวลต์

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นการวิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติต่าง ๆ ของสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ส่วนถัดมาเป็นการศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำกากกาแฟมาใช้เป็นสารตัวเติม โดยเปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ ของยางธรรมชาติเมื่อมีการเติมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ที่เตรียมได้จากกากกาแฟ ส่วนสุดท้ายทำการศึกษาระดับความสามารถในการเสริมแรงของสารตัวเติมที่เตรียมได้จากกากกาแฟโดยการเปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ ของยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมที่เตรียมได้จากกากกาแฟกับยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมเชิงการค้า ได้แก่ เชม์ดำเกรดเสริมแรง (N330) เชม์ดำเกรดกึ่งเสริมแรง (N774) และแคลเซียมคาร์บอเนต

1. การวิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติต่าง ๆ ของสารตัวเติม

1.1 สมบัติทางกายภาพของสารตัวเติม

สมบัติทางกายภาพของสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2 พบว่า ขนาดอนุภาคของสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ที่เตรียมได้จากกากกาแฟมีขนาดใหญ่กว่าสารตัวเติมเชิงการค้าทั้ง 3 ชนิด โดยอนุภาคของ CRP มีขนาดใหญ่ที่สุด ทำให้มีพื้นที่ผิวน้อยที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบขนาดอนุภาคของ Char AC600 AC700 และ AC800 พบว่า มีขนาดอนุภาคที่ไม่แตกต่างกันมากนัก อย่างไรก็ตามพบว่า พื้นที่ผิวของสารตัวเติมที่เตรียมได้จากกากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนมีค่าสูงกว่า CRP ทั้งนี้เนื่องจากความชื้นและสารระเหยในกากกาแฟจะถูกกำจัดออกเมื่อผ่านกระบวนการทางความร้อน [4] เมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ผิวของสารตัวเติมที่เป็นถ่านกัมมันต์สามารถเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้คือ AC600 AC700 และ AC800 ตามลำดับ ตามทฤษฎีในการเตรียมถ่านกัมมันต์ เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นยิ่งสูงถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีพื้นที่ผิวที่มากขึ้น เนื่องจากยิ่งอุณหภูมิสูงจะทำให้สารระเหยและปริมาณคาร์บอนถูกกำจัดออกไปมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามผลการทดลองที่ได้พบว่า เมื่ออุณหภูมิในการกระตุ้นยิ่งสูงขึ้น ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิวที่ลดน้อยลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น เมื่อสูงขึ้นไม่เพียงแต่จะกำจัดสารอินทรีย์ในกากกาแฟแล้วยังสามารถหลอม Alkali metal oxide ซึ่งมีอยู่ในกากกาแฟ (ตารางที่ 3) ได้อีกด้วย ทำให้รูพรุนที่เกิดขึ้นมีปริมาณลดน้อยลงเนื่องจากถูกปกคลุมด้วย Alkali metal oxide ดังนั้นพื้นที่ผิวของ AC700 และ AC800 จึงมีค่าน้อยลง ค่าพิเอชของ CRP มีความเป็นกรดมากที่สุดเมื่อเทียบกับสารตัวเติมชนิดอื่น ๆ ที่มีค่าพิเอชเป็นกลางและต่าง

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพของสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ

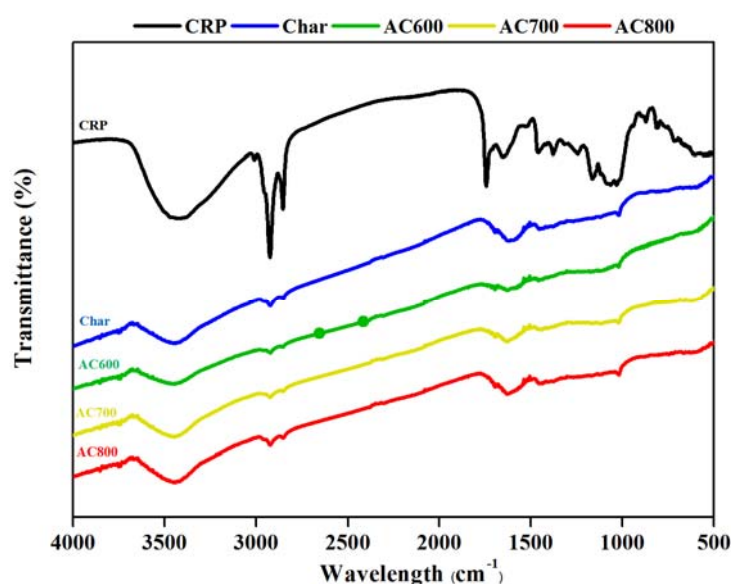
สารตัวเติม	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (μm)	พื้นที่ผิว (m^2/g)	pH	ความหนาแน่น (g/cm^3)
CRP	24.46	1.51	4.58	1.28
Char	10.04	4.04	7.85	1.24
AC600	9.31	201.42	9.23	1.46
AC700	10.42	9.11	7.97	1.29
AC800	10.59	3.17	8.46	1.25
CaCO_3	6.43	2.75	9.35	2.70
N774	2.39	38.24	8.13	1.77
N330	2.27	93.10	7.35	1.77

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของกากกาแฟ [5]

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละโดยน้ำหนัก
1. Carbohydrates (60%)	
Caramelization sugar	10
Hemi-cellulose	20
Fiber (Holo-cellulose and Lignin)	30
2. Oils (and fatty acids)	18
3. Proteins (amino acid and complex)	15
4. Ash (Oxide)	1
5. Volatile	
Carbon dioxide	3
6. Thiganelline, Caffeine, Phenolics etc.	3

1.2 สมบัติทางเคมีของสารตัวเดิม

รูปที่ 1 แสดงผลการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันเคมีที่พื้นผิวของสารตัวเดิมชนิดต่าง ๆ ที่เตรียมได้จากกากกาแฟด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)



รูปที่ 1 FTIR spectra ของสารตัวเดิมที่เตรียมได้จากกากกาแฟ

จากรูปที่ 1 พบว่า CRP ปรากฏฟิสิกของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH group) ในช่วงความยาวคลื่น 3716-3022 cm^{-1} ฟิสิกของ $-\text{CH}_2$ ในช่วงความยาวคลื่น 2977-2838 cm^{-1} ฟิสิกของหมู่คาร์บอนิล (C=O) ในช่วงความยาวคลื่น 1755-1722 cm^{-1} และ ฟิสิกของ C=C ที่ความยาวคลื่นที่ 1632 cm^{-1} ทั้ง 4 ฟิสิกที่ปรากฏแสดงถึงองค์ประกอบทางเคมีของ CRP ที่ประกอบไปด้วยเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนินเป็นองค์ประกอบหลัก โดยหมู่ฟังก์ชันของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนินแสดงดังตารางที่ 4 สำหรับสเปกตรัมของ Char AC600 AC700 และ AC800 ปรากฏฟิสิกของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ น้อยลง เนื่องจากกระบวนการทางความร้อนทำให้สารอินทรีย์เกิดการสลายตัว ฟิสิกของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ จึงปรากฏน้อยลง โดยฟิสิกที่ปรากฏประกอบไปด้วยฟิสิกของหมู่ไฮดรอกซิล คาดว่าน่าจะเป็นหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลของน้ำที่อยู่ในถ่านและถ่านกัมมันต์ เนื่องจากฟิสิกที่ปรากฏมีความแคบ

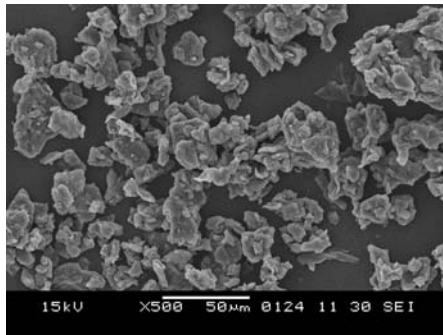
มากกว่าพีคของหมู่ไฮดรอกซิลใน CRP นอกจากนี้ยังปรากฏพีคของ C=C และ C-O ที่ความยาวคลื่นที่ 1632 และ 1016 cm^{-1} ตามลำดับ

ตารางที่ 4 หมู่ฟังก์ชันที่ตำแหน่งความยาวคลื่นต่าง ๆ ของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน [6,7]

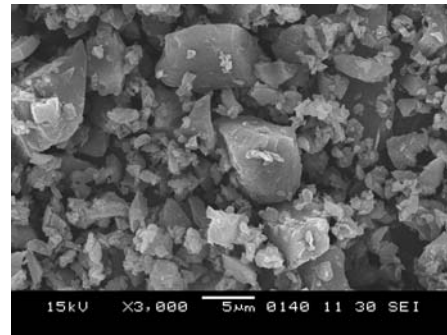
ชนิดของเส้นใย	Wave number (cm^{-1})	หมู่ฟังก์ชัน	สารประกอบ
Cellulose	4000-2995	OH	Acid, methanol
	2970-2860	C-H _n	Alkyl, aliphatic
	1640	Fiber-OH	Adsorbed water
	1270-1232	C-O-C	Aryl-alkyl ether
	1170-1082	C-O-C	Pyranose ring skeleton
	1108	OH	C-OH
Hemicellulose	4000-2995	OH	Acid, methanol
	2970-2860	C-H _n	Alkyl, aliphatic
	1765-1715	C=O	Ketone and carbonyl
	1108	OH	C-OH
Lignin	4000-2995	OH	Acid, methanol
	2890	H-C-H	Alkyl, aliphatic
	1730-1700		Aromatic
	1632	C=C	Benzene stretching ring
	1613, 1450	C=C	Aromatic skeleton mode
	1430	O-CH ₃	Methoxyl- O-CH ₃
	1270-1232	C-O-C	Aryl-alkyl ether
	1215	C-O	Phenol
	1108	OH	C-OH
	900-700	CH	Aromatic hydrogen

1.3 สันฐานวิทยาที่พื้นผิวของสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ

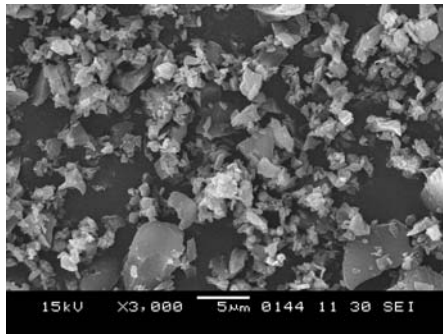
จากการศึกษาสันฐานวิทยาของอนุภาคของสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ที่เตรียมได้จากกากกาแฟและสารตัวเติมเชิงการค้า ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2 พบว่า อนุภาคของสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ที่เตรียมได้จากกากกาแฟมีลักษณะเป็นเกล็ดที่มีรูปร่างไม่แน่นอน พื้นผิวค่อนข้างเรียบ ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนต ส่วนอนุภาคของเขม่าดำทั้งสองเกรดมีลักษณะเป็นทรงกลมเกาะติดกันอยู่ ทั้งนี้เนื่องจากระบวนการผลิตเขม่าดำทำให้เกิดการหลอมติดกันของอนุภาคด้วยพันธะโคเวเลนต์



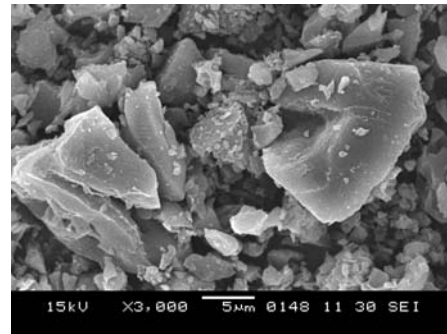
(a)



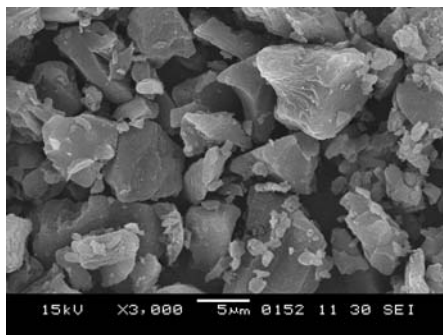
(b)



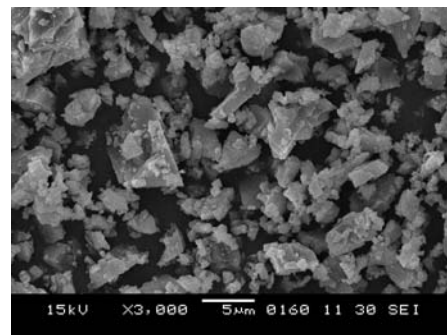
(c)



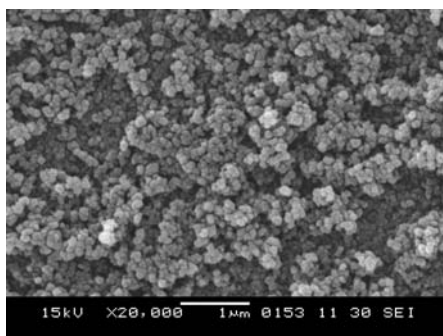
(d)



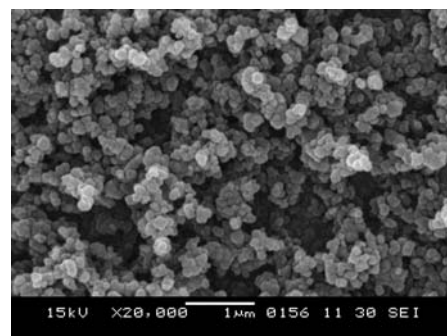
(e)



(f)



(g)



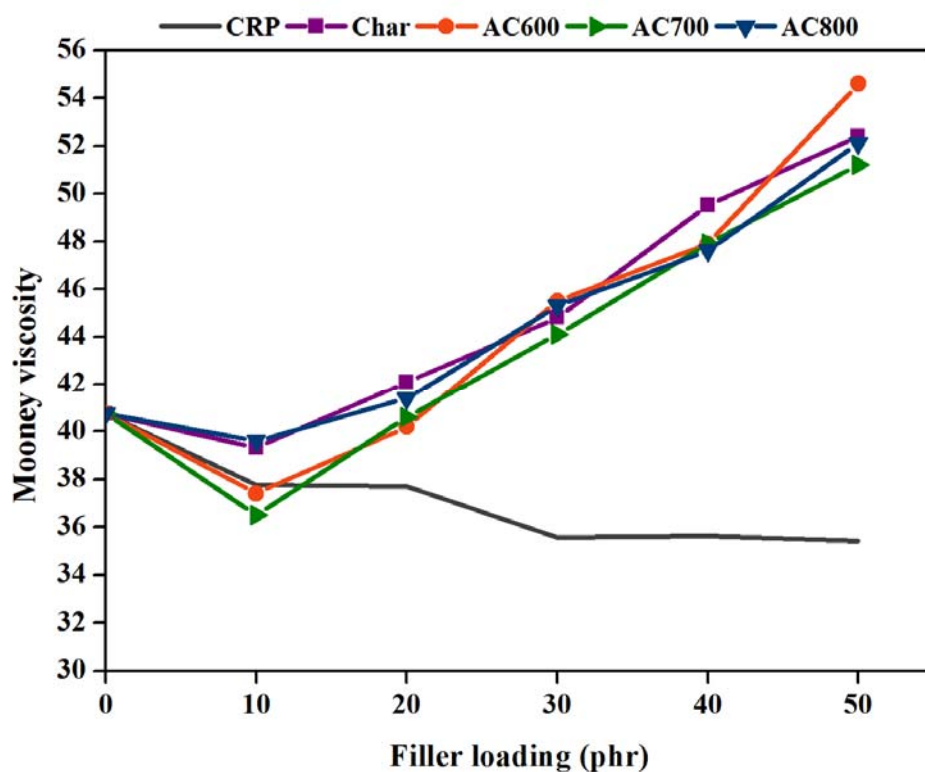
(h)

รูปที่ 2 ภาพถ่าย SEM ของสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ (a) CRP ที่กำลังขยาย 500 เท่า, (b) Char, (c) AC600, (d) AC700, (e) AC800 และ (f) CaCO_3 ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า, (g) N330 และ (h) N774 ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า

2. สมบัติต่าง ๆ ของยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ที่เตรียมได้จากกากกาแฟ

2.1 ผลการทดสอบค่าความหนืดของยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ที่เตรียมได้จากกากกาแฟ

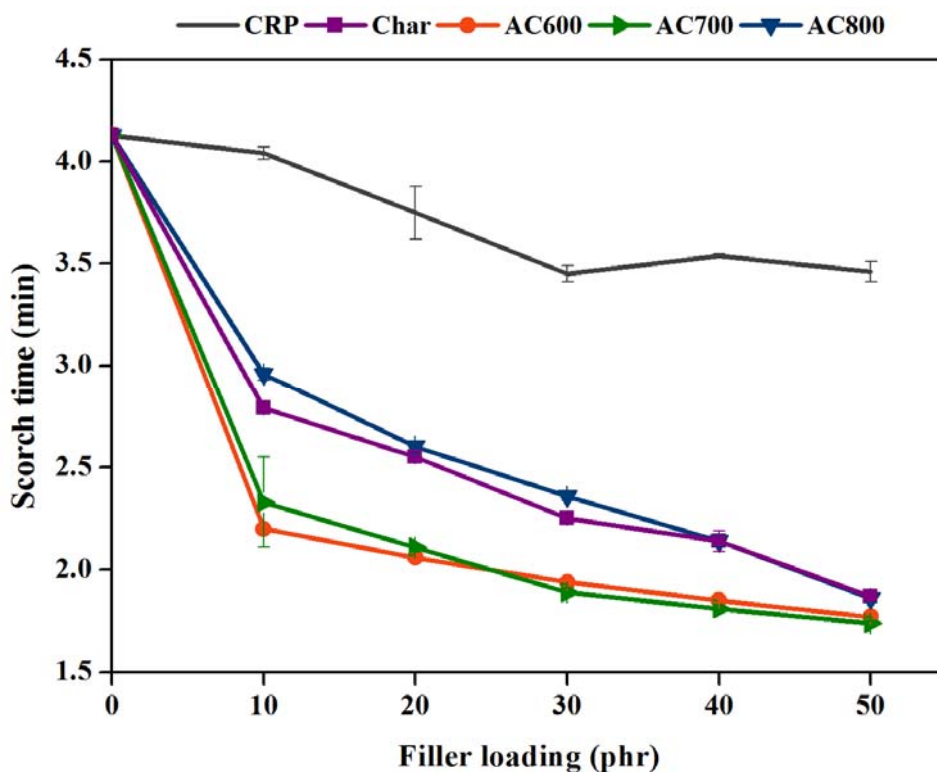
ผลของการเติมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ที่เตรียมได้จากกากกาแฟต่อค่าความหนืดของยางธรรมชาติแสดงดังรูปที่ 3 จากผลการทดลองพบว่า การเติม Char AC600 AC700 และ AC800 ส่งผลทำให้ยางธรรมชาติมีค่าความหนืด (ML(1+4)100 °C) สูงขึ้น โดยสารตัวเติมทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ Char AC600 AC700 และ AC800 ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความหนืดที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสารตัวเติมทั้ง 4 ชนิด มีขนาดอนุภาคที่ใกล้เคียงดังแสดงในตารางที่ 2 การแทรกตัวเข้าไปในสายโซ่ยางธรรมชาติจึงเกิดได้ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงส่งผลต่อความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่ยางเท่ากัน ค่าความหนืดของยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมข้างต้นจึงใกล้เคียงกัน ในขณะที่การเติม CRP กลับทำให้ยางธรรมชาติมีค่าความหนืด (ML(1+4)100 °C) ที่ลดลง ทั้งนี้คาดว่าอาจมีสาเหตุมาจากน้ำมันซึ่งเป็นหนึ่งในองค์ประกอบของกากกาแฟใน CRP แทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่ของยาง ทำให้สายโซ่ของยางอยู่ห่างกันมากขึ้น ดังนั้นสายโซ่ของยางธรรมชาติที่เติม CRP จึงเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น ค่าความหนืดของยางจึงลดลง



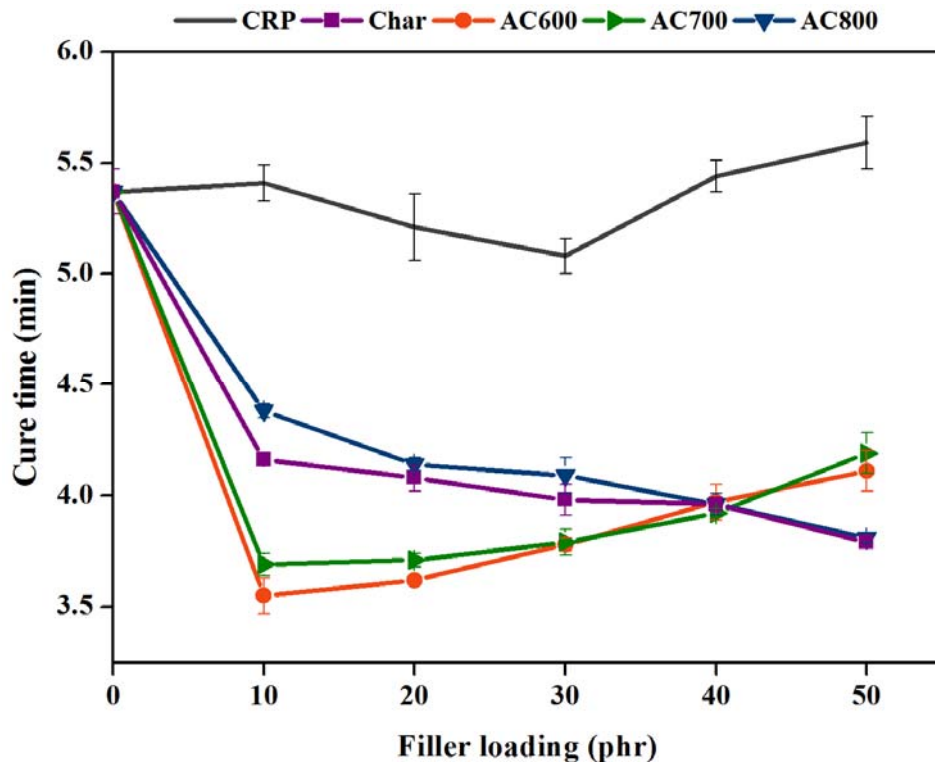
รูปที่ 3 ผลของการเติมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ที่เตรียมได้จากกากกาแฟต่อค่าความหนืดของยางธรรมชาติ

2.2 ผลการทดสอบสมบัติการคงรูปของยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ที่เตรียมได้จากกากกาแฟ

ระยะเวลาสกอรัซ (t_2) และระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสม (t_{90}) ของยางธรรมชาติเมื่อเติมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ที่เตรียมได้จากกากกาแฟแสดงในรูปที่ 4 และ 5 ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า การเติม Char AC600 AC700 และ AC800 ส่งผลทำให้ระยะเวลาสกอรัซและระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสมของยางธรรมชาติลดลงเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่เติมสารตัวเติม ซึ่งสาเหตุที่สารตัวเติมทั้ง 4 ชนิด เร่งกลไกการคงรูปด้วยกัมมะถันของยางให้เร็วขึ้นอาจเนื่องจากสภาพความเป็นต่างของสารตัวเติมดังแสดงตารางที่ 2 (ยกเว้นกรณีของ char ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง สูงกว่ากลางเล็กน้อย) ถึงแม้ว่าเบื้องต้นคาดการณ์ว่าการเติม CRP น่าจะส่งผลทำให้การคงรูปด้วยกัมมะถันของยางช้าลงเนื่องจากสภาพความเป็นกรดของ CRP แต่ผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่าการเติม CRP ส่งผลต่อการลดลงของระยะเวลาสกอรัซและระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสมเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นอาจมีปัจจัยอื่นในกากกาแฟที่ช่วยเร่งการคงรูปของยาง ทำให้สภาพความเป็นกรดของกากกาแฟในช่วงการคงรูปไม่ชัดเจน



รูปที่ 4 ผลของการเติมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ที่เตรียมได้จากกากกาแฟต่อระยะเวลาสกอรัซของยางธรรมชาติ



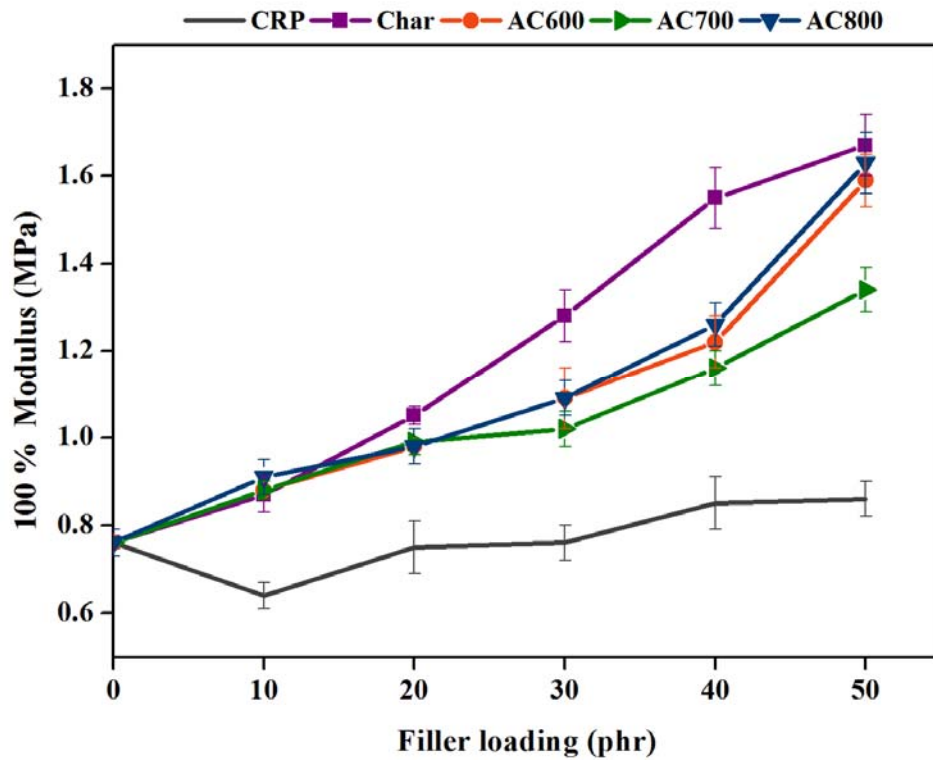
รูปที่ 5 ผลของการเติมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ที่เตรียมได้จากกากกาแฟต่อระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสมของยางธรรมชาติ

2.3 สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ที่เตรียมได้จากกากกาแฟ

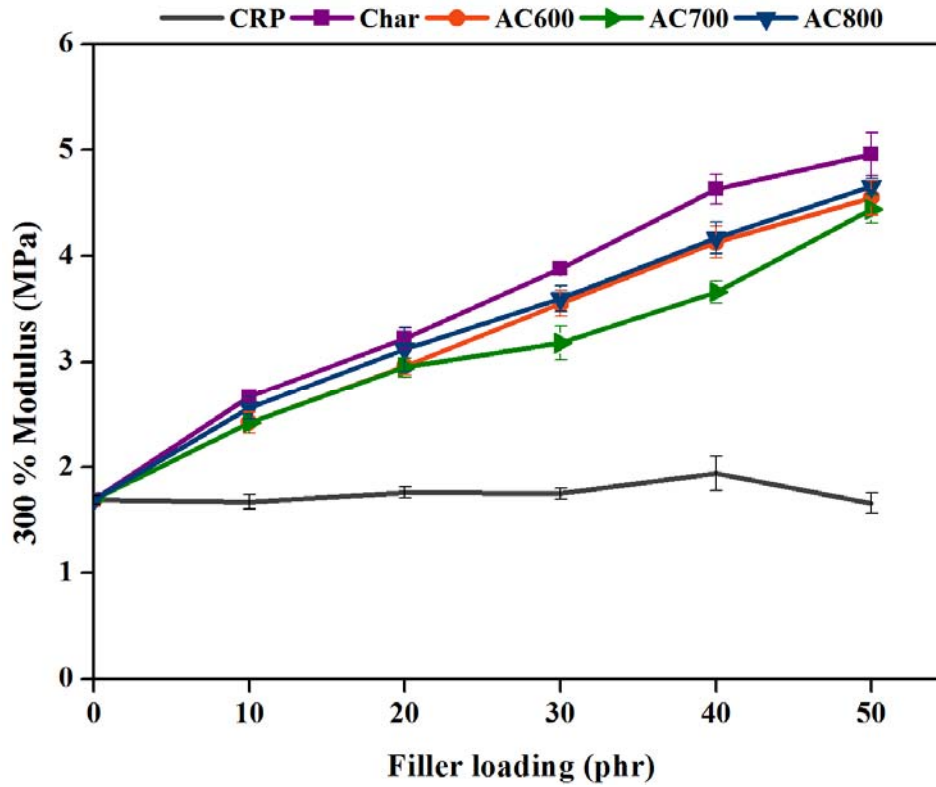
2.3.1 ผลการทดสอบสมบัติความต้านแรงดึง

มอดูลัสที่ความเครียดร้อยละ 100 มอดูลัสที่ความเครียดร้อยละ 300 ความต้านทานแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติเมื่อเติมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ที่เตรียมได้จากกากกาแฟแสดงในรูปที่ 6-9 ตามลำดับ

จากรูปที่ 6 และ 7 พบว่า การเติม Char AC600 AC700 และ AC800 ทำให้ยางธรรมชาติมีค่ามอดูลัสที่ความเครียดร้อยละ 100 และมอดูลัสที่ความเครียดร้อยละ 300 เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่ได้เติมสารตัวเติม และมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มมากขึ้น จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการเติมถ่านและถ่านกัมมันต์ในยางธรรมชาติช่วยปรับปรุงค่ามอดูลัสของยางธรรมชาติให้ดีขึ้น ในขณะที่การเติม CRP ไม่ได้ช่วยเพิ่มค่ามอดูลัสที่ความเครียดร้อยละ 100 และมอดูลัสที่ความเครียดร้อยละ 300 ของยางธรรมชาติมากนัก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเกาะกลุ่มกันของ CRP ทำให้การกระจายตัวในเนื้อยางไม่ดีมากนัก ทำให้ค่ามอดูลัสของยางที่เติม CRP มีค่าน้อยกว่ายางที่เติม Char AC600 AC700 และ AC800 โดยที่ปริมาณมากกว่า 20 phr จะเห็นได้ว่าการเติม Char ทำให้ยางธรรมชาติมีค่ามอดูลัสที่ความเครียดร้อยละ 100 และมอดูลัสที่ความเครียดร้อยละ 300 สูงกว่ายางธรรมชาติที่เติม CRP AC600 AC700 และ AC800

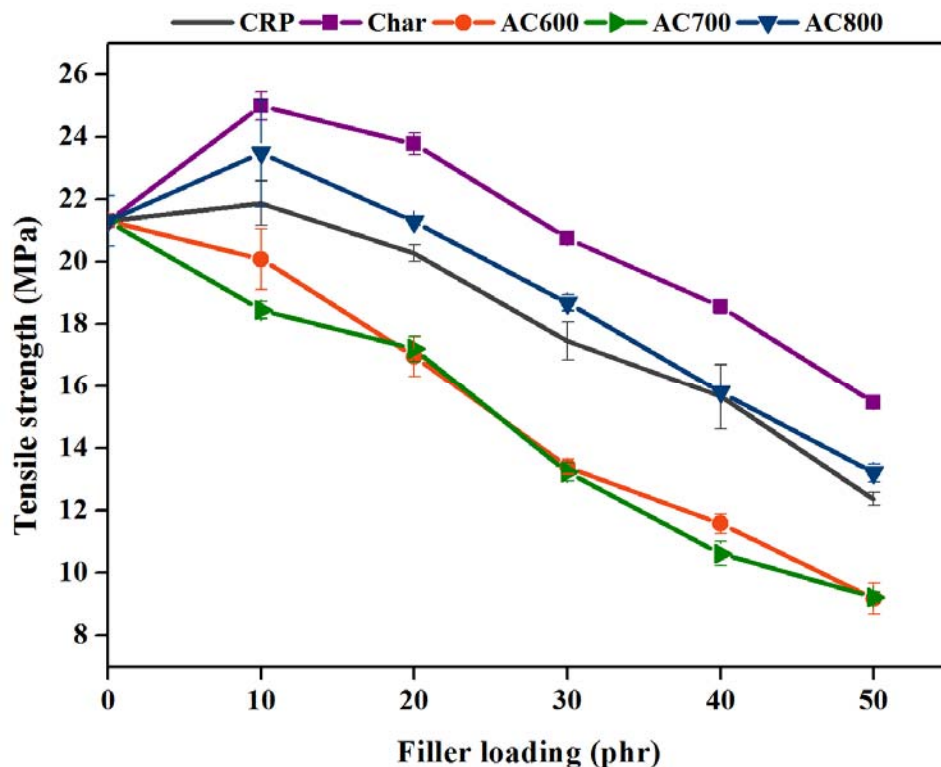


รูปที่ 6 ผลของการเติมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ที่เตรียมได้จากกากกาแฟต่อมอดูลัสที่ความเครียดร้อยละ 100 ของยางธรรมชาติ



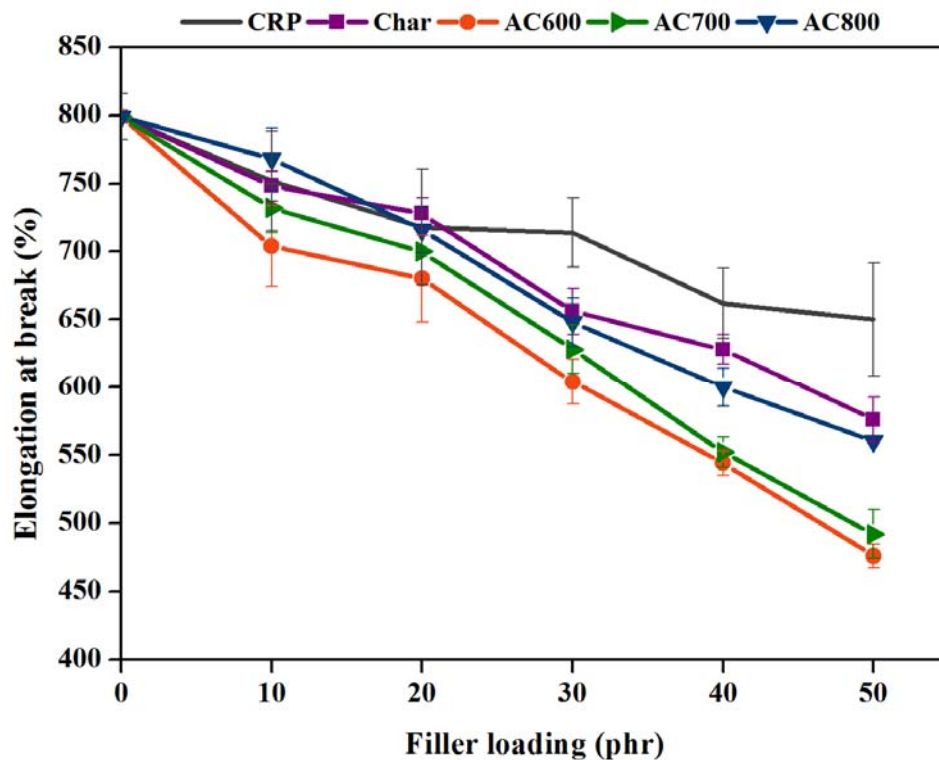
รูปที่ 7 ผลของการเติมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ที่เตรียมได้จากกากกาแฟต่อมอดูลัสที่ความเครียดร้อยละ 300 ของยางธรรมชาติ

จากรูปที่ 8 พบว่า การเติม AC600 และ AC700 ทำให้ค่าความต้านแรงดึงของยางธรรมชาติลดลงเมื่อเทียบกับยางที่ไม่ได้เติมสารตัวเติม และค่าความต้านแรงดึงลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณ AC600 และ AC700 เพิ่มขึ้น โดยจะเห็นได้ว่าการเติม AC600 และ AC700 ส่งผลต่อการลดลงของค่าความต้านแรงดึงใกล้เคียงกัน การเติม CRP และ AC800 ที่ปริมาณ 10 phr ทำให้ยางธรรมชาติมีค่าความต้านแรงดึงสูงกว่ายางที่ไม่ได้เติมสารตัวเติมและมีค่าความต้านแรงดึงลดลงเมื่อปริมาณ CRP และ AC800 เพิ่มขึ้น ในขณะที่การเติม Char ที่ปริมาณตั้งแต่ 10-20 phr ทำให้ยางธรรมชาติมีค่าความต้านแรงดึงมากกว่ายางธรรมชาติที่ไม่ได้เติมสารตัวเติม นอกจากนี้ที่ปริมาณสารตัวเติมที่เท่ากัน การเติม Char ทำให้ยางธรรมชาติมีความต้านแรงดึงที่สูงที่สุดอีกด้วย



รูปที่ 8 ผลของการเติมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ที่เตรียมได้จากกากกาแฟต่อความต้านแรงดึงของยางธรรมชาติ

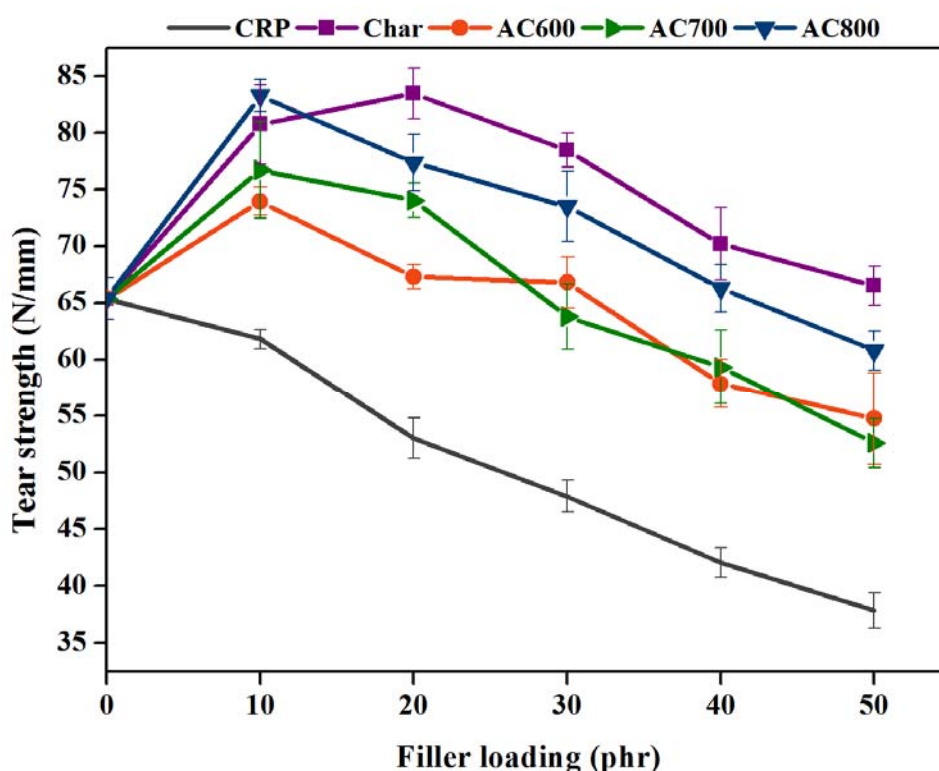
เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติเมื่อเติมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ที่เตรียมได้จากกากกาแฟแสดงดังรูปที่ 9 พบว่า การเติมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ทำให้ยางธรรมชาติมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดลดลงเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มมากขึ้นทำให้ปริมาณเนื้อยางลดลง ส่งผลทำให้ความสามารถในการยืดตัวของโมเลกุลยางลดลง เมื่อปริมาณสารตัวเติมมากกว่า 30 phr จะเห็นได้ว่าการเติม CRP ทำให้ยางธรรมชาติมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดสูงที่สุดเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติที่เติมถ่านและถ่านกัมมันต์



รูปที่ 9 ผลของการเติมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ที่เตรียมได้จากกากกาแฟต่อเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติ

2.3.2 ผลการทดสอบสมบัติความต้านการฉีกขาด

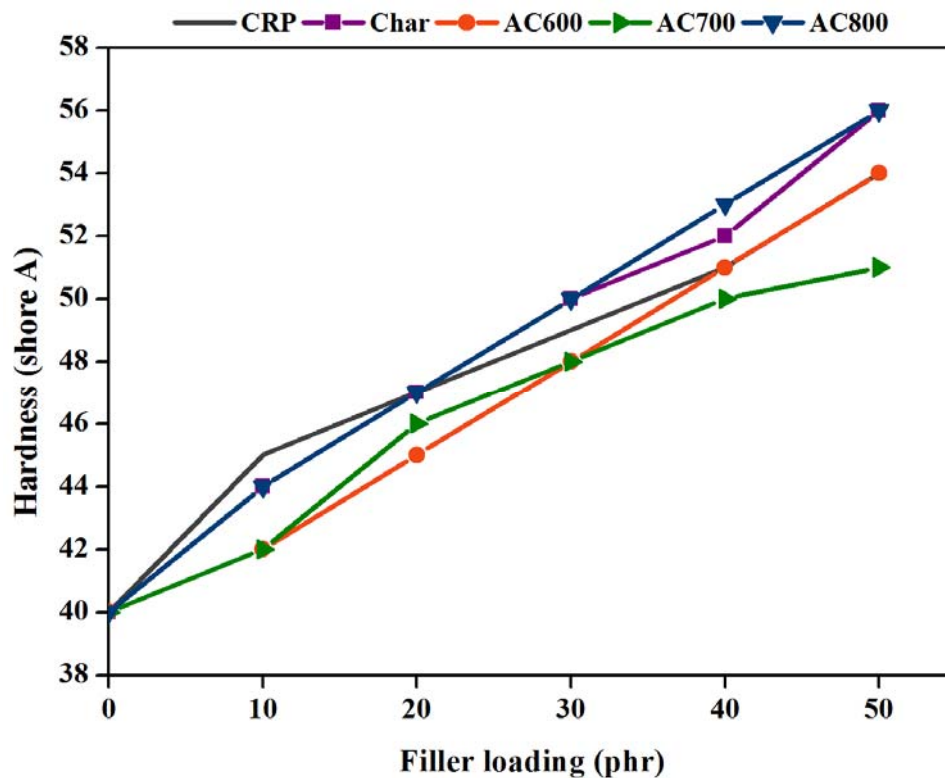
ผลการทดสอบความต้านการฉีกขาดของยางธรรมชาติเมื่อเติมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ที่เตรียมได้จากกากกาแฟ แสดงดังรูปที่ 10 พบว่า การเติม CRP ไม่ส่งผลต่อการปรับปรุงสมบัติความต้านการฉีกขาดของยางธรรมชาติ เมื่อปริมาณ CRP เพิ่มขึ้น ค่าความต้านการฉีกขาดของยางธรรมชาติลดน้อยลงอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่การเติม AC600 AC700 และ AC800 ที่ปริมาณ 10 phr ทำให้ยางธรรมชาติมีค่าความต้านการฉีกขาดสูงที่สุดและมีค่ามากกว่ายางที่ไม่ได้เติมสารตัวเติม แต่เมื่อเติมในปริมาณที่มากขึ้น ค่าความต้านการฉีกขาดของยางธรรมชาติมีแนวโน้มลดลง การเติม Char ที่ปริมาณ 10-50 phr ทำให้ยางธรรมชาติมีค่าความต้านการฉีกขาดสูงกว่ายางธรรมชาติที่ไม่ได้เติมสารตัวเติม โดยการเติม Char ที่ปริมาณ 20 phr ทำให้ยางธรรมชาติมีค่าความต้านการฉีกขาดสูงที่สุด



รูปที่ 10 ผลของการเติมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ที่เตรียมได้จากกากกาแฟต่อความต้านการฉีกขาดของยางธรรมชาติ

2.3.3 ผลการทดสอบสมบัติความแข็ง

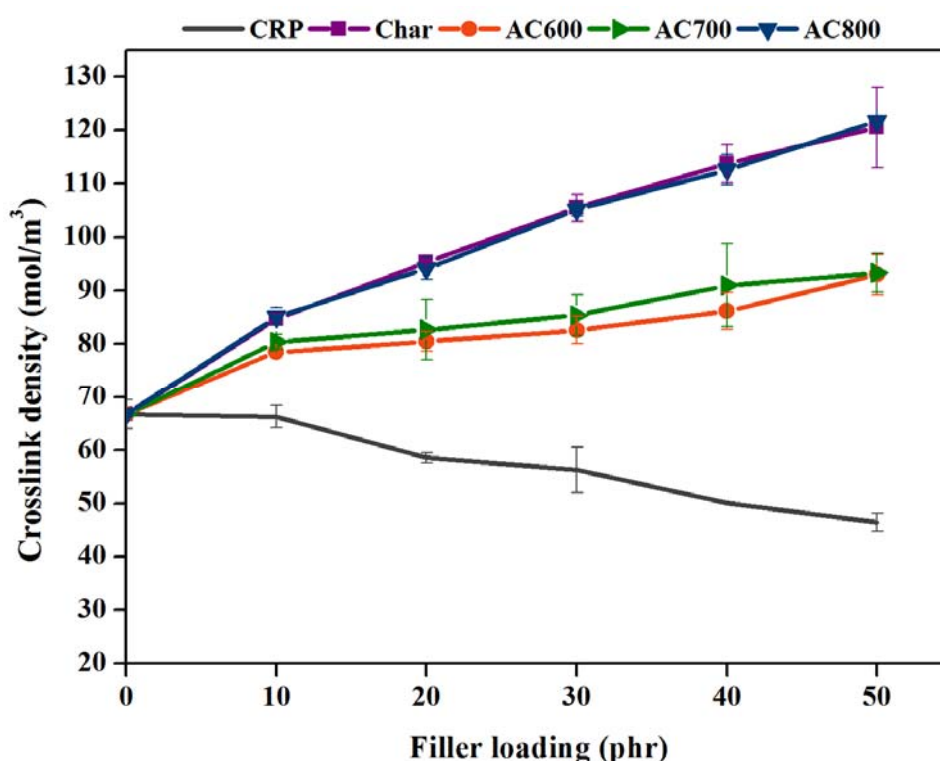
รูปที่ 11 แสดงค่าความแข็งของยางธรรมชาติเมื่อเติมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ที่เตรียมได้จากกากกาแฟ จากการทดลองพบว่า การเติมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ที่เตรียมได้จากกากกาแฟสามารถปรับปรุงความแข็งของยางธรรมชาติ โดยความแข็งของยางธรรมชาติจะสูงมากขึ้นเมื่อปริมาณการเติมสารตัวเติมเพิ่มมากขึ้น ความแข็งของยางธรรมชาติที่เพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการเติมสารตัวเติมทำให้ความยืดหยุ่นของโมเลกุลยางลดน้อยลง ดังนั้นยางจึงมีความแข็งที่เพิ่มมากขึ้น จากการทดลองจะเห็นได้ว่าในช่วง 40 -50 phr การเติม AC700 ทำให้ยางธรรมชาติมีความแข็งที่น้อยที่สุด



รูปที่ 11 ผลของการเติมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ที่เตรียมได้จากกากกาแฟต่อความแข็งของยางธรรมชาติ

2.4 ผลการทดสอบความหนาแน่นของพันธะข้ามของยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ที่เตรียมได้จากกากกาแฟ

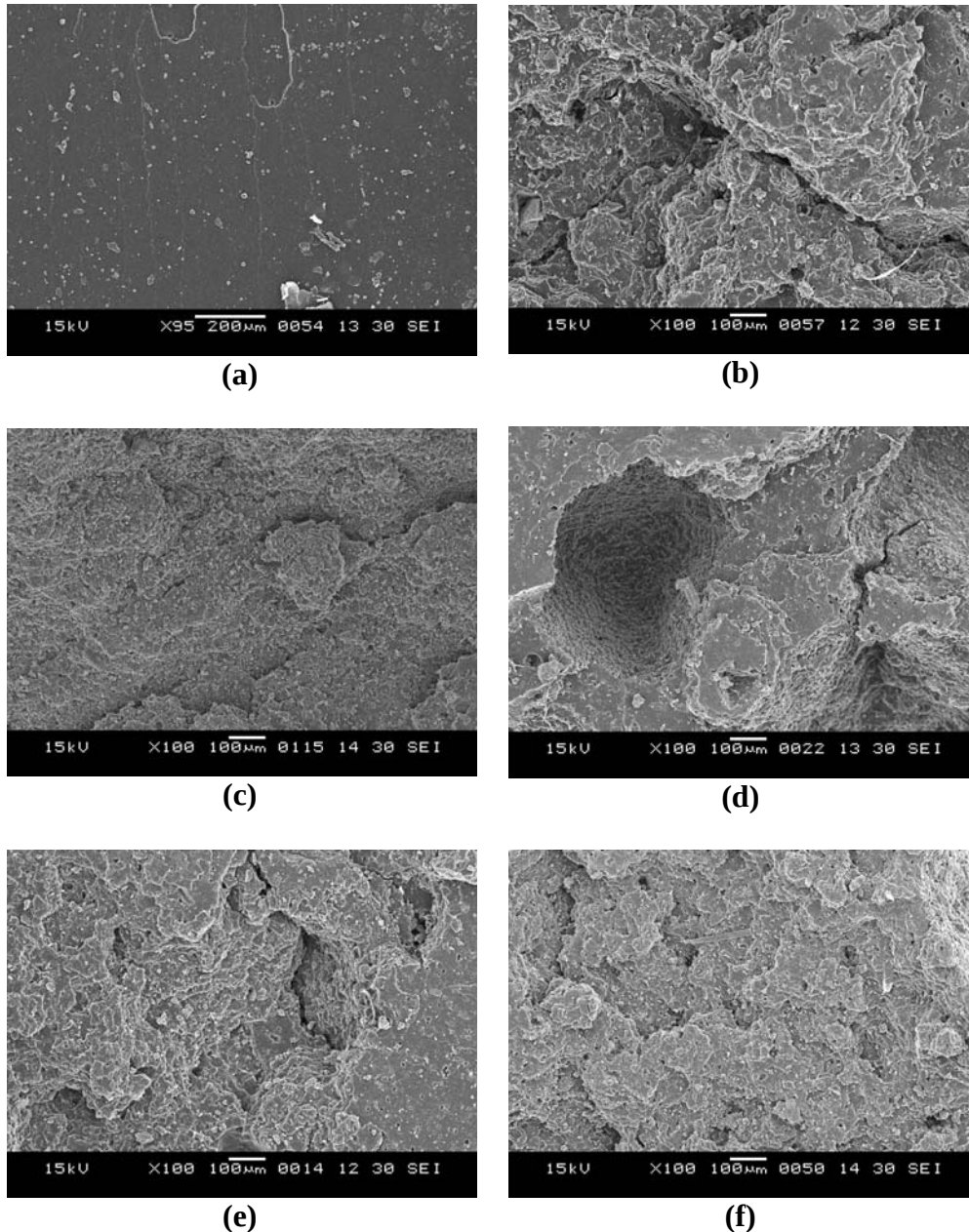
ผลการทดสอบความหนาแน่นของพันธะข้ามของยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ที่เตรียมได้จากกากกาแฟ แสดงดังรูปที่ 12 พบว่า การเติม CRP ทำให้ยางธรรมชาติมีความหนาแน่นของพันธะข้ามที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยความหนาแน่นของพันธะข้ามลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณ CRP สูงมากขึ้น ทั้งนี้ค่าความเป็นกรดของ CRP ทำให้การเชื่อมขวางของยางลดน้อยลง ความหนาแน่นของพันธะข้ามของยางธรรมชาติที่เติม Char AC600 AC700 และ AC800 เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณถ่านและถ่านกัมมันต์เพิ่มสูงขึ้น ที่ปริมาณสารตัวเติมที่เท่ากับยางธรรมชาติที่เติม Char และ AC800 มีค่าความหนาแน่นของพันธะข้ามใกล้เคียงกันและมีค่าสูงที่สุด



รูปที่ 12 ผลของการเติมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ที่เตรียมได้จากกากกาแฟต่อความหนาแน่นของพันธะข้ามของยางธรรมชาติ

2.5 สันฐานวิทยาของยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ที่เตรียมได้จากกากกาแฟ

รูปที่ 13 แสดงภาพ SEM ของพื้นผิวบริเวณที่ศึกษาจากการทดสอบความต้านแรงดึงของยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ที่เตรียมได้จากกากกาแฟ พบว่าพื้นผิวของยางธรรมชาติที่ไม่เติมสารตัวเติมมีความเรียบมากกว่ายางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ โดยพื้นผิวของยางธรรมชาติที่เติม CRP AC600 และ AC700 ปรากฏรอยแตกระหว่างเนื้อยาง แสดงให้เห็นว่าอันตรกิริยาระหว่าง CRP AC600 และ AC700 กับยางธรรมชาติเกิดได้ไม่ดีนัก ในขณะที่พื้นผิวของยางธรรมชาติที่เติม Char และ AC800 มีพื้นผิวที่เรียบและมีความเข้าเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าซึ่งแสดงให้เห็นว่า Char และ AC800 เกิดอันตรกิริยากับยางธรรมชาติได้ดีกว่า ซึ่งนี้อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ยางธรรมชาติที่เติม Char และ AC800 มีค่าความต้านแรงดึงที่สูงกว่ายางธรรมชาติที่เติม CRP AC600 และ AC700



รูปที่ 13 ภาพถ่าย SEM ของยางธรรมชาติที่เติม (a) 0 phr, b) CRP; 10 phr, (c) Char; 10 phr, (d) AC600; 10 phr, (e) AC700; 10 phr และ (f) AC800; 10 phr ที่กำลังขยาย 100 เท่า

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่มีการเติมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ที่เตรียมได้จากกากกาแฟ ได้แก่ CRP Char AC600 AC700 และ AC800 โดยผู้วิจัยคาดหวังว่าการเพิ่มพื้นที่ผิวให้กับสารตัวเติมจะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเสริมแรงของสารตัวเติม โดยการทดลองคาดว่า การเติม AC600 ซึ่งเป็นสารตัวเติมที่มีพื้นที่ผิวที่มากที่สุดจะทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด แต่ผลการทดลองที่ได้กลับพบว่า การเติม Char ทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด ผลการทดลองที่ได้สามารถอธิบายได้ด้วยผลการทดสอบความหนาแน่นของพันธะข้ามของยางธรรมชาติในหัวข้อ 2.4 ซึ่งจะเห็นได้ว่ายางธรรมชาติที่เติม Char และ AC800 มีความหนาแน่นของพันธะข้ามมากที่สุด ทำให้ยางธรรมชาติที่เติม Char มีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด ส่วนยางธรรมชาติที่เติม AC800 กลับมีสมบัติเชิงกลที่ด้อยลงมา ยังไม่สามารถหาเหตุผลมาอธิบายในส่วนนี้ได้ ดังนั้นใน

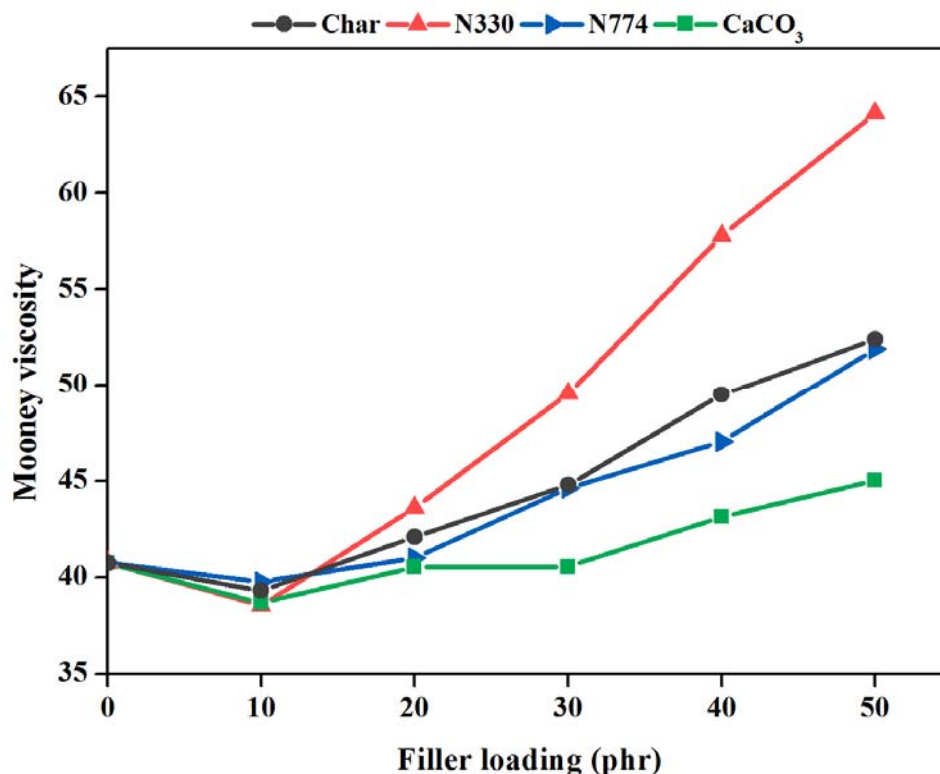
การเปรียบเทียบความสามารถในการเสริมแรงของสารตัวเติมที่เตรียมได้จากกากกาแฟกับสารตัวเติมเชิงการค้า จึงเลือกเปรียบเทียบระหว่าง Char กับสารตัวเติมเชิงการค้าแทน

3. การเปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ ระหว่างยางธรรมชาติที่เติมถ่านที่เตรียมได้จากกากกาแฟกับยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมเชิงการค้า

เพื่อเป็นการศึกษาระดับความสามารถในการเสริมแรงของสารตัวเติมที่เตรียมได้จากกากกาแฟ ในส่วนนี้จึงทำการเปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ ของยางธรรมชาติที่เติม Char ซึ่งเป็นสารตัวเติมที่เตรียมได้จากกากกาแฟที่มีประสิทธิภาพการเสริมแรงสูงที่สุดกับยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมเชิงการค้าได้แก่ เขม่าดำเกรดเสริมแรง (N330) เขม่าดำเกรดกึ่งเสริมแรง (N774) และแคลเซียมคาร์บอเนต

3.1 การเปรียบเทียบความหนืดมูนีระหว่างยางธรรมชาติที่เติมถ่านที่เตรียมได้จากกากกาแฟกับยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมเชิงการค้า

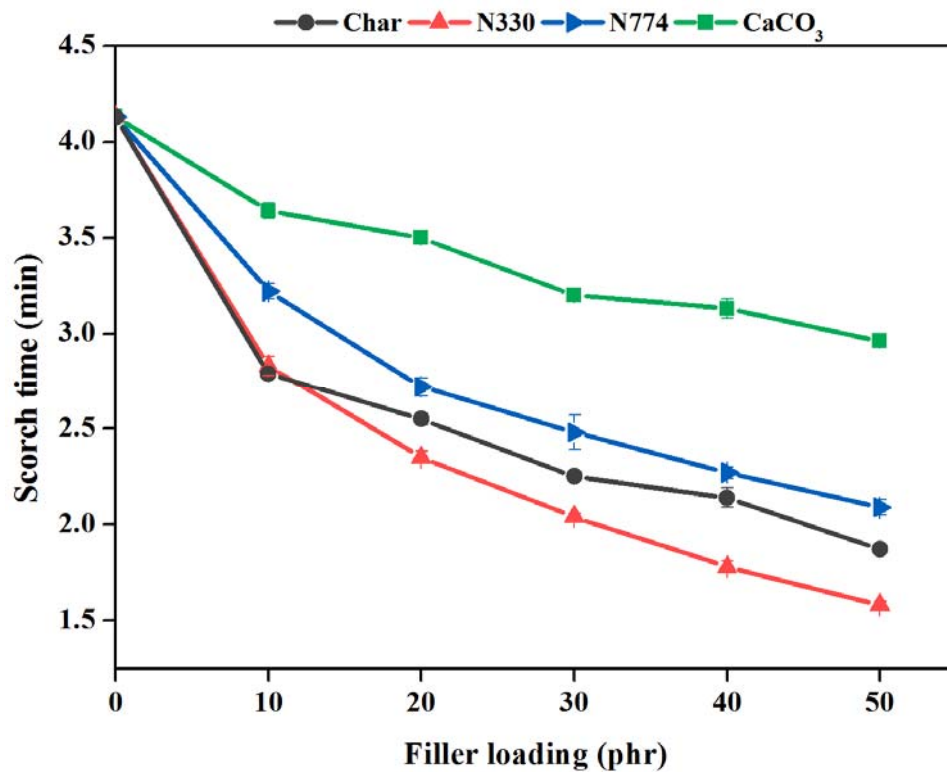
ผลการเปรียบเทียบความหนืดมูนีระหว่างยางธรรมชาติที่เติม Char ที่เตรียมได้จากกากกาแฟกับยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมเชิงการค้าแสดงดังรูปที่ 14 พบว่า ความหนืดมูนีของยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมทุกชนิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มมากขึ้น โดยตั้งแต่ปริมาณตั้งแต่ 20 phr ขึ้นไปจะเห็นได้ชัดเจนว่าความหนืดมูนีของยางธรรมชาติที่เติม Char มีค่าใกล้เคียงกับยางธรรมชาติที่เติมเขม่าดำ N774 และมีความหนืดมูนีมากกว่ายางธรรมชาติที่เติม CaCO_3 อย่างไรก็ตามความหนืดมูนีของยางธรรมชาติที่เติม Char มีค่าน้อยกว่ายางธรรมชาติที่เติมเขม่าดำ N330 ซึ่งเป็นสารตัวเติมเกรดเสริมแรง



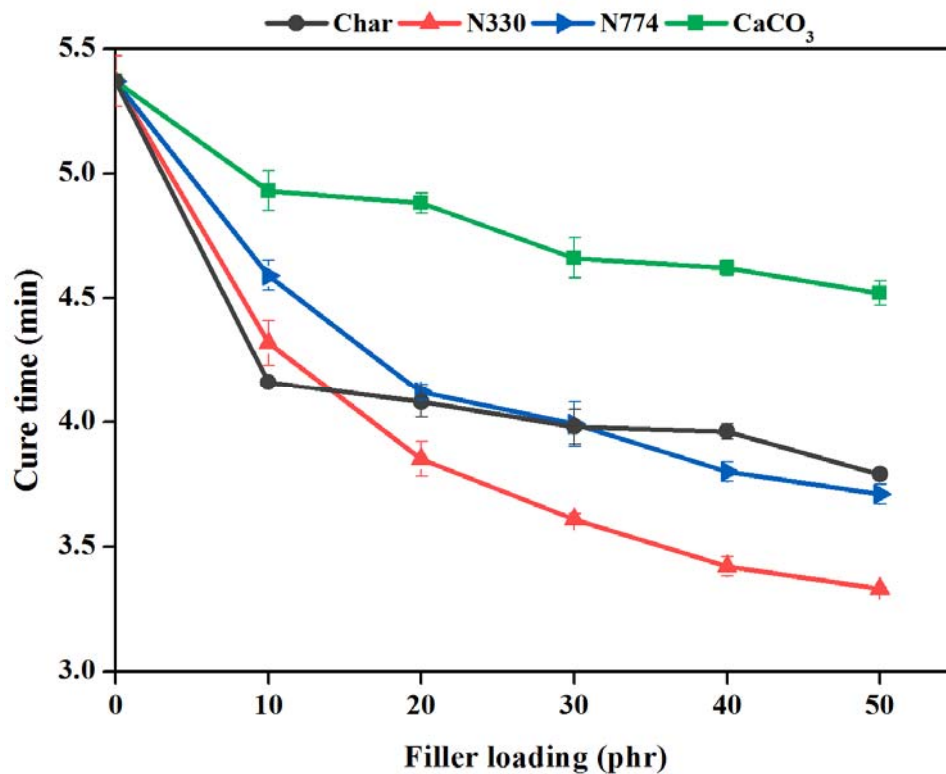
รูปที่ 14 เปรียบเทียบความหนืดมูนีระหว่างยางธรรมชาติที่เติมถ่านที่เตรียมได้จากกากกาแฟกับยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมเชิงการค้า

3.2 การเปรียบเทียบสมบัติการคงรูประหว่างยางธรรมชาติที่เติมถ่านที่เตรียมได้จากกากกาแฟกับยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมเชิงการค้า

รูปที่ 15 และ 16 เป็นผลการเปรียบเทียบระยะเวลาสกอร์ชและระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสมระหว่างยางธรรมชาติที่เติม Char และยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมเชิงการค้า ผลการทดลองที่ได้พบว่า การเติมเขม่าดำ N330 มีผลต่อการลดลงของระยะเวลาสกอร์ชและระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสมมากที่สุด ในขณะที่ยางธรรมชาติที่เติม Char นั้นมีระยะเวลาสกอร์ชและระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสมใกล้เคียงกับเขม่าดำ N774 แต่น้อยกว่า CaCO_3



รูปที่ 15 เปรียบเทียบระยะเวลาสกอร์ชระหว่างยางธรรมชาติที่เติมถ่านที่เตรียมได้จากกากกาแฟกับยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมเชิงการค้า

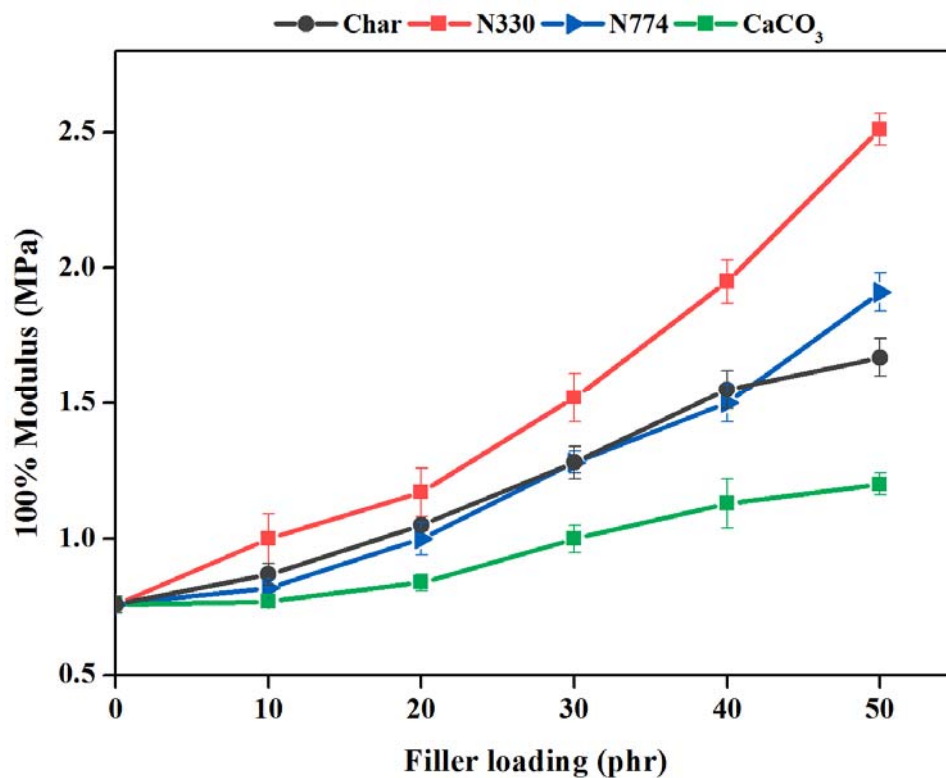


รูปที่ 16 เปรียบเทียบระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสมระหว่างยางธรรมชาติที่เติมถ่านที่เตรียมได้จากกากกาแฟกับยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมเชิงการค้า

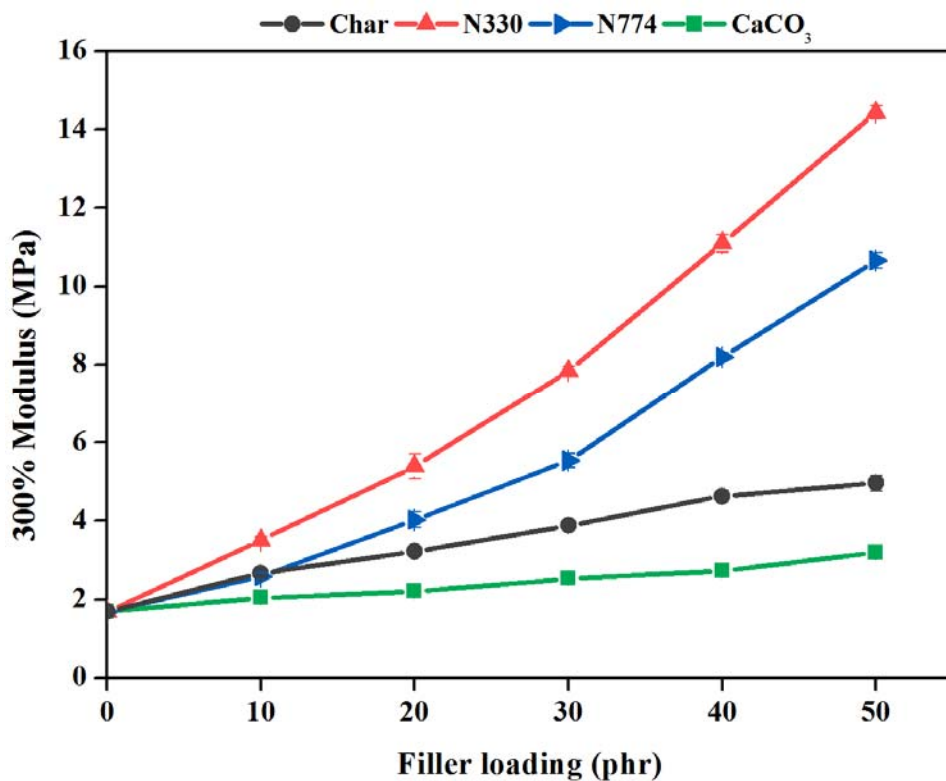
3.3 ผลการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลระหว่างยางธรรมชาติที่เติมถ่านที่เตรียมได้จากกากกาแฟกับยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมเชิงการค้า

3.3.1 ผลการทดสอบสมบัติความต้านแรงดึง

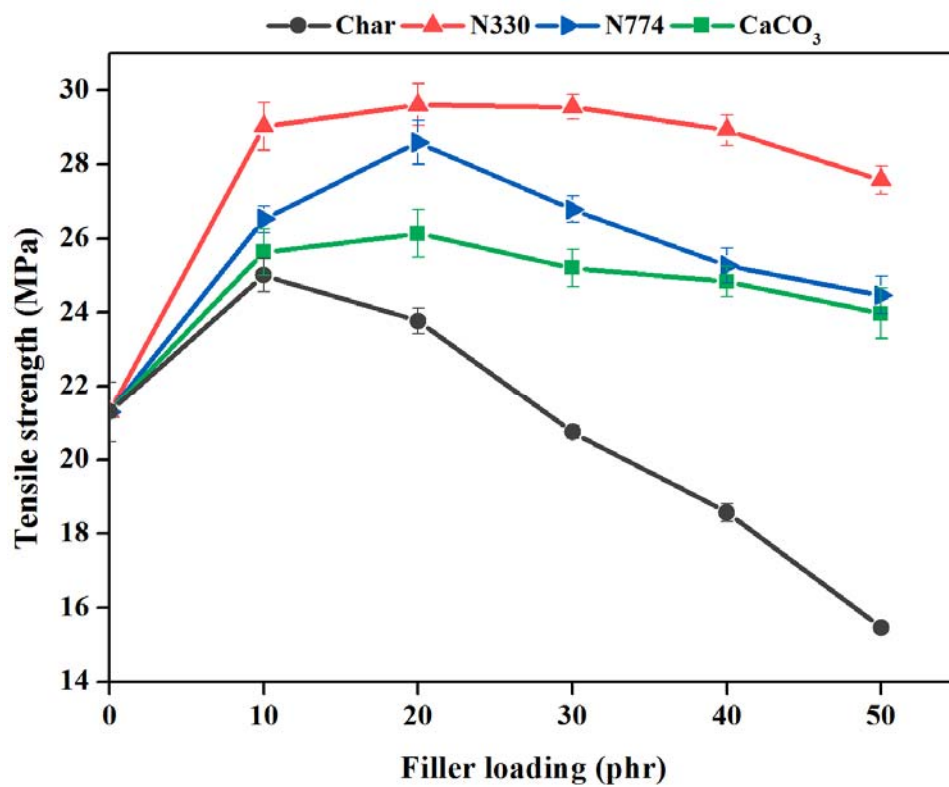
ผลการเปรียบเทียบค่ามอดูลัสที่ความเครียดร้อยละ 100 มอดูลัสที่ความเครียดร้อยละ 300 ความต้านแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดระหว่างยางธรรมชาติที่เติม Char กับยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมเชิงการค้าแสดงดังรูปที่ 17 ถึง 20 พบว่า ยางธรรมชาติที่เติมเขม่าดำเกรด N330 มีค่ามอดูลัสที่ความเครียดร้อยละ 100 และมอดูลัสที่ความเครียดร้อยละ 300 มากที่สุด ในขณะที่ยางธรรมชาติที่เติม CaCO₃ มีค่าน้อยที่สุด ส่วนยางธรรมชาติที่เติม Char นั้นมีค่ามอดูลัสที่ความเครียดร้อยละ 100 ใกล้เคียงกับยางธรรมชาติที่เติมเขม่าดำเกรด N774 อย่างไรก็ตาม ค่ามอดูลัสที่ความเครียดร้อยละ 300 ของยางธรรมชาติที่เติม Char มีค่าน้อยกว่ายางธรรมชาติที่เติมเขม่าดำเกรด N774



รูปที่ 17 เปรียบเทียบมอดูลัสที่ความเครียดร้อยละ 100 ระหว่างยางธรรมชาติที่เติมถ่านที่เตรียมได้จากกากกาแฟกับยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมเชิงการค้า

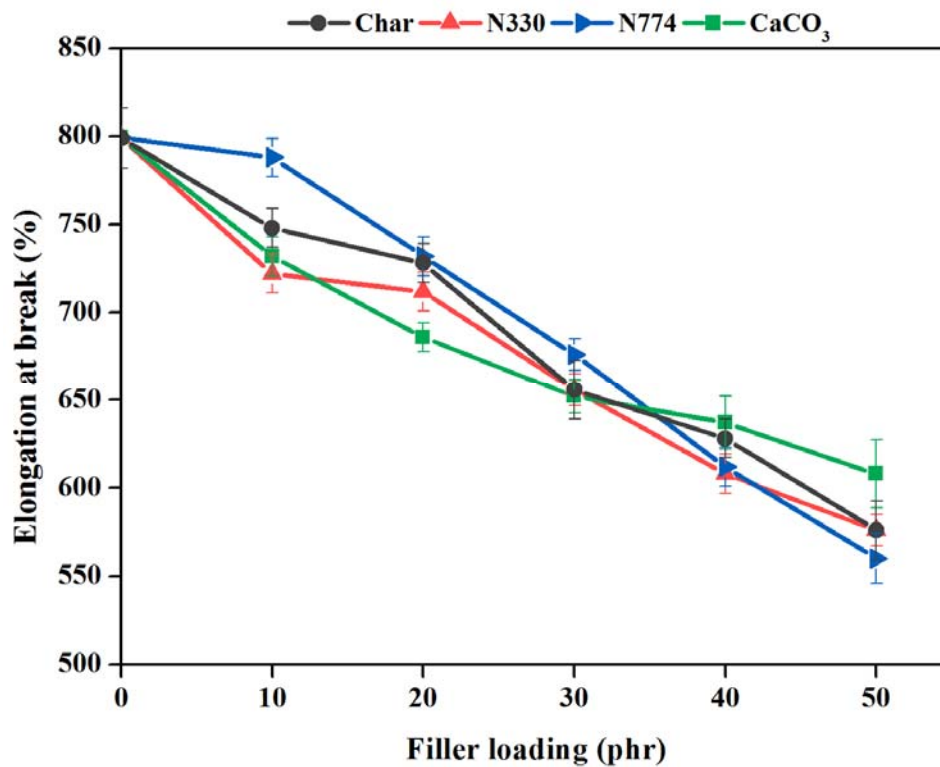


รูปที่ 18 เปรียบเทียบมอดูลัสที่ความเครียดร้อยละ 300 ระหว่างยางธรรมชาติที่เติมถ่านที่เตรียมได้จากกากกาแฟกับยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมเชิงการค้า



รูปที่ 19 เปรียบเทียบความต้านแรงดึงระหว่างยางธรรมชาติที่เติมถ่านที่เตรียมได้จากกากกาแฟกับยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมเชิงการค้า

จากรูปที่ 19 พบว่า ยางธรรมชาติที่เติมเขม่าดำเกรด N330 มีความต้านแรงดึงสูงที่สุด โดยที่ปริมาณสารตัวเติมที่เท่ากัน ยางธรรมชาติที่เติม Char มีความต้านแรงดึงน้อยกว่ายางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมเชิงการค้าทุกชนิด

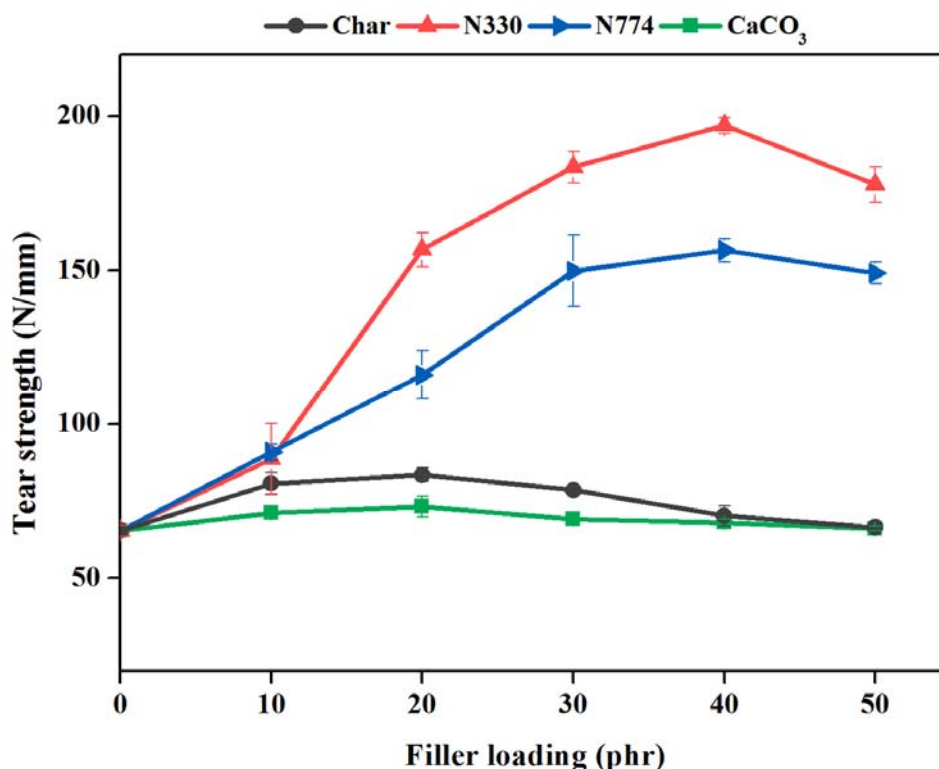


รูปที่ 20 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดระหว่างยางธรรมชาติที่เติมถ่านที่เตรียมได้จากกากกาแฟกับยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมเชิงการค้า

รูปที่ 20 แสดงเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดระหว่างยางธรรมชาติที่เติม Char กับยางธรรมชาติที่สารตัวเติมเชิงการค้า พบว่า ยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมทุกชนิดมีแนวโน้มของเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดคล้ายคลึงกัน คือ เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติลดลงเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มมากขึ้น โดยเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติที่เติม Char ไม่แตกต่างกับยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมเชิงการค้ามากนัก

3.3.2 ผลการทดสอบสมบัติความต้านการฉีกขาด

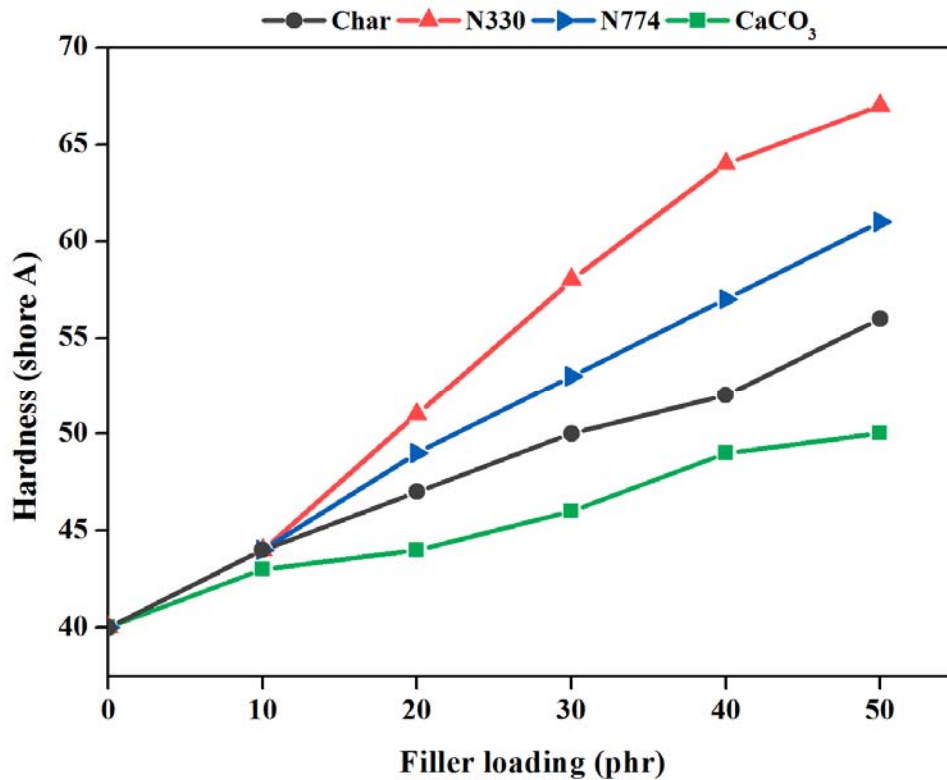
เมื่อเปรียบเทียบความต้านการฉีกขาดระหว่างยางธรรมชาติที่เติม Char กับยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมเชิงการค้าซึ่งแสดงดังรูปที่ 21 พบว่า การเติมเขม่าดำทั้งสองเกรดช่วยปรับปรุงสมบัติความต้านการฉีกขาดของยางธรรมชาติตั้งแต่ช่วง 10 ถึง 40 phr และความสามารถจะเริ่มลดลงเมื่อปริมาณการเติมที่ 50 phr โดยยางธรรมชาติที่เติมเขม่าดำเกรด N330 มีความต้านการฉีกขาดสูงมากกว่ายางธรรมชาติที่เติมเขม่าดำเกรด N774 ในขณะที่ยางธรรมชาติที่เติม Char และ CaCO_3 มีความต้านการฉีกขาดที่ไม่ต่างกันชัดเจนมากนัก โดยที่ปริมาณการเติม Char 10 ถึง 30 phr ทำให้ยางธรรมชาติมีความต้านทานการฉีกขาดมากกว่ายางธรรมชาติที่เติม CaCO_3



รูปที่ 21 เปรียบเทียบความต้านการฉีกขาดระหว่างยางธรรมชาติที่เติมถ่านที่เตรียมได้จากกากกาแฟกับยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมเชิงการค้า

3.3.3 ผลการทดสอบสมบัติความแข็ง

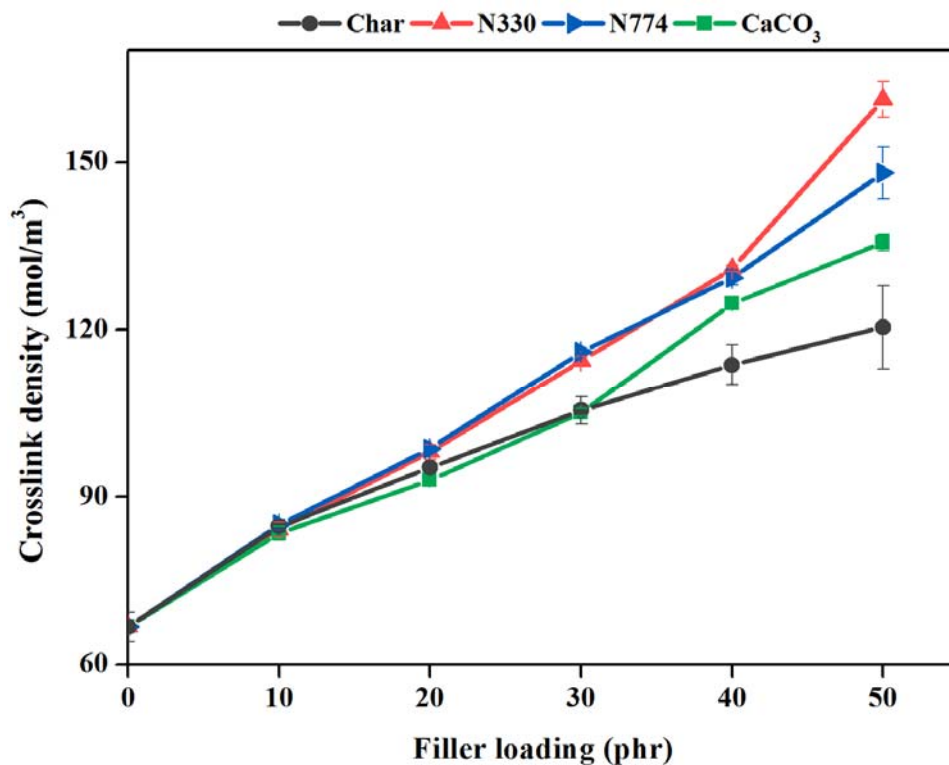
รูปที่ 22 แสดงการเปรียบเทียบความแข็งระหว่างยางธรรมชาติที่เติม Char กับยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมเชิงการค้า พบว่า ยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันคือ ความแข็งของยางธรรมชาติมีค่ามากขึ้นเมื่อปริมาณการเติมสารตัวเติมสูงขึ้น โดยยางธรรมชาติที่เติม Char มีความแข็งน้อยกว่ายางธรรมชาติที่เติมเขม่าดำทั้งสองเกรด แต่มีค่าความแข็งมากกว่ายางธรรมชาติที่เติม CaCO_3



รูปที่ 22 เปรียบเทียบความแข็งระหว่างยางธรรมชาติที่เติมถ่านที่เตรียมได้จากกากกาแฟกับยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมเชิงการค้า

3.4 ผลการเปรียบเทียบความหนาแน่นของพันธะข้ามระหว่างยางธรรมชาติที่เติมถ่านที่เตรียมได้จากกากกาแฟกับยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมเชิงการค้า

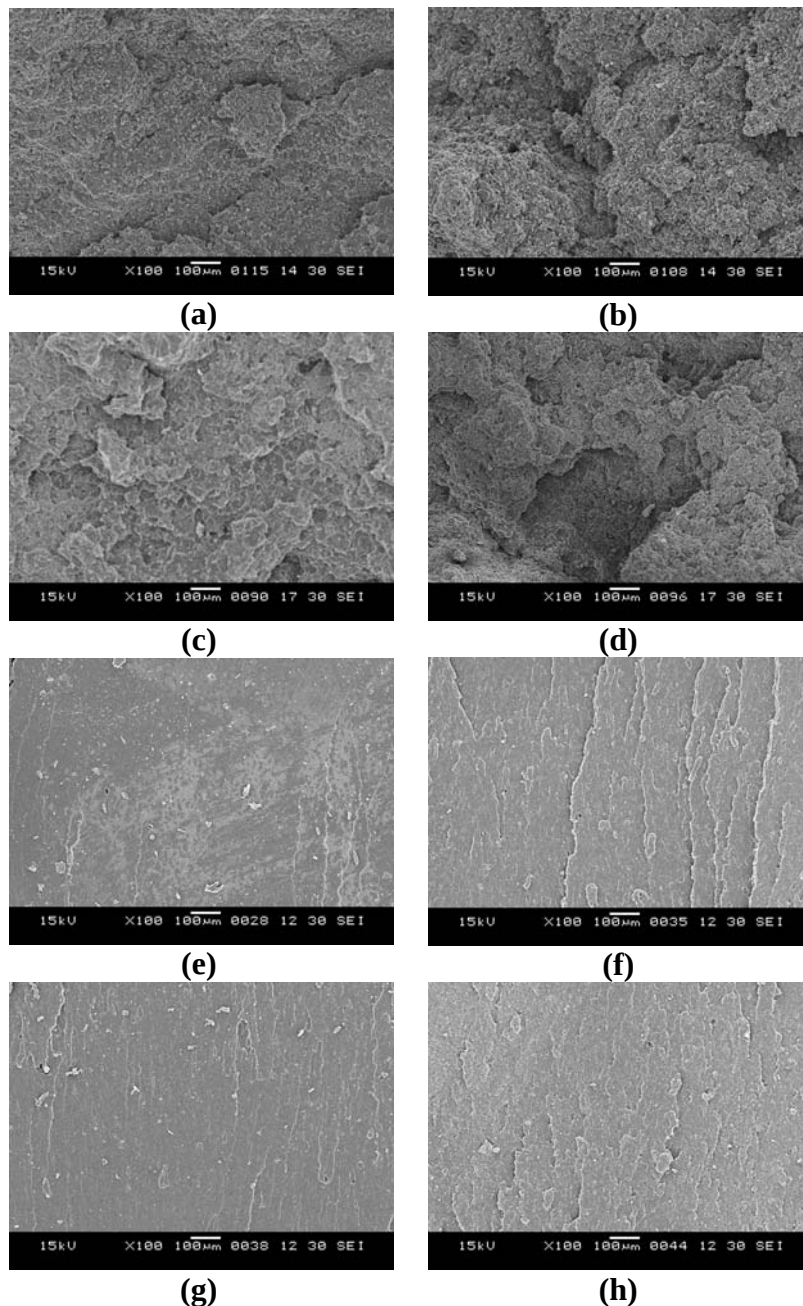
ผลการเปรียบเทียบความหนาแน่นของพันธะข้ามระหว่างยางธรรมชาติที่เติม Char กับยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมเชิงการค้าแสดงดังรูปที่ 23 ยางธรรมชาติที่เติม Char มีความหนาแน่นของพันธะข้ามน้อยกว่ายางธรรมชาติที่เติมเขม่าดำทั้งสองเกรดอย่างชัดเจน แต่มีความหนาแน่นของพันธะข้ามใกล้เคียงกับยางธรรมชาติที่เติม CaCO_3 ที่ปริมาณ 10 ถึง 30 phr และมีค่าน้อยกว่าเมื่อปริมาณการเติมสูงขึ้น



รูปที่ 23 เปรียบเทียบความหนาแน่นของพันธะข้ามระหว่างยางธรรมชาติที่เติมถ่านที่เตรียมได้จากกากกาแฟกับยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมเชิงการค้า

3.5 สัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติที่เติมถ่านที่เตรียมได้จากกากกาแฟกับยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมเชิงการค้า

ภาพ SEM ของชิ้นทดสอบที่ได้จากการทดสอบความต้านแรงดึงของยางธรรมชาติที่เติม Char และ ยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมเชิงการค้าที่ปริมาณ 10 และ 40 phr แสดงดังรูปที่ 24 พบว่า ยางธรรมชาติที่เติม Char มีพื้นผิวที่ขรุขระเหมือนกับยางธรรมชาติที่เติม CaCO_3 ซึ่งเป็นสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรง ในขณะที่ยางธรรมชาติที่เติมเขม่าดำทั้งสองเกรดมีพื้นผิวที่เรียบ บ่งบอกถึงความเข้าเป็นเนื้อเดียวกันระหว่างเขม่าดำกับเนื้อยาง ทำให้ยางธรรมชาติที่เติมเขม่าดำมีค่าความต้านแรงดึง ความต้านการฉีกขาดที่สูงกว่ายางธรรมชาติที่เติม Char และ CaCO_3



รูปที่ 24 ภาพถ่าย SEM ของยางธรรมชาติที่เติม (a) Char; 10 phr (b) Char; 40 phr, (c) CaCO_3 ; 10 phr, (d) CaCO_3 ; 40 phr, (e) เขม่าดำเกรด N330; 10 phr, (f) เขม่าดำเกรด N330; 40 phr, (g) เขม่าดำเกรด N774; 10 phr และ (h) เขม่าดำเกรด N774; 40 phr ที่กำลังขยาย 100 เท่า

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมที่เตรียมได้จากกากกาแฟที่สัดส่วนตั้งแต่ 0 ถึง 50 phr เทียบกับการเติมสารตัวเติมเชิงการค้าสามารถสรุปได้ดังนี้

1. เมื่อเปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ ของยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ที่เตรียมได้จากกากกาแฟ พบว่าถ่านมีประสิทธิภาพในการเสริมแรงสูงที่สุด โดยปริมาณของถ่านที่ทำให้ยางธรรมชาติมีความต้านแรงดึงและความต้านการฉีกขาดสูงสุดอยู่ที่ 10 และ 20 phr ตามลำดับ
2. เมื่อเปรียบเทียบระหว่างยางธรรมชาติที่เติมถ่านและยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมเชิงการค้า พบว่า ถ่านทำให้ยางธรรมชาติมีความต้านแรงดึงต่ำที่สุด แต่มีความต้านการฉีกขาดและความแข็งแรงสูงกว่ายางธรรมชาติที่เติม CaCO_3
3. จากการเตรียมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ จากกากกาแฟ พบว่า ถ่านสามารถนำมาใช้เป็นสารตัวเติมไม่เสริมแรงในยางธรรมชาติได้

ข้อเสนอแนะ

1. จากผลการทดลองพบว่า ถ่านที่เตรียมได้จากกากกาแฟมีประสิทธิภาพในการเสริมแรงสูงที่สุด ดังนั้นการทำให้ถ่านมีขนาดอนุภาคที่ลดลงมากกว่านี้ อาจทำให้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงของถ่านมากขึ้น
2. ศึกษาผลของพื้นที่ผิวของถ่านกับมันต์ที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิการกระตุ้นเพิ่มมากขึ้นซึ่งขัดแย้งกับทฤษฎีในการเตรียมถ่านกับมันต์

เอกสารอ้างอิง

1. Jincheng, W., Yuehui, C. and Jihu, W. Novel Reinforcing Filler: Application to Natural Rubbers (NR) System. *Journal of Elastomers and Plastics*, 2005, 37, 169-180.
2. ศิริินทร์ ทองแสง และ ณรงฤทธิ์ สมบัติสมภพ. การเสริมแรงยางธรรมชาติด้วยเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ ภายในประเทศ. วารสารเทคโนโลยีสุรนารี, 2550, 14(1), 77-89.
3. Sae-Oui, P., Rakdee, C. and Thanmathorn, P. Use of Rice Husk Ash as Filler in Natural Rubber Vulcanizates: In Comparison with Other Commercial Fillers. *Journal of Applied Polymer Science*, 2002, 83, 2485-2493.
4. Ioannidou, O. and Zabaniotou, A. Agricultural Residues as Precursors for Activated Carbon Production-A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007, 11, 1966-2005.
5. Sievetz, M. Coffee Processing Technology, New York, The Avi Publishing Company, 1963.
6. Moran, J.I., Alvarez, V.A., Cyras, V.P. and Vazquez, A. Extraction of Cellulose and Preparation of Nanocellulose from Sisal Fibers. *Cellulose*, 2008, 15, 149-159.
7. Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D.H. and Zheng, C. Characteristics of Hemicelluloses, Cellulose and Lignin Pyrolysis, *Fuel*, 2007, 86, 1781-1788.

ภาคผนวก



การวิจัยสูตรยางธรรมชาติในการผลิตยางในรถจักรยานยนต์

The design of natural rubber compound formulation for the production of motorcycle inner tube

นางสาวปริญาดา เทพทัต, นายสุรสิงห์ แสงกระจ่าง, ผศ.ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ*

(ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.))



บทนำ

ยางในของรถจักรยานยนต์ที่นิยมใช้ในประเทศไทยมี 2 ชนิด คือ ชนิดที่ทำจากยางสังเคราะห์บิวไทล์ (butyl rubber) ซึ่งมีความทนทานและมีสมบัติที่จะปล่อยให้อากาศซึมผ่านได้ต่ำมาก ยางชนิดนี้นิยมใช้ในการผลิตยางในรถจักรยานยนต์น้อยเนื่องจากมีราคาสูง ส่วนยางอีกชนิดทำจากยางธรรมชาติ (natural rubber) แม้ว่าจะมีต้นทุนที่ถูกลง แต่มีความทนทานที่น้อยและรั่วซึมได้ง่ายกว่า ด้วยเหตุนี้เพื่อสนับสนุนการใช้ยางธรรมชาติแทนยางสังเคราะห์บิวไทล์ งานวิจัยนี้จึงพัฒนาสูตรยางธรรมชาติเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตยางในรถจักรยานยนต์ให้มีสมบัติทางกายภาพและเชิงกลให้ใกล้เคียงกับยางสังเคราะห์บิวไทล์

การทดลอง

สูตรในการผสมคอมปาวด์ยาง (ในหน่วยของ phr¹)²

Sample Code	CIIR	BIIR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
	100	100	100	75-C	50-C	25-C	75-B	50-B	25-B
CIIR ³	100	-	-	25	50	75	-	-	-
BIIR ⁴	-	100	-	-	-	-	25	50	75
NR	-	-	100	75	50	25	75	50	25

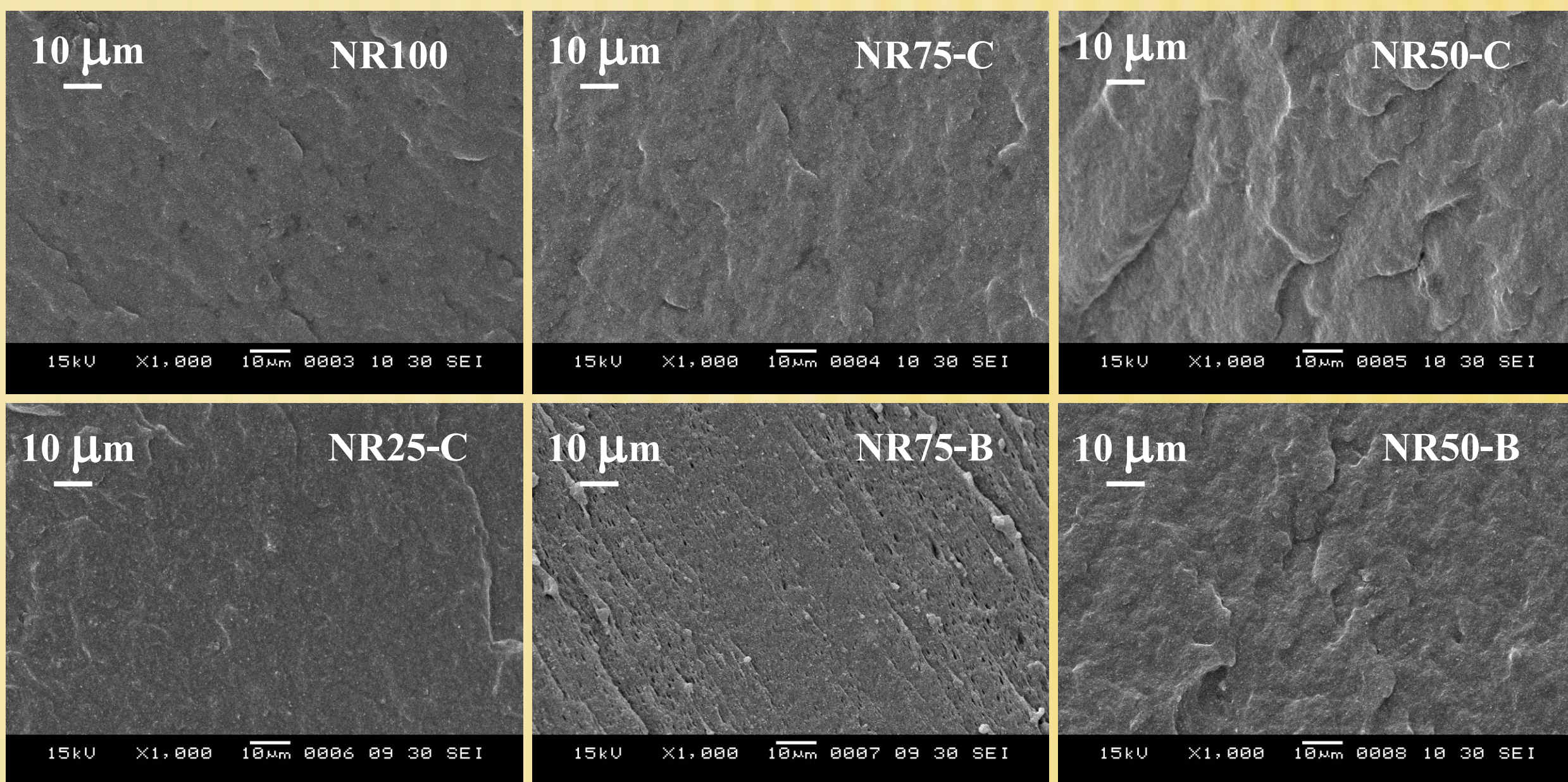
¹ part by weight per hundred part of rubber ² carbon black N550 60 phr, naphthenic oil 8 phr, struktol 60 NS 4 phr, active zinc oxide 3 phr, polyethylene glycol 2 phr, stearic acid 1 phr, 2-mercaptobenzothiazole (MBT) 1 phr, N-(1,3-dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenylenediamine (6PPD) 1 phr, tetramethylthiurammonosulfide (TMTM) 0.5 phr, magnesium oxide 0.5 phr, sulfur 0.5 phr ³ chlorobutyl rubber ⁴ bromobutyl rubber

วัตถุประสงค์

พัฒนาสูตรยางธรรมชาติในการผลิตยางในรถจักรยานยนต์ให้มีสมบัติทางกายภาพและเชิงกลใกล้เคียงกับการใช้ยางสังเคราะห์บิวไทล์

ผลการทดลอง

ส่วนที่ 1 ลักษณะวิทยาของยางหลังผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด



ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์บิวไทล์สามารถผสมเข้ากันได้ดี ไม่มีการแยกวัฏภาค ความเรียบเนียนของพื้นผิวดีและการกระจายตัวของสารเคมีที่ใช้ในการคงรูป (อนุภาคลีขาว) เกิดขึ้นได้ดีในตัวกลางยางทั้ง 2 ชนิด

ส่วนที่ 2 สมบัติต่าง ๆ ของคอมปาวด์ยาง

Sample Code	Mooney (ML 1+4 @100°C)	Curing properties			Mechanical properties					
		T _S ¹	T _q _{max} ²	T ₉₀ ³	M ₁₀₀ ⁴	M ₃₀₀ ⁴	T _B ⁵	E _B ⁶	Hardness ⁷	H _B ⁸
CIIR100	52.16	1.06	3.51	9.57	1.17	4.46	9.90	575	53.6	76.00
BIIR100	62.04	0.85	5.15	10.11	1.55	8.87	13.60	489	51.4	20.80
NR100	20.79	0.63	5.29	1.10	2.06	9.51	16.60	503	56.9	29.70
NR75-C	34.88	0.66	5.95	1.21	2.51	9.63	13.90	499	59.3	31.30
NR50-C	41.48	0.65	4.77	1.49	2.29	7.28	7.70	329	58.9	- ⁹
NR25-C	55.81	0.85	3.99	2.88	2.32	2.92	3.30	336	61.4	- ⁹
NR75-B	28.38	0.62	6.15	1.39	2.39	9.84	14.20	443	59.7	24.70
NR50-B	45.17	0.69	5.31	1.14	2.26	7.77	10.80	460	59.7	32.30
NR25-B	50.80	1.26	4.27	2.36	1.66	5.66	11.40	585	53.3	33.70

¹ scorch time (min) ² torque maximum (dNm) ³ curing time (min) ⁴ ค่าความเค้นที่ 100% และ 300% (MPa) ⁵ tensile strength (MPa) ⁶ elongation at break (%) ⁷ hardness (shore A) ⁸ heat build up (°C) ⁹ ขึ้นทดสอบแตก

สมบัติเชิงกล

- การเพิ่มปริมาณ NR ในยางผสมระหว่าง NR กับ CIIR (หรือ BIIR) ค่า M₁₀₀, M₃₀₀ และ T_B มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยคอมปาวด์ที่มี BIIR ผสมจะให้ค่าที่สูงกว่าคอมปาวด์ที่มี CIIR ผสม เนื่องจากกระบวนการวัลคาไนเซชันที่เลือกใช้ในการทดลองนี้มีความเหมาะสมกับ BIIR มากกว่า
- H_B ของ CIIR100 > NR100 > BIIR100 แสดงว่าเมื่อเปรียบเทียบปริมาณการเติม NR ที่เท่ากัน คอมปาวด์ NR+BIIR จะมีค่า H_B ที่ต่ำกว่าในคอมปาวด์ NR+CIIR
- NR100 ให้ค่าสมบัติเชิงกล (M₁₀₀, M₃₀₀, T_B, E_B และความแข็ง) ใกล้เคียงหรือมากกว่ายางในรถจักรยานยนต์ที่ผลิตจาก NR หรือ IIR ที่มีขายเชิงพาณิชย์ รวมทั้งผ่านค่าที่กำหนดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของยางในรถจักรยานยนต์ (มอก. 683-2530) นอกจากนี้ยังพบว่าไม่เกิดการรั่วซึมของอากาศอีกด้วย

สรุปการทดลอง

ในงานวิจัยนี้สามารถออกแบบสูตรยางธรรมชาติเพื่อใช้ในการผลิตยางในรถจักรยานยนต์ได้ โดยใช้สูตร NR100 ซึ่งให้สมบัติการคงรูป สมบัติเชิงกล ความร้อนสะสม และการรั่วซึมของอากาศใกล้เคียงกับยางในที่มีขายในเชิงพาณิชย์ และผ่านค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของยางในรถจักรยานยนต์ (มอก. 683-2530) โดยไม่จำเป็นต้องใช้ยางสังเคราะห์บิวไทล์ช่วยในเรื่องการลดอัตราการซึมผ่านของอากาศ นอกจากนี้การใช้ยางธรรมชาติยังมีข้อดีหลายอย่าง เช่น 1. เป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศ ระบบการคงรูปที่ไม่ซับซ้อน ไม่มีการปลดปล่อยแก๊สพิษ เช่น HBr หรือ HCl (เมื่อเทียบกับ BIIR และ CIIR) อีกทั้งมีการปลดปล่อยพลังงานความร้อนที่ต่ำและสามารถลดต้นทุนการผลิตได้ถึง 150 บาท/เส้น

ความเหนียว

- ความเหนียวของ BIIR100 > CIIR100 > NR100 เพราะ BIIR มีน้ำหนักโมเลกุลของ repeating unit สูงกว่า CIIR และ NR ตามลำดับ
- เมื่อเพิ่มปริมาณ NR ในยางผสม NR + CIIR/BIIR ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลของคอมปาวด์ยางผสมลดลง ค่าความเหนียวจึงลดลงตามลำดับ

สมบัติการคงรูป

- การออกสูตรนี้มีความเหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันที่ดีทั้ง NR และ BIIR แม้ BIIR จะมีปริมาณพันธะคู่ต่ำกว่า NR แต่การมีหมู่โบรมีนซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า ส่งผลให้หมู่ที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ง่ายกว่าหมู่คลอรีน (ในยาง CIIR) ที่มีขนาดเล็กกว่า ซึ่งต้องใช้พลังงานในการสลายพันธะมากกว่าเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันได้

การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของ NR100 และยางในรถจักรยานยนต์ที่ผลิตจาก NR และ IIR ที่มีขายในเชิงพาณิชย์

Sample Code	M ₁₀₀ ⁴ (MPa)	M ₃₀₀ ⁴ (MPa)	T _B ⁵ (MPa)	E _B ⁶ (%)	Hardness ⁷	Air permeability
NR comm ¹	2.42	6.33	14.40	598	58.0	× ⁸
IIR comm ²	1.66	5.18	7.70	683	50.0	× ⁸
TIS ³	-	-	-	500	-	× ⁸
NR100	2.06	9.51	16.60	503	56.9	× ⁸

¹ ยางในเชิงพาณิชย์ที่ผลิตจากยางธรรมชาติ ² ยางในเชิงพาณิชย์ที่ผลิตจากยางสังเคราะห์บิวไทล์ ³ มอก. 683-2530 ⁴ ค่าความเค้นที่ 100% และ 300% ⁵ tensile strength ⁶ elongation at break ⁷ hardness (shore A) ⁸ × no leakage

การวิจัยสูตรยางธรรมชาติในการผลิตยางในรถจักรยานยนต์¹

The design of natural rubber compound formulation for the production of motorcycle inner tube

ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ^{1,2,*}, ปริญาดา เทพทัต¹, สุรสิงห์ แสงกระจ่าง¹

¹ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถ.พญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

² ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถ.พญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

Sirilux Poompradub^{1,2,*}, Prariyada Theptat¹, Surasing Sangkrajang¹

¹ Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University

Phayathai Rd., Wangmai, Phatumwan, Bangkok 10330

² Center for Petroleum, Petrochemical and Advanced Materials, Chulalongkorn University

Phayathai Rd., Wangmai, Phatumwan, Bangkok 10330

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาและพัฒนาสูตรยางธรรมชาติในการผลิตยางในรถจักรยานยนต์ เพื่อทดแทนการใช้ยางสังเคราะห์บิวไทล์ ยางที่ใช้ในงานวิจัยมี 3 ชนิด ได้แก่ ยางธรรมชาติ (natural rubber), ยางคลอโรบิวไทล์ (chlorobutyl rubber) และยางโบรโมบิวไทล์ (bromobutyl rubber) อัตราส่วนในการผสมยางธรรมชาติต่อยางสังเคราะห์บิวไทล์ (ยางคลอโรบิวไทล์หรือยางโบรโมบิวไทล์) มีดังนี้ 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 เมื่อทำการคงรูปโดยใช้ระบบกัมมันต์ร่วมกับสารคงรูปที่ใช้ในปฏิกิริยาลูกาในเซชัน (vulcanization) พบว่าคอมพาวด์ยางที่ได้จะให้ค่าความหนืดมูนนี่ (mooney viscosity) ลดลงเมื่อผสมยางธรรมชาติในปริมาณที่เพิ่มขึ้น สมบัติการคงรูป (curing properties) อาทิเช่น ระยะเวลาสกอรัช (scorch time) และระยะเวลาที่เหมาะสมในการคงรูป (curing time, t_{90}) มีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น สมบัติเชิงกล (mechanical properties) เช่น ค่าความเค้นที่ 100% (M_{100}) และ 300% (M_{300}) ค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) ค่าความแข็ง (hardness) จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าระยะยืด ณ จุดขาด (elongation at break) จะมีแนวโน้มลดลง และค่าความร้อนสะสมลดลงเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ศึกษาระบบการผสมแบบขั้นเดียว (one stage mixing) และการผสมแบบสองขั้น (two stage mixing) พบว่าการผสมแบบขั้นเดียวให้สมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ดีกว่าการผสมแบบสองขั้น จากงานวิจัยนี้ผู้วิจัยสามารถออกแบบสูตรในการผลิตยางในรถจักรยานยนต์ได้ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของยางในรถจักรยานยนต์ (มอก. 683-2530) และสมบัติเชิงกลที่ได้เทียบเท่ากับยางในรถจักรยานยนต์ที่มีขายในเชิงพาณิชย์ โดยผสมยางธรรมชาติ 100 phr ร่วมกับผงเขม่าดำเกรด N550 (carbon black N550) 60 phr, น้ำมันแนฟทาณิก (naphthenic oil) 8 phr, สตรักทอล (struktol 60 NS) 4 phr, ซิงก์ออกไซด์ (ZnO) 3 phr, polyethylene glycol (PEG) 2 phr, กรดสเตียริก (stearic acid) 1 phr, mercaptobenzothiazole (MBT) 1 phr, N-(1,3-dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenylenediamine (6PPD) 1 phr, tetramethylthiuram monosulfide (TMTM) 0.5 phr, กำมะถัน (sulfur) 0.5 phr และแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) 0.5 phr ตามลำดับ

คำสำคัญ: ยางธรรมชาติ; ยางคลอโรบิวไทล์; ยางโบรโมบิวไทล์; ยางในรถจักรยานยนต์

¹ สัญญาเลขที่ RDG5350032

Abstract

This research is to study and develop the natural rubber compound formulations for producing the motorcycle inner tube that can be used instead of the use of butyl rubber (IIR). There are three kinds of rubber used in this research, i.e., natural rubber (NR), chlorobutyl rubber (CIIR) and bromobutyl rubber (BIIR), respectively. NR was combined with IIR at various ratios (100:0, 75:25, 50:50, 25:75 and 0:100). The mooney viscosity of rubber compounds by using sulfur system for vulcanization became decreased with increasing NR contents. For the curing properties, when the amount of NR increased, scorch time and optimum curing time (t_{90}) were decreased. The mechanical properties, such as modulus at 100% (M_{100}), 300% (M_{300}), tensile strength and hardness trended to be increased with the increase of NR contents, while the elongation at break at heat build up seemed to be decreased. Moreover, this research studied about the one stage and two stage mixing for preparation rubber compounding. The result showed that the one stage mixing gave better mechanical properties than the two stage mixing. This research was found that the designed formulations of motorcycle inner tube was reached not only Thai Industrial Standard of motorcycle inner tube (TIS 683-2530) but also commercial motorcycle inner tube by mixing NR 100 phr with 60 phr carbon black N550, 8 phr naphthenic oil, 4 phr struktol 60 NS, 3 phr zinc oxide (ZnO), 2 phr polyethylene glycol (PEG), 1 phr stearic acid, 1 phr mercaptobenzothiazole (MBT), 1 phr N-(1,3-dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenylenediamine (6PPD), 0.5 phr tetramethylthiuram monosulfide (TMTM), 0.5 phr sulfur and 0.5 phr magnesium oxide (MgO), respectively.

Keyword: *natural rubber; chlorobutyl rubber; bromobutyl rubber; motorcycle inner tube*

1. คำนำ (Introduction)

ปัจจุบันธุรกิจรถจักรยานยนต์มีการเน้นทำตลาดในทวีปเอเชีย ซึ่งเป็นตลาดที่มีการเติบโตมากกว่าภูมิภาคอื่น ๆ และประเทศไทยเองก็พื้นฐานเศรษฐกิจที่มีความสำคัญในการเป็นศูนย์กลางของการผลิต โดยประชากรทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศนิยมใช้รถจักรยานยนต์ในการประกอบกิจกรรมต่าง ๆ เพื่อการดำรงชีวิต ส่งผลให้สินค้าและอะไหล่ของรถจักรยานยนต์ ได้แก่ ล้อและยางใน เป็นปัจจัยสำคัญต่อการขับเคลื่อนรถจักรยานยนต์ให้มีความปลอดภัยสูงสุด รถจักรยานยนต์ในประเทศไทยส่วนใหญ่ใช้ล้อยางประเภทที่ต้องมียางในอยู่ภายใน โดยยางในของรถจักรยานยนต์ที่นิยมใช้มี 2 ชนิด คือ ชนิดที่ทำจากยางสังเคราะห์บิวไทล์ (butyl rubber) ซึ่งมีความทนทานและมีสมบัติที่จะปล่อยให้อากาศซึมผ่านได้ต่ำมาก นอกจากนี้ยังมีสมบัติในการกักเก็บและทนความร้อนได้ดี แต่ยางสังเคราะห์บิวไทล์นิยมใช้ในการผลิตยางในรถจักรยานยนต์กันเป็นส่วนน้อยเนื่องจากมีราคาสูง ส่วนยางอีกชนิดหนึ่งเป็นชนิดที่ทำจากยางธรรมชาติ (natural rubber, NR) แม้ว่าจะมีความทนทานที่น้อยกว่าและรั่วซึมได้ง่ายกว่าเมื่อเทียบกับยางสังเคราะห์ แต่ยางธรรมชาติก็นิยมนำไปผลิตเป็นยางใน เนื่องจากยวาทาที่ถูกว่ายางสังเคราะห์บิวไทล์ จากเหตุผลดังกล่าวทำให้มีผู้ผลิตบางรายเริ่มพยายามใช้ยางธรรมชาติทดแทนการใช้ยางสังเคราะห์บิวไทล์ในการผลิตยางในรถจักรยานยนต์ หากแต่ข้อมูลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการใช้วัตถุดิบยางทั้ง 2 ชนิดนี้ยังอยู่จำนวนน้อยมาก ด้วยเหตุนี้เพื่อเป็นการเอื้อประโยชน์ต่อการสนับสนุนการใช้ยางธรรมชาติแทนยางสังเคราะห์บิวไทล์ ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นพัฒนาสูตรยางธรรมชาติที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตยางในรถจักรยานยนต์ให้มีสมบัติทั้งทางกายภาพและเชิงกลเทียบเท่ากับยางสังเคราะห์บิวไทล์และมีราคาค่อนข้างต่ำในการผลิตที่ต่ำกว่ายางสังเคราะห์บิวไทล์

Y. Wang และคณะ [1] ศึกษาการเตรียมนาโนคอมพอสิตของยางธรรมชาติกับเรคโทไรต์ เคลย์ (rectorite clay) โดยวิธีการจับตัว (co-coagulation) ของน้ำยางธรรมชาติร่วมกับการเติมสารแขวนลอยของเรคโทไรต์ เคลย์ โครงสร้างของวัสดุคอมพอสิตวิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscopy, TEM) และเอ็กซ์เรย์ ดิฟแฟรคชัน (x-ray diffraction, XRD) วัสดุนาโนคอมพอสิตที่ได้มีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) ที่สูงขึ้น ส่วนค่าสูญเสียแทนเจนต์ (loss tangent, $\tan \delta$) มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมเรคโทไรต์ เคลย์ สมบัติการซึมผ่านของแก๊สของวัสดุถูกปรับปรุงดีขึ้นเมื่อมีการเติมเรคโทไรต์ เคลย์ เนื่องจากการซึมผ่านของแก๊สเกิดได้ยากขึ้น นอกจากนี้พบว่าการเติมเรคโทไรต์ เคลย์จะขัดขวางการเกิดผลึกในยางธรรมชาติ

G. Choudalakis และคณะ [2] ทบทวนงานวิจัยเกี่ยวกับการซึมผ่านของแก๊สในวัสดุนาโนคอมพอสิตของพอลิเมอร์กับดินเหนียว (clay) พบว่าการเติมเคลย์ที่มีโครงสร้างของอนุภาคเป็นแบบเพลตเล็ต (platelet) ช่วยลดการซึมผ่านของแก๊สเนื่องจากแผ่นเคลย์จะช่วยเพิ่มระยะทางการแพร่ของโมเลกุลแก๊ส ทำให้โมเลกุลแก๊สต้องเคลื่อนที่อ้อมผ่านแผ่นเคลย์ (tortuosity) แต่การนำเสนอแบบจำลองในลักษณะนี้ต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่อนุภาคเคลย์มีการจัดเรียงตัวแบบ exfoliated และสมมติให้ลักษณะทางกายภาพอื่น ๆ ของตัวกลางพอลิเมอร์ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเติมสารอนินทรีย์ตัวอื่นลงไปแทน ตัวแปรที่มีผลต่อการซึมผ่านของแก๊ส ได้แก่ เศษส่วนปริมาตร (volume fraction) และค่าอัตราส่วนของปริมาตรของเพลตเล็ตต่อเศษส่วนปริมาตร (aspect ratio)

J.Y. Buzaré และคณะ [3] ศึกษาความทนทานต่อการเสื่อมสภาพทางความร้อนของยางธรรมชาติทรงรูป 3 ระบบโดยใช้วิธีการบอ-เอ็นเอ็มอาร์ สเปกโตรสโกปี (^{13}C -NMR spectroscopy) ที่ภาวะของแข็ง (solid state) โดยระบบการคงรูปที่ศึกษาในงานวิจัยนี้แบ่งเป็น 3 ระบบดังนี้ ระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพ (efficient vulcanization, EV) มีการเชื่อมโยงผ่านพันธะมอนอซัลไฟดิก (monosulfidic) ระบบการคงรูปแบบดั้งเดิม (conventional vulcanization, CV) มีการเชื่อมโยงผ่านพันธะพอลิซัลไฟดิก (polysulfidic) และระบบการคงรูปด้วยเพอร์ออกไซด์มีการเชื่อมโยงผ่านพันธะเดี่ยวของคาร์บอน สูตรของยางที่ทำการขึ้นรูปมีทั้งเติมผงเขม่าดำและไม่เติมผงเขม่าดำ และศึกษาระยะเวลาที่ใช้คงรูปยางที่ร้อยละ 40 และ 98

พบว่าระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพหรือระบบการคงรูปด้วยเพอร์ออกไซด์ไม่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของการคงรูปของยางธรรมชาติ ในขณะที่ระบบการขึ้นรูปแบบดั้งเดิมส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของการคงรูปของยางธรรมชาติกล่าวคือ เกิดการทำลายของพันธะพอลิซัลไฟด์

D. M. Park และคณะ [4] ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนสะสมกับระบบการคงรูปของยางธรรมชาติ โดยระบบการคงรูปที่ศึกษามี 4 ระบบคือ ระบบการคงรูปแบบดั้งเดิม ระบบการคงรูปแบบกึ่งประสิทธิภาพ (semi-efficient vulcanization, semi-EV) ระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพ และระบบการคงรูปด้วยไดคิวมิลเพอร์ออกไซด์ (dicumyl peroxide, DCP) พบว่าการเชื่อมโยงระดับสูงในระบบ semi-EV หรือ EV ส่งผลให้ความร้อนที่เกิดขึ้นลดลง หลังจากการทดสอบการบ่มเร่งด้วยความร้อน (thermal aging)

A. K. Ghosh และคณะ [5] ศึกษาการผสมระหว่างยางธรรมชาติ (NR) ซึ่งมีพันธะไม่อิ่มตัวสูงกับยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (EPDM) ที่มีพันธะไม่อิ่มตัวต่ำด้วยการใช้สารคู่ควบชนิด Bis(diisopropyl)thiophosphoryl disulfide (DIPDIS) เป็นตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ในเซชันและใช้เทคนิคการวัลคาไนเซชันสองขั้น (two-stage vulcanization) และขั้นเดียว (one-stage vulcanization) พบว่าการใช้เทคนิคการวัลคาไนเซชันสองขั้นสามารถขึ้นรูปยางคอมปาวด์ได้และความเข้ากันได้ของยางที่มีพันธะไม่อิ่มตัวต่างกันเกิดขึ้นได้ดี เมื่อพิจารณาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning electron microscopy, SEM) นอกจากนี้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนที่ได้ยังเพิ่มขึ้นอีกด้วย

2. อุปกรณ์และวิธีการ (Materials and Methods)

2.1 อุปกรณ์และสารเคมี

ยางธรรมชาติเกรด STR-5L สั่งซื้อจากบริษัท แพน อินโนเวชั่น จำกัด, ยางคลอโรบิวไทล์เกรด 1240 สั่งซื้อจากบริษัท Caldic จำกัด, ผงเขม่าดำเกรด N550 สั่งซื้อจากบริษัท Thai Carbon Black จำกัด, น้ำมันเนฟเทนิค สั่งซื้อจากบริษัท จัส ดิน จำกัด, สตรักทอล (struktol 60NS) สั่งซื้อจากบริษัท Schill Seilacher จำกัด, กำมะถัน สั่งซื้อจากบริษัท สยามเคมี จำกัด, แอ็กทีฟซิงก์ออกไซด์ สั่งซื้อจากบริษัท อูทิสเอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด, คาโอลิไนท์ สั่งซื้อจากบริษัท ไทยสงวนวัฒน์เคมีภัณฑ์ จำกัด, ไดเบนโซไทอะซิลไดซัลไฟด์ (MBTS) สั่งซื้อจากบริษัท Flexsys จำกัด, เมอร์แคปโตเบนโซไทอะโซล (MBT) สั่งซื้อจากบริษัท เคมีภัณฑ์อินเตอร์เทรด จำกัด, ยางโบรโมบิวไทล์เกรด 2244, กรดสเตียริก, แมกนีเซียมออกไซด์, พอลิเอทิลีนไกลคอล, ไดเมทิลบิวทิลฟีนิลฟีนิลไดเอมีน (6PPD) และเตตระเมทิลไทยแรมโมโนซัลไฟด์ (TMTM) สั่งซื้อจากบริษัท พี โอ อินดัสทรี จำกัด

2.2 วิธีการทดลอง

2.2.1 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงความร้อน (thermal gravimetric analysis) ของยางในรถจักรยานยนต์ที่ผลิตจากยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์บิวไทล์ที่มีขายในเชิงพาณิชย์

การวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวและน้ำหนักที่สูญหาย (weight loss) ของยางในรถจักรยานยนต์ที่ผลิตจากยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์บิวไทล์ที่มีขายในเชิงพาณิชย์ถูกวิเคราะห์โดยเครื่อง Perkin Elmer รุ่น Pyris Diamond โดยตัดชิ้นตัวอย่างยางในรถจักรยานยนต์ให้มีน้ำหนักประมาณ 10 ± 0.5 มิลลิกรัม ใส่ลงในถาดแพลตตินัมและใช้ถาดแพลตตินัมเปล่าเป็นตัวอย่างอ้างอิง จากนั้นให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องจากอุณหภูมิห้องจนถึง 1,000 องศาเซลเซียส ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ป้อนอากาศเข้า 50 มิลลิตรต่อนาที

2.2.2 การหาสูตรยางธรรมชาติที่เหมาะสมสำหรับผลิตยางในรถจักรยานยนต์

เตรียมยางธรรมชาติ ยางคลอโรบิวไทล์ ยางโบรโมบิวไทล์ และสารเคมีสำหรับทำปฏิกิริยาลูกโซ่ในเซชันดังแสดงในตารางที่ 2.1- 2.5 โดยสูตรที่ 1 ถึง 4 ทำการบดผสมแบบขั้นเดียว (one stage mixing) คือการนำยาง (ยาง

ธรรมชาติ ยางคลอโรบิวไทล์ และยางโบรโมบิวไทล์) แต่ละชนิดบดแยกกันก่อน จากนั้นจึงนำยางธรรมชาติบดผสมร่วมกับยางคลอโรบิวไทล์หรือยางโบรโมบิวไทล์ให้เข้ากันแล้วจึงใส่สารเคมียาง ส่วนสูตรที่ 5 ทำการบดผสมแบบสองชั้น (two stage mixing) คือการนำยางคลอโรบิวไทล์หรือยางโบรโมบิวไทล์บดผสมกับสารเคมียางก่อน แล้วจึงบดผสมร่วมกับยางธรรมชาติที่หลัง โดยใช้เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (two-roll mill) นำคอมปาวด์ยางที่เตรียมได้ไปทดสอบด้วยเครื่อง moving die rheometer (MDR) ยี่ห้อ TECHPRO รุ่น rheotech MD+ ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการคงรูปยาง หลังจากนั้นนำคอมปาวด์ยางที่ได้ไปขึ้นรูปโดยใช้เครื่อง compression moulding machine ที่ความดัน 150 กิโลพาสคัล อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ตามเวลาที่เหมาะสมในการคงรูปคอมปาวด์ยางสูตรนั้น ๆ หลังจากนั้นนำยางที่ขึ้นรูปเรียบร้อยแล้วไปทดสอบสมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาต่อไป การกำหนดชื่อชิ้นงานตัวอย่าง (sample code) สำหรับงานวิจัยนี้ แสดงดังต่อไปนี้ ตัวเลข 1, 2, 3, 4, และ 5 หมายถึงสูตรที่ 1, 2, 3, 4, และ 5, NR หมายถึง ยางธรรมชาติ, CIIR หรือ C หมายถึง ยางคลอโรบิวไทล์, BIIR หรือ B หมายถึง ยางโบรโมบิวไทล์ และตัวเลขหลัง NR, CIIR และ BIIR แสดงการใส่ยางในปริมาณหน่วยของส่วนในร้อยส่วนของยาง (parts by weight per hundred parts of rubber: phr)

2.2.3 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของคอมปาวด์ยางและยางหลังผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน

2.2.3.1 การทดสอบความหนืดมูนนี่ (mooney viscosity)

คอมปาวด์ยางที่เตรียมได้ถูกทดสอบความหนืดมูนนี่โดยเครื่องวัดความหนืดมูนนี่ (mooney viscometer) ยี่ห้อ TECHPRO รุ่น ViscTECH+ ตามมาตรฐาน ASTM D 1646 โดยตัดชิ้นงานน้ำหนักประมาณ 25 กรัม แล้วแยกชิ้นงานออกเป็น 2 ชิ้น ชิ้นแรกวางด้านบนโรเตอร์ (rotor) ส่วนชิ้นที่สองวางด้านล่างโรเตอร์ แคมเบอร์ (chamber) จะกดให้ยางหุ้มรอบโรเตอร์ ตัวเครื่องจะอุ่นโรเตอร์ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จากนั้นอุ่นยาง 1 นาที โรเตอร์จะเริ่มหมุนที่ความเร็ว 2 รอบต่อนาที เมื่อหมุนครบ 4 นาที แล้วอ่านค่าความหนืดที่วัดได้

2.2.3.2 การทดสอบสมบัติการคงรูป (curing properties)

สมบัติการคงรูปของคอมปาวด์ยางถูกทดสอบโดยเครื่อง moving die rheometer (MDR) ยี่ห้อ TECHPRO รุ่น rheotech MD+ ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ตัด ชิ้นงานประมาณ 5 กรัม จากนั้นตัวเครื่องจะกดเพลต (plate) บนและล่างมาประกบกัน แล้วหัวตาย (die) ล่างจะบิดกลับไปกลับมาทำมุม 0.5 องศา ด้วยความเร็ว 1.7 เฮิร์ตซ์ หรือ 100 รอบต่อนาที

2.2.3.3 การทดสอบแรงดึง (tensile testing)

ตัดชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันที่ต้องการเป็นรูปดัมเบลตามมาตรฐาน ASTM D412 จำนวน 5 ชิ้น นำชิ้นงานที่เตรียมได้ไปทดสอบด้วยเครื่อง universal testing machine รุ่น INSTRON 3344 ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 27 องศาเซลเซียส ความเร็วในการทดสอบ 500 มิลลิเมตร/นาที ทำการทดสอบทั้งหมด 5 ครั้ง แล้วนำค่าที่ได้จากการทดลองมาหาค่าเฉลี่ย

2.2.3.4 การทดสอบความแข็ง (hardness)

ตัดชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันที่ต้องการวัดให้มีความหนา 6 มิลลิเมตร นำชิ้นงานใส่เครื่อง durometer แล้วทดสอบแบบ Shore durometer type A ตามมาตรฐาน ASTM D2240 จากนั้นปล่อยหัว durometer ลงบนชิ้นงาน จับเวลา 5 วินาที อ่านค่าที่ได้และบันทึกผล จากนั้นทำการเปลี่ยนจุดที่ใช้วัดอีก 5 จุด นำค่าความแข็งที่วัดได้มาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ 2.1 สูตรที่ 1 ในการผสมคอมปาวด์ยาง (ในหน่วยของ phr¹): บดผสมแบบขั้นเดียว

Sample code	1NR100	1NR90-C	1NR70-C	1NR50-C	1CIIR100
Natural Rubber	100	90	70	50	-
Chlorobutyl Rubber	-	10	30	50	100
Carbon black (N550)	60	60	60	60	60
Active ZnO ²	3	3	3	3	3
Steric acid	1	1	1	1	1
MBTS ³	1	1	1	1	1
Sulfur	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Total	165.5	165.5	165.5	165.5	165.5

¹ Part per hundred of rubber, ² Active zinc oxide, ³ Dibenzothiazyl disulfide

ตารางที่ 2.2 สูตรที่ 2 ในการผสมคอมปาวด์ยาง (ในหน่วยของ phr¹): บดผสมแบบขั้นเดียว

Sample code	2NR100	2NR90-C	2NR70-C	2NR50-C	2CIIR100
Natural Rubber	100	90	70	50	-
Chlorobutyl Rubber	-	10	30	50	100
Carbon black (N550)	60	60	60	60	60
Naphthenic Oil	8	8	8	8	8
Active ZnO ²	3	3	3	3	3
Struktol 60 NS	1	1	1	1	1
Steric acid	1	1	1	1	1
MBTS ³	1	1	1	1	1
Sulfur	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
MgO ⁴	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Total	175	175	175	175	175

¹ Part per hundred of rubber, ² Active zinc oxide, ³ Dibenzothiazyl disulfide, ⁴ Magnesium oxide

2.2.3.5 การทดสอบความร้อนสะสม (heat build up)

ขึ้นรูปชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันเป็นรูปทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.7 มิลลิเมตร สูง 1 นิ้ว ตามมาตรฐาน ASTM D623 นำไปทดสอบค่าความร้อนสะสมโดยใช้เครื่อง BF Goodrich Flexometer รุ่น MODEL II ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยใช้ชิ้นงานเข้าไปอุ่นเป็นเวลาประมาณ 10-25 นาที เครื่องจะบีบอัดชิ้นงานโดยใช้ความถี่ 30 เฮิร์ต ระยะกด (stroke) 4.45 มิลลิเมตร และแรงกด (force) 245 นิวตัน ผลการทดสอบถูกรายงานเป็นอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิฐาน (base temperature) ที่ 100 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 2.3 สูตรที่ 3 ในการผสมคอมปาวด์ยาง (ในหน่วยของ phr¹): บดผสมแบบขั้นเดียว

Sample code	3NR100	3NR75-C	3NR50-C	3NR25-C	3CIIR100	3NR75-B	3NR50-B	3NR25-B	3BIIR100
Natural Rubber	100	75	50	25	-	75	50	25	-
Chlorobutyl Rubber	-	25	50	75	100	-	-	-	-
Bromobutyl Rubber	-	-	-	-	-	25	50	75	100
Carbon black (N550)	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Naphthenic Oil	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Struktol 60 NS	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Active ZnO ²	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Steric acid	1	1	1	1	1	1	1	1	1
MBTS ³	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6 PPD ⁴	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Sulfur	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
MgO ⁵	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Total	179	179	179	179	179	179	179	179	179

¹ Part per hundred of rubber, ² Active zinc oxide, ³ Dibenzothiazyl disulfide, ⁴ N-(1,3-dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenylenediamine, ⁵ Magnesium oxide

ตารางที่ 2.4 สูตรที่ 4 ในการผสมคอมปาวด์ยาง (ในหน่วยของ phr¹): บดผสมแบบขั้นเดียว

Sample code	4NR100	4NR75-C	4NR50-C	4NR25-C	4CIIR100	4NR75-B	4NR50-B	4NR25-B	4BIIR100
Natural Rubber	100	75	50	25	-	75	50	25	-
Chlorobutyl Rubber	-	25	50	75	100	-	-	-	-
Bromobutyl Rubber	-	-	-	-	-	25	50	75	100
Carbon black (N550)	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Naphthenic Oil	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Struktol 60 NS	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Active ZnO ²	3	3	3	3	3	3	3	3	3
PEG ³	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Steric acid	1	1	1	1	1	1	1	1	1
MBT ⁴	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6 PPD ⁵	1	1	1	1	1	1	1	1	1
TMTM ⁶	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Sulfur	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
MgO ⁷	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Total	181.5	181.5	181.5	181.5	181.5	181.5	181.5	181.5	181.5

¹ Part per hundred of rubber, ² Active zinc oxide, ³ Polyethylene glycol, ⁴ 2-Mercaptobenzothiazole, ⁵ N-(1,3-dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenylenediamine,

⁶ Tetramethylthiuram monosulfide, ⁷ Magnesium oxide

ตารางที่ 2.5 สูตรที่ 5 ในการผสมคอมปาวด์ยาง (ในหน่วยของ phr): บดผสมแบบสองชั้น

Sample code	5NR100-1*	5NR100-2*	5NR75-C	5NR50-C	5NR25-C	5NR75-B	5NR50-B	5NR25-B
Natural Rubber	100	100	75	50	25	75	50	25
Chlorobutyl Rubber	-	-	25	50	75	-	-	-
Bromobutyl Rubber	-	-	-	-	-	25	50	75
Carbon black (N550)	60	-	60	60	60	60	60	60
Kaolinite	20	20	-	-	-	-	-	-
Naphthenic Oil	8	8	8	8	8	8	8	8
Struktol 60 NS	4	4	4	4	4	4	4	4
Active ZnO ²	3	3	3	3	3	3	3	3
PEG ³	2	2	2	2	2	2	2	2
Steric acid	1	1	1	1	1	1	1	1
MBT ⁴	1	1	1	1	1	1	1	1
6 PPD ⁵	1	1	1	1	1	1	1	1
TMTM ⁶	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Sulfur	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
MgO ⁷	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Total	201.5	141.5	181.5	181.5	181.5	181.5	181.5	181.5

¹ Part per hundred of rubber, ² Active zinc oxide, ³ Polyethylene glycol, ⁴ 2-Mercaptobenzothiazole, ⁵ N-(1,3-dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenylenediamine,

⁶ Tetramethylthiuram monosulfide, ⁷ Magnesium oxide, * บดผสมแบบชั้นเดียว

2.2.3.6 การทดสอบการรั่วซึมของอากาศ (air permeability)

2.2.3.6.1 การขึ้นรูปด้วยเครื่องเอ็กทรูดเดอร์ (extruder)

เตรียมคอมปาวด์ยางน้ำหนักประมาณ 1,500 กรัม นำไปรีดเป็นแผ่น แล้วกรีดเป็นแผ่นขนาด 4×100 เซนติเมตร จากนั้นทำการอัดรีดผ่านเครื่องเอ็กทรูดเดอร์ รุ่น Farrel limited เพื่อให้ยางไหลผ่านหัวดาย ซึ่งหัวดายที่เลือกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.5 เซนติเมตร ความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร เมื่อยางไหลออกจากหัวดายจะได้ยางมีลักษณะเป็นท่อตรง ภาวะของเครื่องเอ็กทรูดเดอร์ที่ใช้ขึ้นรูปยาง ได้แก่ ความดัน 1160 psi และอุณหภูมิ 86 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำยางที่ขึ้นรูปได้ไปอบเพื่อให้ยางสุกที่เตาอบ (oven) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

2.2.3.6.2 การทดสอบการรั่วซึมของอากาศ

นำยางที่ขึ้นรูปเป็นท่อตรง ไปอุดด้วยหัวจุกยางที่ปลายเปิดทั้ง 2 ด้านของท่อตรง โดยด้านหนึ่งของหัวจุกยางมีการเจาะรูเพื่อใส่หัวจุกเข้าไป ทำให้สามารถอัดความดันลมเข้าไปได้ จากนั้นใส่ตัวยึดเพื่อยึดต่อกับหัวจุกให้มีความแน่นมากขึ้น ซึ่งจะช่วยป้องกันไม่ให้มีอากาศรั่วซึม แล้วจึงนำไปทดสอบการรั่วซึมของยางในตามมาตรฐาน มอก. 683-2530 โดยอัดความดันลมประมาณ 35 กิโลพาสคัล ปลดปล่อยไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงอัดความดันอีกครั้งโดยให้เท่ากับครั้งแรก แล้วจุ่มในน้ำประมาณ 1 นาที หากเกิดการรั่วซึมจะปรากฏฟองอากาศออกมา

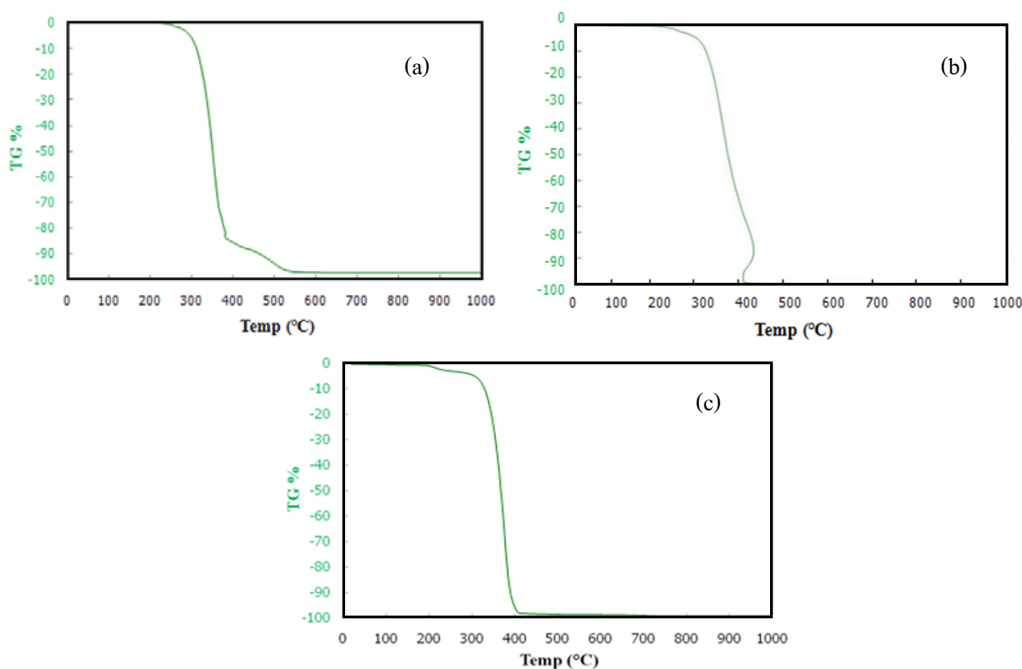
2.2.4 ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา

นำชิ้นงานที่ฉาบผิวด้วยทองเรียบร้อยแล้วเข้าทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6400 ภาวะการทำงานที่ความยาวคลื่น 10 ไมโครเมตร ความต่างศักย์ 15 กิโลโวลต์

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง (Results and Discussion)

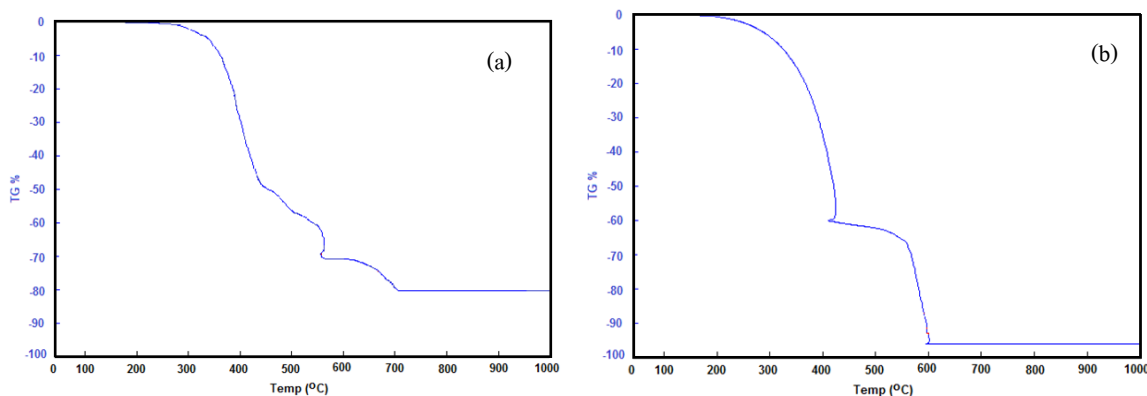
3.1 การทดสอบเชิงความร้อนของยางในรถจักรยานยนต์ที่ผลิตจากยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์บีบีไพล์ที่มีขายในเชิงพาณิชย์และยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัย

รูปที่ 3.1 แสดงผลการทดสอบสมบัติเชิงความร้อนด้วยเครื่อง TGA ของยางที่ใช้ในงานวิจัย 3 ชนิด คือ ยางธรรมชาติ ยางคลอโรบีบีไพล์ และยางโบรโมบีบีไพล์ ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์ในรูป 3.1 (a) พบว่ายางธรรมชาติมีอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่ 250-400 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการสลายตัวของยางธรรมชาติร้อยละ 90 และที่เหลือร้อยละ 10 เป็นการสลายตัวของเถ้า ในขณะที่ยางคลอโรบีบีไพล์และยางโบรโมบีบีไพล์ (รูปที่ 3.1 (b) และ (c)) มีช่วงการสลายตัวอยู่ในช่วงเดียวกันประมาณ 200-400 องศาเซลเซียส โดยการสลายตัวเกิดได้ 100 เปอร์เซ็นต์ นำผลการทดสอบที่ได้มาเปรียบเทียบกับรูปที่ 3.2 แสดงผลการสลายตัวทางความร้อนของยางในรถจักรยานยนต์ที่ขายในเชิงพาณิชย์ 2 ชนิด ที่ผลิตจากยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์บีบีไพล์ ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์พบว่า การสลายตัวเชิงความร้อนของยางในรถจักรยานยนต์ที่ผลิตจากยางธรรมชาติ (รูปที่ 3.2 (a)) พบช่วงอุณหภูมิการสลายตัว 3 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 อุณหภูมิการสลายตัว 250-400 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของยางธรรมชาติ (ร้อยละ 50) ช่วงที่ 2 อุณหภูมิการสลายตัว 400-550 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของผงเขม่าดำ (ร้อยละ 20) ช่วงที่ 3 อุณหภูมิการสลายตัว 550-700 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของน้ำมัน (ร้อยละ 10) และส่วนที่เหลือที่อุณหภูมิ 700-1,000 องศาเซลเซียส เป็นลักษณะของเถ้าที่เหลืออยู่ (ร้อยละ 20) รูปที่ 3.2 (b) แสดงการสลายตัวเชิงความร้อนของยางในรถจักรยานยนต์ที่ผลิตจากยางสังเคราะห์บีบีไพล์ พบช่วงอุณหภูมิการสลายตัว 2 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 อุณหภูมิการสลายตัว 200-400 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัว



รูปที่ 3.1 ผลการทดสอบสมบัติเชิงความร้อนด้วยเครื่อง thermo gravimetric analysis (TGA) ของ (a) ยางธรรมชาติ (b) ยางคลอโรบีบีไพล์ และ (c) ยางโบรโมบีบีไพล์

ของยางสังเคราะห์บิวไทล์ (ร้อยละ 60) ช่วงที่ 2 อุณหภูมิการสลายตัว 500-600 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของพวงเขม่าดำ (ร้อยละ 35) และส่วนที่เหลือเป็นขี้เถ้าประมาณร้อยละ 5 จากข้อมูลข้างต้นจะสังเกตเห็นว่า ช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของทั้งยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์บิวไทล์ค่อนข้างกว้าง อาจส่งผลให้การวิเคราะห์หาองค์ประกอบที่แท้จริงของยางในรถจักรยานยนต์ที่ขายในเชิงพาณิชย์โดยอาศัยข้อมูลทาง TGA อย่างเดียวอาจเกิดความผิดพลาดได้ เนื่องจากอาจมียางชนิดอื่นผสมอยู่ในสูตรการผลิตยางในรถจักรยานยนต์ นอกจากนี้ข้อมูลดังกล่าวยังไม่สามารถระบุได้ว่ายางสังเคราะห์บิวไทล์ที่ใช้เป็นประเภทใด



รูปที่ 3.2 ผลการทดสอบสมบัติเชิงความร้อนด้วยเครื่อง thermo gravimetric analysis (TGA) ของยางในรถจักรยานยนต์ที่มีขายในเชิงพาณิชย์โดยผลิตจาก (a) ยางธรรมชาติ (b) ยางสังเคราะห์บิวไทล์

3.2 การออกแบบสูตรคอมปาวด์ยางสูตรที่ 1 สมบัติเชิงกล และลักษณะทางสัณฐานวิทยา

3.2.1 การออกแบบสูตรคอมปาวด์ยาง

สูตรที่ 1 ยางธรรมชาติ (NR) ถูกผสมร่วมกับยางคลอโรบิวไทล์ (CIIR) ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันดังนี้ คือ NR:CIIR เท่ากับ 100:0, 90:10, 70:30, 50:50 และ 0:100 ตามลำดับ โดยทำการผสมร่วมกับสารเคมีที่ใช้ในการคงรูปในอัตราส่วนคงที่ (ดังแสดงในตารางที่ 2.1) ใช้ปริมาณสารตัวเติมพวงเขม่าดำ 60 phr โดยในสูตรนี้เลือกใช้ระบบสารคงรูปกำมะถัน เนื่องจากกำมะถันนิยมใช้ในยางธรรมชาติ หรือยางที่มีปริมาณพันธะคู่สูง ส่วนแอกทีฟซิงก์ออกไซด์ ใช้ทำหน้าที่เป็นสารคงรูปและสารกระตุ้นปฏิกิริยา (activator) ร่วมกับกรดสเตียริก เพื่อกระตุ้นให้สารตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพการทำงานสูงขึ้น นอกจากนี้ dibenzothiazyl disulfide เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยา (accelerator) ทำให้ยางธรรมชาติมีอัตราเร็วในการคงรูปดีขึ้น

3.2.2 ความหนืดมูนี

คอมปาวด์ยางที่ได้ถูกนำมาทดสอบค่าความหนืดมูนี (ML 1+4 at 100 °C) ตามมาตรฐาน ASTM D 1646 ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3.1 พบว่าค่าความหนืดมูนีมีแนวโน้มลดลงจากมากไปหาน้อยดังนี้: 1NR50-C (20.08 MU) > 1NR70-C (17.70 MU) > 1NR90-C (14.90 MU) แสดงให้เห็นว่าเมื่อใส่ยางธรรมชาติในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้คอมปาวด์ยางมีค่าความหนืดมูนีลดลง นั่นหมายความว่ากรรมวิธีผสมยางธรรมชาติในปริมาณที่มากขึ้นร่วมกับยางคลอโรบิวไทล์ จะส่งผลให้กระบวนการผลิตและขึ้นรูปสามารถทำได้ง่ายขึ้น

ตารางที่ 3.1 ค่าความหนืดและสมบัติการคงรูปของคอมปาวด์ยางแต่ละสูตร

Sample code	Mooney (ML 1+4 at 100 °C)	Scorch time (t_9) (min)	Torque Minimum (dNm)	Torque Maximum (dNm)	Curing time ¹ (min)	Curing temperature (°C)
1NR90-C ²	14.90	-	-	-	-	160
1NR70-C ²	17.70	-	-	-	-	160
1NR50-C ²	20.80	-	-	-	-	160
2NR90-C	16.70	2.73	0.53	2.71	2.66	160
2NR70-C	25.60	2.11	0.76	3.63	2.72	160
2NR50-C	36.30	2.24	1.08	4.68	3.54	160
3CIIR100	57.18	7.63	0.91	5.53	23.64	160
3BIIR100	75.26	4.43	1.20	4.63	10.72	160
3NR100	29.24	12.56	0.45	2.15	3.54	160
3NR75-C	34.33	1.96	0.98	5.06	2.97	160
3NR50-C	41.85	2.22	1.27	5.32	3.57	160
3NR25-C	49.93	2.79	1.51	6.06	9.49	160
3NR75-B	36.99	2.39	1.12	4.97	3.88	160
3NR50-B	42.82	3.12	1.33	5.10	6.50	160
3NR25-B	52.86	4.21	1.76	7.90	10.07	160
4CIIR100	52.16	1.06	0.86	3.51	9.57	160
4BIIR100	62.04	0.85	1.14	5.15	10.11	160
4NR100	20.79	0.63	0.27	5.29	1.10	160
4NR75-C	34.88	0.66	0.57	5.95	1.21	160
4NR50-C	41.48	0.65	0.65	4.77	1.49	160
4NR25-C	55.81	0.85	0.97	3.99	2.88	160
4NR75-B	28.38	0.62	0.45	6.15	1.39	160
4NR50-B	45.17	0.69	0.75	5.31	1.14	160
4NR25-B	50.80	1.26	0.84	4.27	2.36	160
5NR100-1	31.70	0.42	1.06	8.27	0.88	160
5NR100-2	9.40	N/A	0.38	2.37	0.86	160
5NR75-C	28.60	0.62	0.88	3.72	1.07	160
5NR50-C	32.20	0.44	0.86	5.10	1.74	160
5NR25-C	39.50	0.44	1.39	5.98	2.64	160
5NR75-B	28.80	0.60	0.78	3.92	0.96	160
5NR50-B	33.60	0.54	1.50	5.96	1.33	160
5NR25-B	51.40	0.45	1.78	9.13	1.84	160

¹ ใช้เวลาที่ t_{90} ² ยางคอมปาวด์ในสูตรที่ 1 ไม่สามารถขึ้นรูปได้

3.2.3 สมบัติการคงรูป

นำคอมปาวด์ยางสูตรที่ 1 ที่เตรียมได้จากการบดผสมแบบขึ้นเฉียวไปทดสอบหาเวลาที่เหมาะสมในการคงรูปยางโดยเครื่อง moving die rheometer (MDR) ภายใต้อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส พบว่าคอมปาวด์ยางสูตรที่ 1 ไม่สามารถขึ้นรูปได้ เนื่องจากยางคลอโรบิวไทล์นั้น แม้ว่าจะเป็นยางที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุลก็ตาม แต่อะตอมของคลอรีนในยางทำให้พันธะคู่ที่มีอยู่ไม่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาเคมี ด้วยเหตุนี้ ยางคลอโรบิวไทล์จึงไม่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกำมะถัน สารคงรูปที่นิยมใช้ในยางคลอโรบิวไทล์ ได้แก่ โลหะออกไซด์ เช่น แมกนีเซียมออกไซด์ ซิงก์ออกไซด์ เป็นต้น โดยทั่วไปนิยมใช้แมกนีเซียมออกไซด์ร่วมกับซิงก์ออกไซด์ [6] เป็นสารทำให้ยางคง

รูปเพราะเมกนีเซียมออกไซด์จะช่วยทำหน้าที่เป็นตัวจับกรดไฮโดรคลอริกที่เกิดขึ้นในกระบวนการคงรูป ในขณะที่ซิงก์ออกไซด์จะทำหน้าที่เป็นสารทำให้ยางคงรูป จึงทำการปรับปรุงการออกสูตรใหม่เป็นสูตรที่ 2 ต่อไป

ตารางที่ 3.2 สมบัติเชิงกลของยางคอมปาวด์แต่ละสูตร

Sample code	M ₁₀₀ ¹ (MPa)	M ₃₀₀ ¹ (MPa)	M ₅₀₀ ¹ (MPa)	T _B ² (MPa)	E _B ³ (%)	Hardness ⁴ (Shore A)	H _B ⁵ (°C)
1NR90-C ⁶	-	-	-	-	-	-	-
1NR70-C ⁶	-	-	-	-	-	-	-
1NR50-C ⁶	-	-	-	-	-	-	-
2NR90-C	1.10	4.20	-	7.70	467	45.0	-
2NR70-C	1.20	4.10	-	4.90	351	46.0	-
2NR50-C ⁷	-	-	-	-	-	-	-
3CIIR100	2.93	13.10	-	13.10	300	58.3	26.00
3BIIR100	2.10	9.90	-	12.20	420	54.3	23.70
3NR100	1.01	5.32	-	8.70	428	44.8	- ⁸
3NR75-C	1.20	4.70	-	7.70	471	48.0	- ⁸
3NR50-C	1.40	4.80	-	7.30	486	50.0	- ⁸
3NR25-C	1.70	5.00	8.30	8.50	517	56.0	- ⁸
3NR75-B	1.20	5.20	-	7.60	418	48.0	- ⁸
3NR50-B	1.40	5.90	10.60	11.10	528	50.0	- ⁸
3NR25-B	1.70	9.70	8.30	13.40	418	56.0	35.00
4CIIR100	1.17	4.46	8.33	9.90	575	53.6	76.00
4BIIR100	1.55	8.87	-	13.60	489	51.4	20.80
4NR100	2.06	9.51	16.33	16.60	503	56.9	29.70
4NR75-C	2.51	9.63	-	13.90	499	59.3	31.30
4NR50-C	2.29	7.28	-	7.70	329	58.9	- ⁸
4NR25-C	2.32	2.92	-	3.30	336	61.4	- ⁸
4NR75-B	2.39	9.84	-	14.20	443	59.7	24.70
4NR50-B	2.26	7.77	-	10.80	460	59.7	32.30
4NR25-B	1.66	5.66	9.88	11.40	585	53.3	33.70
5NR100-1	3.23	11.77	11.92	18.50	475	64.0	28.70
5NR100-2	0.72	2.19	6.67	10.50	600	33.9	21.70
5NR75-C	0.88	3.74	8.51	13.20	650	43.3	- ⁸
5NR50-C	1.58	5.50	-	7.00	401	51.3	- ⁸
5NR25-C	2.45	-	-	3.10	154	61.0	- ⁸
5NR75-B	0.92	4.10	9.36	16.00	707	42.4	- ⁸
5NR50-B	1.76	6.78	10.80	10.90	504	54.2	- ⁸
5NR25-B	3.10	7.91	-	7.10	267	66.3	- ⁸

¹ M₁₀₀, M₃₀₀ และ M₅₀₀ ค่าความเค้นที่ 100%, 300% และ 500% ของ Elongation ตามลำดับ, ² ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Tensile strength), ³ ค่าระยะยืด ณ จุดขาด (Elongation at break), ⁴ ค่าความแข็ง (Hardness), ⁵ ค่าความร้อนสะสม (Heat build up), ⁶ เนื่องจากยางคอมปาวด์ในสูตรที่ 1 ไม่สามารถคงรูปได้ ดังนั้นจึงไม่สามารถนำชิ้นตัวอย่างหลังผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันมาทดสอบสมบัติเชิงกลได้, ⁷ ไม่ได้ทำการทดสอบ, ⁸ ชิ้นทดสอบแตก

3.3 การออกแบบสูตรคอมปาวด์ยางสูตรที่ 2 สมบัติเชิงกล และลักษณะทางสัณฐานวิทยา

3.3.1 การออกแบบสูตรคอมปาวด์ยาง

คอมปาวด์ยางสูตรที่ 2 แสดงดังตารางที่ 2.2 ถูกเตรียมขึ้นโดยพัฒนามาจากสูตรที่ 1 ได้ใส่เมกนีเซียมออกไซด์ลงไปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานร่วมกับซิงก์ออกไซด์ทำให้ยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีนไทล์ สามารถคงรูปได้ นอกจากนี้ยังมีการใส่สารสตรักทอล 1 phr เพื่อช่วยประสานวิภาค (phase) ของยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์บิวไทล์ (CIIR และ BIIR) ให้มีความเข้ากันได้มากขึ้น น้ำมันเนฟทานิกใส่เพื่อปรับความหนืดของยางทั้ง 2 ชนิดให้ลดลงเพื่อง่ายต่อการกระบวนการผสม

3.3.2 ความหนืดมูนี

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าความหนืดมูนีของคอมปาวด์ยางสูตรที่ 2 พบว่าค่าความหนืดมูนีเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยดังนี้: 2NR50-C (36.30 MU) > 2NR70-C (25.60 MU) > 2NR90-C (16.70 MU) นั่นแสดงให้เห็นว่าเมื่อใส่ยางธรรมชาติในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้คอมปาวด์ยางมีค่าความหนืดมูนีลดลง

3.3.3 สมบัติการคงรูป

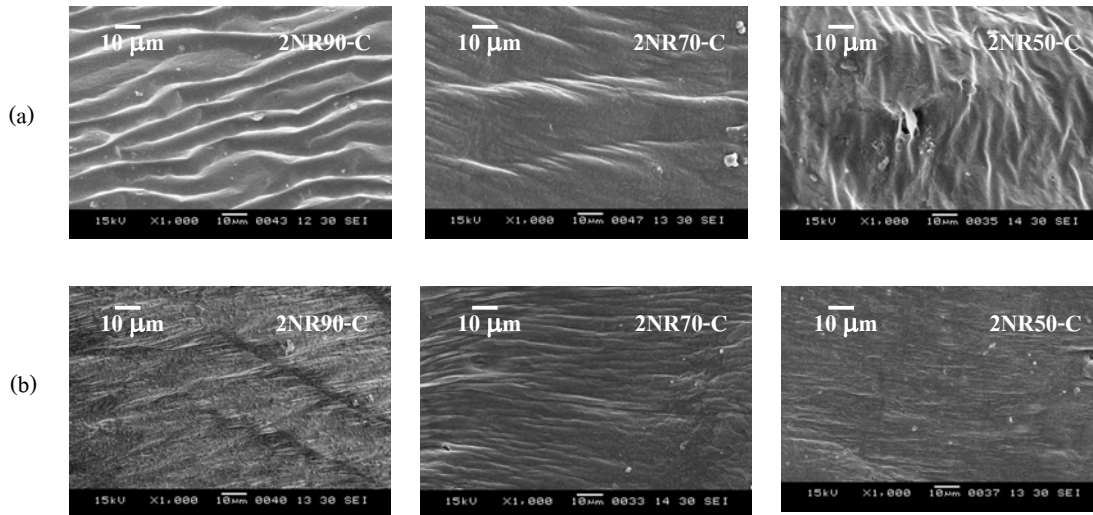
สมบัติการคงรูปของคอมปาวด์ยางในสูตรที่ 2 แสดงในตารางที่ 3.1 พบว่าช่วงระยะเวลาสกอร์ช (scorch time) เป็นตัวบ่งชี้ถึงระยะเวลาที่ยังคงสามารถไหลขึ้นรูปได้ ณ อุณหภูมินั้น ๆ เรียงลำดับจากมากไปน้อยดังนี้: 2NR90-C (2.73 min) > 2NR50-C (2.24 min) > 2NR70-C (2.11 min) จะเห็นว่าคอมปาวด์ยางที่มีการผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางคลอโรพรีนไทล์ในอัตราส่วนต่าง ๆ กันมีช่วงระยะเวลาสกอร์ชแทบจะไม่แตกต่างกันมากนัก แต่อย่างไรก็ตามควรทำการทดสอบสมบัติการคงรูปของยางบริสุทธิ์ทั้ง 2 ประเภทเพื่อง่ายต่อการเปรียบเทียบและอธิบายผลการทดลอง (ข้อมูลของยางบริสุทธิ์ทั้ง 2 ประเภทไม่ได้ทำการทดสอบ) เมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มมากขึ้นค่าแรงบิดสูงสุด (torque maximum) มีแนวโน้มลดลงเรียงลำดับจากมากไปน้อยดังนี้: 2NR50-C (4.68 dNm) > 2NR70-C (3.63 dNm) > 2NR90-C (2.71 dNm) ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากเกิดการขัดขวางในปฏิกิริยาการเชื่อมขวางในยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีนไทล์ ในขณะที่ระยะเวลาเหมาะสมในการคงรูป (optimum cure time, t_{90}) เรียงลำดับจากมากไปน้อยดังนี้: 2NR50-C (3.54 min) > 2NR70-C (2.72 min) > 2NR90-C (2.66 min) จะเห็นว่าเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มมากขึ้น ระยะเวลาที่เหมาะสมในการคงรูปจะลดลง เนื่องจากพันธะคู่ที่อยู่ในโครงสร้างของสายโซ่โมเลกุลยางธรรมชาติมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาคัดค้านในเซชัน ระยะเวลาในการคงรูปจึงลดลง ในขณะที่ยางคลอโรพรีนไทล์มีหมู่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาลดลง เนื่องจากยางชนิดนี้มีปริมาณพันธะคู่ที่ต่ำกว่าและมีหมู่คลอรีนในการปกป้องพันธะคู่ ส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาคัดค้านในเซชันลดลงเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ

3.3.4 สมบัติเชิงกล

ตารางที่ 3.2 แสดงสมบัติเชิงกลของยางหลังผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันในสูตรที่ 2 พบว่าค่าโมดูลัสที่ 100 และ 300 เปอร์เซนต์ของระยะยืด (M_{100} และ M_{300}) ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (T_B) และค่าระยะยืด ณ จุดขาด (E_B) ของคอมปาวด์ยางมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น ความเป็นอีลาสติซิตี (elasticity) ของผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้จึงสูงขึ้น ในขณะที่ค่าความแข็ง (hardness) ของ 2NR90-C (45 Shore A) และ 2NR70-C (46 Shore A) แทบจะไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้อาจจะมีผลเนื่องมาจากการที่มีปริมาณของส่วนที่นุ่ม (soft segment) ของยางธรรมชาติในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน จึงได้ค่าความแข็งที่ไม่แตกต่างกัน

3.3.5 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของคอมปาวด์ยางสูตรที่ 2 ที่ผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางคลอโรพรีนไทล์ร่วมกับสตรีกทอลในปริมาณ 1 และ 4 phr ตามลำดับ พบว่าการผสมยางทั้ง 2 ชนิดร่วมกับสตรีกทอลสามารถผสมเข้ากันได้ดีไม่มีการแยกวัฏภาค โดยอนุภาคสีขาวที่เห็นคืออนุภาคของสตรีกทอลหลังการบดผสม การใส่สตรีกทอล 1 phr ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางทั้ง 2 ชนิด มีลักษณะเป็นริ้วค่อนข้างใหญ่ แต่การใส่สตรีกทอล 4 phr ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางทั้ง 2 ชนิด ดูเข้ากันได้ดีมากขึ้น มีลักษณะเป็นริ้วที่ละเอียด ดังนั้นในการออกสูตรถัดไปจึงเลือกใส่สตรีกทอลในปริมาณ 4 phr



รูปที่ 3.3 ภาพตัดขวางของยางธรรมชาติที่ผสมกับยางคลอโรพรีนไทล์ร่วมกับสตรีกทอล (a) 1 phr (b) 4 phr ของสูตรที่ 2 โดยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.4 การออกแบบสูตรคอมปาวด์ยางสูตรที่ 3 สมบัติเชิงกล และลักษณะทางสัณฐานวิทยา

3.4.1 การออกแบบสูตรคอมปาวด์ยาง

คอมปาวด์ยางสูตรที่ 3 (ดังตารางที่ 2.3) ศึกษาการผสมยางธรรมชาติร่วมกับยางสังเคราะห์บิวไทล์ 2 ชนิด (CHIR และ BIIR) โดยอัตราส่วนการผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีนไทล์ หรือยางโบรโมพรีนไทล์ แตกต่างกันดังนี้ 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 ตามลำดับ สูตรที่ 3 ถูกพัฒนามาจากสูตรที่ 2 โดยใช้ปริมาณสตรีกทอล 4 phr และเพิ่มการใส่ 6PPD ในการป้องกันยางจากการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากออกซิเจน เพื่อให้มีสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ยางในรถจักรยานยนต์ต่อไป

3.4.2 ความหนืดมูนี

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าความหนืดมูนีของคอมปาวด์ยางสูตรที่ 3 พบว่าค่าความหนืดมูนีเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยดังนี้: 3BIIR100 (75.26 MU) > 3CHIR100 (57.18 MU) > 3NR100 (29.24 MU) เนื่องจากยางโบรโมพรีนไทล์มีน้ำหนักโมเลกุลของ repeating unit เท่ากับ 202.9 ซึ่งมากกว่ายางคลอโรพรีนไทล์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลของ repeating unit เท่ากับ 158.5 และมากกว่ายางธรรมชาติที่มีน้ำหนักโมเลกุลของ repeating unit เท่ากับ 68 ทำให้เห็นว่ายางที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากจะมีความหนืดมูนีมากขึ้นตามลำดับ ดังนั้นจากผลการทดลองจะเห็นว่า การใส่ยางธรรมชาติในปริมาณที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความหนืดมูนีของคอมปาวด์ยางระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีนไทล์

เรียงลำดับจากมากไปหาน้อยดังนี้: 3NR25-C (49.93 MU) > 3NR50-C (41.85 MU) > 3NR75-C (34.33 MU) มีค่าลดลง ในกรณีของการผสมคอมปาวด์อย่างระหว่างทางธรรมชาติกับยางโบรโมบิวไทล์ พบว่าค่าความหนืดมูนี้มีความโน้มไปทางเดียวกันกับคอมปาวด์อย่างระหว่างทางธรรมชาติกับยางคลอโรบิวไทล์ดังนี้ 3NR25-B (52.86 MU) > 3NR50-B (42.82 MU) > 3NR75-B (36.99 MU) เมื่อนำค่าความหนืดมูนี้มาเปรียบเทียบระหว่างคอมปาวด์อย่างที่เป็นยางคลอโรบิวไทล์กับคอมปาวด์อย่างที่เป็นยางโบรโมบิวไทล์ พบว่าคอมปาวด์อย่างที่มีการผสมระหว่างทางธรรมชาติกับยางคลอโรบิวไทล์จะมีค่าความหนืดมูนี้ต่ำกว่าคอมปาวด์อย่างที่มีการผสมระหว่างทางธรรมชาติกับยางโบรโมบิวไทล์ เนื่องจากค่าความหนืดมูนี้ของยางโบรโมบิวไทล์มากกว่ายางคลอโรบิวไทล์ ซึ่งมีผลมาจากน้ำหนักโมเลกุลของ repeating unit โดยค่าความหนืดมูนี้ที่แตกต่างกันนี้อาจส่งผลต่อกระบวนการขึ้นรูปต่อไป

3.4.3 สมบัติการคงรูป

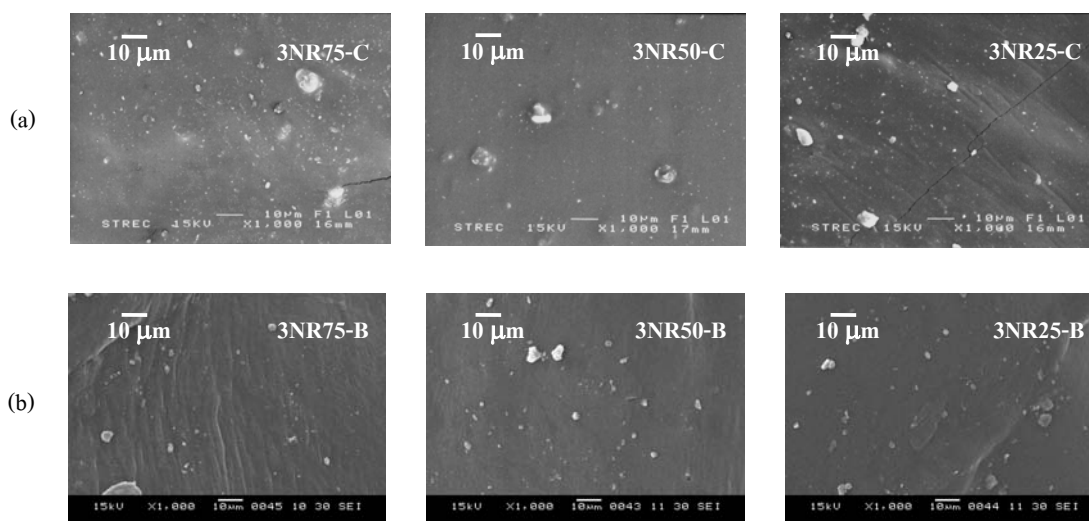
สมบัติการคงรูปของคอมปาวด์ยางในสูตรที่ 3 แสดงดังตารางที่ 3.1 พบว่าช่วงระยะเวลาสกอร์ช เรียงลำดับจากมากไปหาน้อยดังนี้: 3CIIR100 (7.63 min) > 3BIIR (4.43 min) > 3NR100 (2.56 min) แสดงให้เห็นว่ายางคลอโรบิวไทล์มีระยะเวลาสกอร์ชนานที่สุด ซึ่งแสดงถึงระยะเวลาที่คอมปาวด์ยางสามารถไหลได้ในแม่พิมพ์ รองลงมาคือยางโบรโมบิวไทล์ และยางธรรมชาติตามลำดับ เมื่อผสมยางธรรมชาติร่วมกับยางคลอโรบิวไทล์ พบว่าเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น ระยะเวลาสกอร์ชมีค่าลดลงเรียงลำดับดังต่อไปนี้: 3NR25-C (2.79 min) > 3NR50-C (2.22 min) > 3NR75-C (1.96 min) ซึ่งการลดลงของระยะเวลาสกอร์ชในการผสมยางธรรมชาติร่วมกับยางโบรโมบิวไทล์ มีความโน้มเช่นเดียวกันดังนี้: 3NR25-B (4.21 min) > 3NR50-B (3.12 min) > 3NR75-B (2.39 min) เนื่องจากพันธะคู่ที่อยู่ในยางธรรมชาติมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน จึงส่งผลให้ระยะเวลาสกอร์ชสั้นลง นอกจากนี้พบว่ายางโบรโมบิวไทล์มีระยะเวลาสกอร์ชสั้นกว่ายางคลอโรบิวไทล์ เนื่องจากขนาดของอะตอมโบรมีนมีขนาดใหญ่กว่าขนาดอะตอมของคลอรีน ดังนั้นวาเลนซ์อิเล็กตรอน (valence electron) ของโบรมีน สามารถที่จะหลุดไปทำปฏิกิริยาในพันธะคู่ของยางโบรโมบิวไทล์ได้ดีกว่ายางคลอโรบิวไทล์

ค่าแรงบิดสูงสุดของคอมปาวด์ยางบริสุทธิ์ทั้ง 3 ประเภทเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยดังนี้: 3CIIR100 (5.53 dNm) > 3BIIR (4.63 dNm) > 3NR100 (2.15 dNm) เนื่องจากโครงสร้างของยางคลอโรบิวไทล์มีความแข็งแรง (rigid) มากกว่าเมื่อเทียบกับยางโบรโมบิวไทล์ และยางธรรมชาติตามลำดับ เมื่อปริมาณยางธรรมชาติที่ผสมในยางสังเคราะห์บิวไทล์เพิ่มขึ้น ค่าแรงบิดสูงสุดจะมีค่าลดลงตามลำดับดังนี้: 3NR25-C (6.06 dNm) > 3NR50-C (5.32 dNm) > 3NR75-C (5.06 dNm) และ 3NR25-B (7.09 dNm) > 3NR50-B (5.10 dNm) > 3NR75-B (4.97 dNm) ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากเกิดการขัดขวางในปฏิกิริยาการเชื่อมขวางในยางผสมระหว่างทางธรรมชาติกับยางสังเคราะห์บิวไทล์ทั้ง 2 ชนิด

ระยะเวลาที่เหมาะสมในการคงรูปของคอมปาวด์ยางบริสุทธิ์ทั้ง 3 ประเภทเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยดังนี้: 3CIIR100 (23.64 min) > 3BIIR (10.72 min) > 3NR100 (3.54 min) เนื่องจากยางธรรมชาติมีพันธะคู่ที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันที่มากกว่ายางสังเคราะห์บิวไทล์ทั้ง 2 ชนิด เมื่อปริมาณยางธรรมชาติที่ผสมในยางสังเคราะห์บิวไทล์มากขึ้น ระยะเวลาที่เหมาะสมในการคงรูปจะมีค่าลดลงดังนี้: 3NR25-C (9.49 min) > 3NR50-C (3.57 min) > 3NR75-C (2.97 min) และ 3NR25-B (10.07 min) > 3NR50-B (6.50 min) > 3NR75-B (3.88 min) เหตุผลเป็นเช่นเดียวกันในกรณีข้างต้นคือโครงสร้างภายในโมเลกุลของคอมปาวด์ยางที่มีปริมาณยางธรรมชาติอยู่มากจะมีพันธะคู่มากขึ้นด้วย ซึ่งพันธะคู่นี้ไวต่อการทำปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันมาก จึงทำให้ใช้ระยะเวลาที่เหมาะสมในการคงรูปเร็วขึ้น

3.4.4 สมบัติเชิงกล

สมบัติเชิงกลของยางผสมหลังผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันในสูตรที่ 3 แสดงในตารางที่ 3.2 พบว่าค่า M_{100} , M_{300} , T_B และค่าความแข็งแรงของยางบริสุทธิ์ทั้ง 3 ชนิดเรียงลำดับได้ดังนี้: 3CHIR100 > 3BIIR100 > 3NR100 ตามลำดับ เนื่องจากโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ (หรืออีกนัยหนึ่งคือความหนาแน่นของการเชื่อมโยง) ของยางคลอโรพรีนไทล์มีความแข็งแรงมากกว่าเมื่อเทียบกับยางโพรโมบิวไทล์ และยางธรรมชาติ จึงส่งผลให้ค่า E_B ของ 3CHIR100 (300%) < 3BIIR100 (420%) < 3NR100 (428%) ตามลำดับ เมื่อพิจารณาทางธรรมชาติผสมร่วมกับยางคลอโรพรีนไทล์พบว่าค่า M_{100} , M_{300} และ T_B มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณยางธรรมชาติลดลง ในกรณียางธรรมชาติผสมร่วมกับยางโพรโมบิวไทล์ในสัดส่วนเดียวกันกับยางคลอโรพรีนไทล์ ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตามพบว่าสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติผสมร่วมกับยางโพรโมบิวไทล์หลังผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันดีกว่าเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติผสมร่วมกับยางคลอโรพรีนไทล์หลังผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน ค่าความแข็งแรงของยางบริสุทธิ์หลังผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันทั้ง 3 ชนิดเรียงลำดับได้ดังนี้: 3CHIR100 (58.30 Shore A) > 3BIIR100 (54.30 Shore A) > 3NR100 (44.80 Shore A) เมื่อปริมาณยางธรรมชาติในยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางสังเคราะห์บิวไทล์ทั้ง 2 ชนิดเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงมีแนวโน้มลดลงตามลำดับ ดังนั้นจากผลการทดลองที่ได้นี้ผู้วิจัยเลือกใช้ระบบ sulfur/thiazole [7] สำหรับกระบวนการวัลคาไนเซชันซึ่งระบบนี้มีความเหมาะสมกับยางโพรโมบิวไทล์มากกว่ายางคลอโรพรีนไทล์ ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติผสมร่วมกับยางโพรโมบิวไทล์ดีขึ้นตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางที่ได้ตามสูตรที่ 3 กับยางในรถจักรยานยนต์ที่มีขายในเชิงพาณิชย์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 683-2530) (แสดงในตารางที่ 3.3) จะเห็นได้ว่าการออกสูตรยางในสูตรที่ 3 ยังไม่เหมาะต่อการนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ยางในรถจักรยานยนต์ได้ เนื่องจากสมบัติเชิงกลยังไม่ผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม จึงได้ทำการพัฒนาเป็นสูตรที่ 4 ต่อไป



รูปที่ 3.4 ภาพตัดขวางของคอมปาวด์ยาง (a) ยางธรรมชาติผสมร่วมกับยางคลอโรพรีนไทล์ (b) ยางธรรมชาติผสมร่วมกับยางโพรโมบิวไทล์ของสูตรที่ 3 โดยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.4.5 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของคอมปาวด์ยางสูตรที่ 3 จะเห็นได้ว่าคอมปาวด์ยางที่เป็นยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางสังเคราะห์บีวีไทล์ สามารถผสมเข้ากันได้ดีไม่มีการแยกวัฏภาค และการกระจายตัวของสารเคมีที่ใช้ในการคงรูป (อนุภาคสีขาว) สามารถกระจายตัวได้ดีในตัวกลางยางทั้ง 2 ชนิด ส่งผลให้สมบัติเชิงกลที่ได้ดีตามไปด้วย นั่นแสดงว่าระบบการคงรูปที่ใช้ในการทดลองนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาสูตรที่จะนำไปผลิตเป็นยางในรถจักรยานยนต์ได้ต่อไป

3.5 การออกแบบสูตรคอมปาวด์ยางสูตรที่ 4 สมบัติเชิงกล และลักษณะทางสัณฐานวิทยา

3.5.1 การออกแบบสูตรคอมปาวด์ยาง

คอมปาวด์ยางสูตรที่ 4 (แสดงดังตารางที่ 2.4) ถูกปรับปรุงมาจากสูตรที่ 3 เพื่อปรับปรุงสมบัติการคงรูปให้มีการใช้เวลาคงรูปลดลงและสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางที่ได้ให้ใกล้เคียงกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 683-2530) โดยการใส่ PEG เพื่อปรับปรุงอัตราการคงรูป (curing rate) และภาวะการคงรูป (curing state) และใส่ MBT ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาปฏิกิริยาร่วมกับ TMTM ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทุติยภูมิแทนการใส่ MBTS ในสูตรคอมปาวด์ยางที่ 1, 2 และ 3 เนื่องจากสาร MBT ทำให้ยางเริ่มเกิดปฏิกิริยาคงรูปได้เร็วกว่า MBTS เพราะ MBTS ต้องแตกตัวด้วยความร้อนเป็น MBT ก่อนจึงจะสามารถเร่งปฏิกิริยาของรูปได้และการใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาปฏิกิริยาร่วมกับสารตัวเร่งปฏิกิริยาทุติยภูมิจะทำให้ยางมีอัตราเร็วในการคงรูปและมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงกว่าการใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาเพียงตัวเดียว เพราะสารตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองกลุ่มนี้จะทำงานแบบเสริมกัน ซึ่งคุณสมบัติของ MBT/TMTD นิยมใช้สำหรับการคงรูปยางที่คงรูปได้ช้า เช่น ยางสังเคราะห์บีวีไทล์ (IIR) และ ยางเอทิลีน โพรพิลีน ไดอีน (EPDM) เป็นต้น [6]

3.5.2 ความหนืดมูนี

ค่าความหนืดมูนีของคอมปาวด์ยางสูตรที่ 4 แสดงในตารางที่ 3.1 พบว่าค่าความหนืดมูนีของคอมปาวด์ยางบริสุทธิ์ทั้ง 3 ประเภทเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยดังนี้: 4BIIR100 (62.04 MU) > 4CIIR100 (52.16 MU) > 4NR100 (20.79 MU) เนื่องจากยางโบรโมบีวีไทล์มีน้ำหนักโมเลกุลของ repeating unit ที่สูงกว่ายางคลอโรบีวีไทล์และยางธรรมชาติ ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนืดมูนีของคอมปาวด์ยางบริสุทธิ์ทั้ง 3 ประเภท ในสูตรที่ 3 และสูตรที่ 4 พบว่าการปรับปรุงสูตรยางในสูตรที่ 4 นั้น ค่าความหนืดมูนีของคอมปาวด์ยางบริสุทธิ์ทั้ง 3 ประเภท มีค่าลดลง นั่นแสดงว่าการใส่ MBT สามารถปรับปรุงภาวะการคงรูปให้ดีขึ้นได้ การใส่ยางธรรมชาติในยางผสมระหว่างยางสังเคราะห์บีวีไทล์ทั้ง 2 ชนิดในปริมาณมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความหนืดมูนีของคอมปาวด์ยางมีแนวโน้มดังนี้: 4NR25-C (55.81 MU) > 4NR50-C (41.48 MU) > 4NR75-C (34.88 MU) และ 4NR25-B (50.08 MU) > 4NR50-B (45.17 MU) > 4NR75-B (28.38 MU) ตามลำดับ เนื่องจากการผสมยางธรรมชาติจะทำให้น้ำหนักโมเลกุลของยางคอมปาวด์มีค่าลดลง ส่งผลให้ค่าความหนืดมูนีลดลงด้วย

3.5.3 สมบัติการคงรูป

สมบัติการคงรูปของคอมปาวด์ยางในสูตรที่ 4 แสดงดังตารางที่ 3.1 พบว่าเมื่อเปลี่ยนระบบการคงรูปของคอมปาวด์ยางสูตรที่ 3 มาเป็นสูตรที่ 4 ส่งผลให้ระยะเวลาสกรูว์มีค่าลดลงประมาณร้อยละ 80-90 เมื่อเทียบกับสูตรที่ 3 และระยะเวลาที่เหมาะสมในการคงรูปมีค่าลดลงประมาณร้อยละ 60-70 นอกจากนี้พบว่าค่าแรงบิดสูงสุดของคอมปาวด์ยางโบรโมบีวีไทล์มีค่าใกล้เคียงกับคอมปาวด์ยางธรรมชาติ นั่นแสดงว่าระบบการคงรูปที่ใช้ในสูตรที่ 4 นี้มีความเหมาะสมกับยางโบรโมบีวีไทล์และยางธรรมชาติ ในขณะที่ยางคลอโรบีวีไทล์ให้ค่าแรงบิดสูงสุดต่ำที่สุด (ซึ่งค่าแรงบิดสูงสุดจะสัมพันธ์กับสมบัติเชิงกลที่ได้ต่อไป) เมื่อปริมาณยางธรรมชาติในคอมปาวด์ยางผสมระหว่างยาง

ธรรมชาติกับยางคลอโรบิวไทล์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาสกร๊ชและระยะเวลาที่เหมาะสมในการคงรูปมีค่าลดลง โดยสมบัติดังกล่าวมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการผสมยางธรรมชาติร่วมกับยางโบรโมบิวไทล์ ค่าแรงบิดสูงสุดของคอมปาวด์ยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางสังเคราะห์บิวไทล์ทั้ง 2 ชนิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น แต่คอมปาวด์ยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางโบรโมบิวไทล์จะให้ค่าแรงบิดสูงสุดที่สูงกว่าคอมปาวด์ยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางคลอโรบิวไทล์ ดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้นว่าในการออกสูตรที่ 4 นี้มีความเหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันที่ดีทั้งยางธรรมชาติและยางโบรโมบิวไทล์ แม้ว่ายางโบรโมบิวไทล์จะมีปริมาณพันธะคู่ที่ต่ำกว่ายางธรรมชาติ แต่การมีหมู่โบรมีนซึ่งมีขนาดที่ใหญ่กว่า ส่งผลให้หมู่ที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ง่ายกว่าหมู่คลอรีน (ในยางคลอโรบิวไทล์) ที่มีขนาดเล็กกว่า ซึ่งต้องใช้พลังงานในการสลายพันธะมากกว่าเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันได้

3.5.4 สมบัติเชิงกล

ตารางที่ 3.2 แสดงสมบัติเชิงกลของยางผสมหลังผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันในสูตรที่ 4 พบว่าค่า M_{100} , M_{300} และ T_B ของ 4NR100 > 4BIIR100 > 4CIIR100 ตามลำดับ ทั้งนี้อาจมีผลเนื่องจากระบบการคงรูปที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันในยางธรรมชาติ ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.5.3 ส่งผลให้ความหนาแน่นในการเชื่อมโยงโครงสร้างตาข่าย 3 มิติของยางธรรมชาติมีความแข็งแรงมากกว่าเมื่อเทียบกับยางโบรโมบิวไทล์และยางคลอโรบิวไทล์ ตามลำดับ ค่า E_B ของ 4NR100 (503 %) มีค่าใกล้เคียงกับค่า E_B ของ 4BIIR100 (489 %) ในขณะที่ 4CIIR100 มีค่า E_B ประมาณ 575 % ค่าความแข็งของ 4NR100 (56.9 Shore A) มีค่าสูงกว่า 4CIIR100 (53.6 Shore A) และ 4BIIR100 (51.4 Shore A) ตามลำดับ เมื่อพิจารณายางธรรมชาติผสมร่วมกับยางสังเคราะห์บิวไทล์ทั้ง 2 ชนิด พบว่าค่า M_{100} , M_{300} และ T_B มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น โดยค่า M_{100} , M_{300} และ T_B ของยางธรรมชาติผสมร่วมกับยางโบรโมบิวไทล์จะให้ค่าที่สูงกว่าการผสมยางธรรมชาติร่วมกับยางคลอโรบิวไทล์ เนื่องจากระบบวัลคาไนเซชันสูตรที่ 4 นี้มีความเหมาะสมกับยางโบรโมบิวไทล์มากกว่ายางคลอโรบิวไทล์ ส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าค่า E_B ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางโบรโมบิวไทล์ให้ค่าที่สูงกว่ายางผสมระหว่างยางธรรมชาติร่วมกับยางคลอโรบิวไทล์ ยกเว้นในกรณีของ 4NR75-B ค่าความแข็งของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติร่วมกับยางโบรโมบิวไทล์หรือคลอโรบิวไทล์หลังผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน ยกเว้นในกรณีของ 4NR25-B

ค่าความร้อนสะสม (H_B) ของยางบริสุทธิ์หลังผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันทั้ง 3 ชนิดเรียงลำดับได้ดังนี้: 4CIIR100 (76 °C) > 4NR100 (29.7 °C) > 4BIIR100 (20.8 °C) แสดงให้เห็นว่าถ้ายางธรรมชาติผสมร่วมกับยางโบรโมบิวไทล์จะส่งผลให้ค่าความร้อนสะสมต่ำกว่ายางธรรมชาติผสมร่วมกับยางคลอโรบิวไทล์ เมื่อเปรียบเทียบในปริมาณสัดส่วนการเติมยางธรรมชาติที่เท่ากัน ถ้าค่าความร้อนสะสมมีค่าสูงมากจะทำให้อุณหภูมิภายในของผลิตภัณฑ์ยางมีค่าสูงเกิน ส่งผลให้ยางและสารเคมีที่อยู่ในบริเวณด้านในเกิดการสลายตัวกลายเป็นแก๊สและทำให้เกิดแรงดันภายในขึ้น เมื่อแรงดันที่เกิดจากแก๊สมีค่าสูงมากพอที่จะเอาชนะความทนทานต่อการฉีกขาดของยาง ยางก็จะเกิดการระเบิด (blow out) ได้ จากผลการทดลองที่ได้ทำให้ผู้วิจัยสรุปได้ว่าการเลือกใช้ระบบ sulfur/thiazole มีความเหมาะสมกับยางธรรมชาติและยางโบรโมบิวไทล์มากกว่ายางคลอโรบิวไทล์ จึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลของยางในรถจักรยานยนต์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 683-2530) และยางในรถจักรยานยนต์ที่มีขายในเชิงพาณิชย์ (แสดงในตารางที่ 3.3) จะเห็นได้ว่าสูตรยางธรรมชาติ 4NR100 สามารถนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ยางในรถจักรยานยนต์ได้ เนื่องจากสมบัติเชิงกล ได้แก่ ค่า T_B , E_B และการรั่วซึมของอากาศผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของยางในรถจักรยานยนต์และมีแนวโน้มของ

สมบัติเชิงกลที่ทดสอบได้ยังแสดงค่าที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับยางในรถจักรยานยนต์ที่มีขายในเชิงพาณิชย์ทั้ง 2 ประเภท

ตารางที่ 3.3 การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของยางสูตรที่ 4 (4NR100) และยางในรถจักรยานยนต์ที่ผลิตจากยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์บีวไทล์ที่มีขายในเชิงพาณิชย์

Sample code	M ₁₀₀ ¹ (MPa)	M ₃₀₀ ¹ (MPa)	M ₅₀₀ ¹ (MPa)	T _B ² (MPa)	E _B ³ (%)	Hardness ⁴ (Shore A)	Air Permeability ⁵
commercial inner tube (NR)	2.42	6.33	11.79	14.40	598	58.0	× ⁶
commercial inner tube (IIR)	1.66	5.18	7.70	10.08	683	50.0	× ⁶
มอก. 683-2530	-	-	-	11.77	500	-	× ⁶
4NR100	2.06	9.51	16.33	16.60	503	56.9	× ⁶

¹ M₁₀₀, M₃₀₀ และ M₅₀₀ ค่าความเค้นที่ 100%, 300% และ 500% ของ Elongation ตามลำดับ, ² ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Tensile strength),

³ ค่าระยะยืด ณ จุดขาด (Elongation at break), ⁴ ค่าความแข็ง (Hardness), ⁵ การรั่วซึมของอากาศ, ⁶ ไม่มีการรั่วซึมของอากาศ

3.5.5 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของคอมปาวด์สูตรยางที่ 4 มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับคอมปาวด์สูตรยางที่ 3 คือคอมปาวด์ยางที่เป็นยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางสังเคราะห์บีวไทล์ทั้ง 2 ชนิด สามารถผสมเข้ากันได้ดีไม่มีการแยกวัฏภาค และการกระจายตัวของสารเคมีที่ใช้ในการคงรูป (อนุภาคสีขาว) สามารถกระจายตัวได้ดีในตัวกลางยางทั้ง 2 ชนิด

3.6 การออกแบบสูตรคอมปาวด์ยางสูตรที่ 5 สมบัติเชิงกล และลักษณะทางสัณฐานวิทยา

3.6.1 การออกแบบสูตรยางคอมปาวด์

คอมปาวด์ยางสูตรที่ 5 (ดังแสดงตารางที่ 2.5) ออกแบบมาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการช่วยป้องกันการรั่วซึมของอากาศให้ดียิ่งขึ้นโดยมีการผสมสูตรยางธรรมชาติเช่นเดียวกับสูตรที่ 4 (4NR100) ร่วมกับการใส่คาโอไลน์ที่ 20 phr นอกจากนี้ยังศึกษาเทคนิคในการบดผสมแบบขั้นเดียวและแบบสองขั้น เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ ที่ได้จากสูตรที่ 4 และหาภาวะที่เหมาะสมในขั้นตอนการเตรียมคอมปาวด์ยางให้แสดงสมบัติเชิงกลที่ดีต่อไปของยางธรรมชาติร่วมกับยางสังเคราะห์บีวไทล์ทั้ง 2 ชนิด

3.6.2 ความหนืดมูนี

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าความหนืดมูนีของคอมปาวด์ยางสูตรที่ 5 ในระบบการบดผสมแบบขั้นเดียวของยางธรรมชาติร่วมกับสารตัวเติม (ผงเขม่าดำ / คาโอไลน์) พบว่ายางธรรมชาติที่บดผสมร่วมกับผงเขม่าดำ 60 phr และคาโอไลน์ 20 phr (5NR100-1) ให้ค่าความหนืดมูนีสูงกว่ายางธรรมชาติที่บดผสมร่วมกับผงเขม่าดำ 60 phr (4NR100) และยางธรรมชาติที่บดผสมร่วมกับคาโอไลน์ 20 phr (5NR100-2) ลำดับค่าความหนืดมูนีจากมากไปหาน้อยแสดงได้ดังนี้: 5NR100-1 (31.70 MU) > 4NR100 (20.79 MU) > 5NR100-2 (9.40 MU) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการใส่สารตัวเติมในปริมาณที่มาก จะส่งผลให้ค่าความหนืดมูนีมีค่าสูงตามไปด้วย ค่าความหนืดมูนีของคอมปาวด์ยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรบีวไทล์เรียงลำดับจากมากไปหาน้อยดังนี้: 5NR25-C (39.50 MU) > 5NR50-C (32.20 MU) > 5NR75-C (28.60 MU) นั่นแสดงว่าเมื่อใส่ยางธรรมชาติในปริมาณที่สูงขึ้น ค่าความหนืดมูนีของคอมปาวด์ยางผสมจะมีแนวโน้มลดลง โดยในกรณีของคอมปาวด์ยางธรรมชาติผสมกับยางโบร

โมบิวไทล์ ก็ให้ผลการทดลองเป็นแนวโน้มเดียวกันดังนี้: 5NR25-B (51.40 MU) > 5NR50-B (33.60 MU) > 5NR75-B (28.80 MU) ตามลำดับ เมื่อนำค่าความเหนียวนี้มาเปรียบเทียบกับระหว่างคอมปาวด์ยางที่เป็นยางคลอโรบิวไทล์กับคอมปาวด์ยางที่เป็นยางโบรโมบิวไทล์ พบว่าคอมปาวด์ยางที่มีการบดผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรบิวไทล์จะมีความเหนียวนี้ต่ำกว่าคอมปาวด์ยางที่มีการบดผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางโบรโมบิวไทล์ เนื่องจากค่าความเหนียวนี้ของยางโบรโมบิวไทล์สูงกว่ายางคลอโรบิวไทล์ ซึ่งมีผลมาจากน้ำหนักโมเลกุลของ repeating unit เมื่อเปรียบเทียบค่าความเหนียวนี้ของคอมปาวด์ยางในกรณีบดผสมแบบชั้นเดียวเทียบกับการบดผสมแบบสองชั้น พบว่าการบดผสมแบบชั้นเดียวในสูตรที่ 4 มีแนวโน้มของค่าความเหนียวนี้สูงกว่าการบดผสมแบบสองชั้นของสูตรที่ 5 ทั้งนี้อาจมีสาเหตุเนื่องจากการบดผสมแบบชั้นเดียว จะบดผสมยางธรรมชาติร่วมกับยางสังเคราะห์บิวไทล์ก่อน แล้วจึงใส่สารเคมีที่ใช้ในการคงรูปจึงทำให้คอมปาวด์ยางในระหว่างการบดผสมมีอุณหภูมิไม่สูงมากนัก (ประมาณ 40 °C) แต่เมื่อเปรียบเทียบกับแบบสองชั้น จะนำยางสังเคราะห์บิวไทล์มาผสมกับสารเคมีก่อน แล้วจึงบดผสมยางธรรมชาติทีหลัง ส่งผลให้คอมปาวด์ยางในระหว่างการบดผสมมีอุณหภูมิที่สูงกว่า (ประมาณ 60 °C) ทำให้ค่าความเหนียวนี้ลดลงตามลำดับ

3.6.3 สมบัติการคงรูป

ตารางที่ 3.1 แสดงสมบัติการคงรูปของคอมปาวด์ยางในสูตรที่ 5 พบว่ายางธรรมชาติที่บดผสมร่วมกับคาโอลินท์ (5NR100-2) มีระยะเวลาสกร็อชสั้นมาก (ไม่สามารถคำนวณได้) และระยะเวลาที่เหมาะสมในการคงรูปเร็วที่สุด เมื่อเทียบกับยางธรรมชาติที่บดผสมร่วมกับผงเขม่าดำและคาโอลินท์ (5NR100-1) และยางธรรมชาติที่บดผสมร่วมกับผงเขม่าดำ (4NR100) ตามลำดับ เนื่องจากสมบัติพื้นผิวของคาโอลินท์ (surface properties) ที่มีความเป็นเบสมาก เมื่อคาโอลินท์ทำปฏิกิริยาร่วมกับสารเคมีที่ใช้ในการคงรูปจึงไปช่วยเร่งปฏิกิริยาการคงรูปให้เกิดได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ค่าแรงบิดสูงสุดเรียงลำดับจากมากไปน้อยดังนี้: 5NR100-1 (8.27 dNm) > 4NR100 (5.29 dNm) > 5NR100-2 (2.37 dNm) แสดงให้เห็นว่าการใส่ผงเขม่าดำร่วมกับคาโอลินท์จะทำให้คอมปาวด์ยางมีความแข็งแรงมากที่สุด เมื่อเทียบกับการใส่ผงเขม่าดำหรือคาโอลินท์เพียงอย่างเดียว ทั้งนี้อาจมีผลมาจากการใส่สารตัวเติมในปริมาณที่มาก ส่งผลให้ความหนาแน่นในการเชื่อมโยงโครงสร้างตาข่าย 3 มิติอาจสูงขึ้นตามไปด้วย เมื่อพิจารณาในระบบการบดผสมแบบสองชั้นของสูตรที่ 5 พบว่าปริมาณยางธรรมชาติที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาสกร็อชเพิ่มขึ้น แต่ระยะเวลาที่เหมาะสมในการคงรูปลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการบดผสมแบบชั้นเดียวของสูตรที่ 4 พบว่าระยะเวลาที่เหมาะสมในการคงรูปของระบบการบดผสมแบบสองชั้นมีแนวโน้มน้อยกว่า เนื่องจากการบดผสมแบบสองชั้น ในช่วงที่ทำการบดผสมนั้นมีการปลดปล่อยพลังงานความร้อนที่สูงซึ่งโมเลกุลของยางจะเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันได้บางส่วน จึงทำให้ยังมียางธรรมชาติที่เหมาะสมในการคงรูปเร็วขึ้น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการวัลคาไนเซชันก่อน (pre-vulcanization)

3.6.4 สมบัติเชิงกล

ตารางที่ 3.2 แสดงสมบัติเชิงกลของยางผสมหลังผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันในสูตรที่ 5 พบว่าค่า M_{100} , M_{300} , T_B และค่าความแข็งแรงของ 5NR100-1 > 4NR100 > 5NR100-2 ตามลำดับ เนื่องจากยางธรรมชาติที่บดผสมร่วมกับผงเขม่าดำและคาโอลินท์มีความแข็งแรงมากกว่าเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติที่บดผสมร่วมกับผงเขม่าดำหรือคาโอลินท์เพียงชนิดเดียว ตามลำดับ ซึ่งส่งผลให้ค่า E_B ของ 5NR100-1 < 4NR100 < 5NR100-2 ตามลำดับ ในกรณียางธรรมชาติผสมร่วมกับยางสังเคราะห์บิวไทล์ทั้ง 2 ชนิด พบว่าค่า M_{100} และ M_{300} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณยางธรรมชาติลดลง ในขณะที่ทำการบดผสมแบบชั้นเดียว ค่าโมดูลัสจะเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น จากข้อมูลนี้ทำให้สรุปได้ว่าการเลือกใช้เทคนิคการผสมจะมีผลต่อสมบัติเชิงกลที่ได้ด้วย ค่า T_B มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณยางธรรมชาติมากขึ้น ส่งผลให้ E_B เพิ่มขึ้น แต่ค่าความแข็งแรงที่ได้มีแนวโน้มลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกล

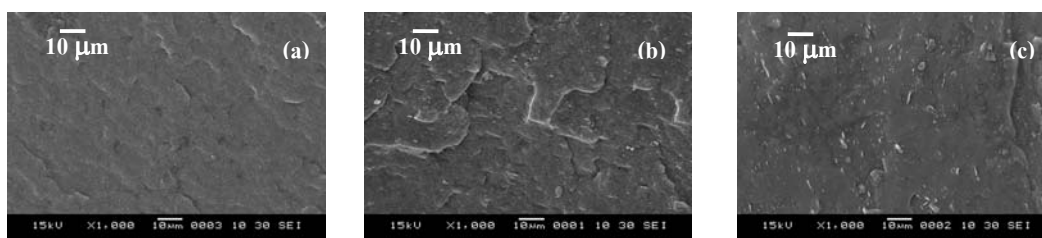
ระหว่างยางธรรมชาติผสมร่วมกับยางสังเคราะห์หลังผ่านปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน พบว่ายางธรรมชาติผสมร่วมกับยางโบรโมบิวไทล์ให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่ายางธรรมชาติผสมร่วมกับยางคลอโรบิวไทล์ (เหตุผลเหมือนกับที่อธิบายในหัวข้อ 3.5.4) เมื่อเปรียบเทียบเทคนิคการบดผสมแบบชั้นเดียวและสองชั้น พบว่าการใช้เทคนิคการบดผสมแบบชั้นเดียวให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าการบดผสมแบบสองชั้น ที่เป็นเช่นนี้มีสาเหตุมาจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นระหว่างการบดผสม (แบบสองชั้น) อาจมีผลต่อระบบการคงรูปและสมบัติเชิงกลที่ด้อยลงได้

3.6.5 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

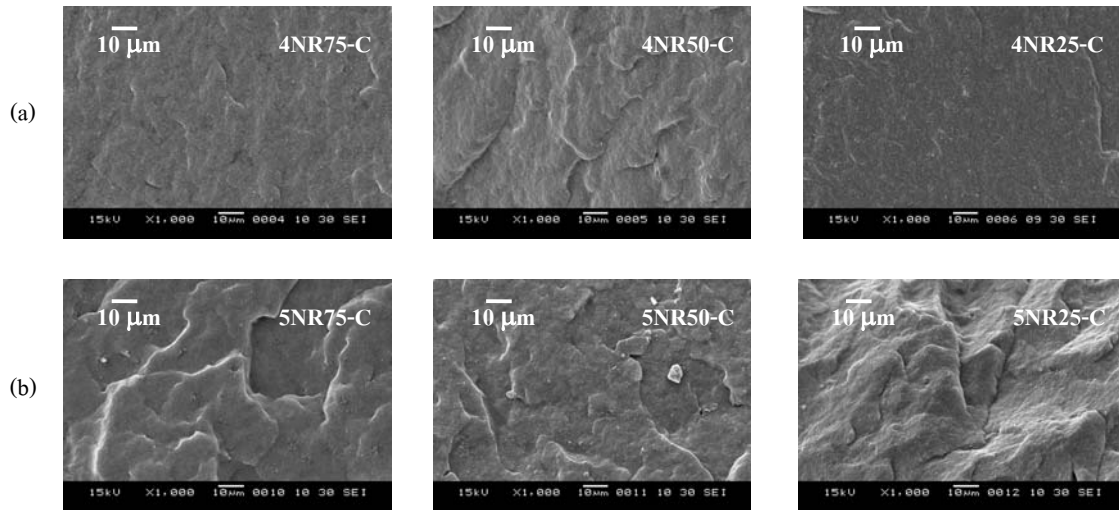
ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของคอมปาวด์ยางสูตรที่ 5 พบว่าพื้นผิวของคอมปาวด์ยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางสังเคราะห์บิวไทล์ทั้ง 2 ชนิด สามารถบดผสมเข้ากันได้ดีไม่มีการแยกวัฏภาค และการกระจายตัวของสารเคมีที่ใช้ในการคงรูป (อนุภาคสีขาว) สามารถกระจายตัวได้ดีในตัวยางทั้ง 2 ชนิด เช่นเดียวกับคอมปาวด์ยางในสูตรที่ 3 และ 4

รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของภาพตัดขวางของชิ้นงานยางธรรมชาติหลังผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันในสัดส่วนของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่แตกต่างกัน พบว่าในชิ้นงาน 5NR100-1 มีการใส่ผงเขม่าดำร่วมกับคาโอไลน์ในปริมาณ 60 และ 20 phr ตามลำดับ ลักษณะพื้นผิวมีความขรุขระมากกว่า (เมื่อเปรียบเทียบกับ 4NR100) และเห็นเป็นเส้นสีเทา (อนุภาคของคาโอไลน์) กระจายไปทั่วในตัวยาง (สีดำ) ซึ่งไม่พบการแยกวัฏภาคของยางทั้ง 2 ประเภท ความขรุขระบริเวณพื้นผิวจะสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน อาจเป็นผลมาจากการเติมปริมาณสารตัวเติมที่มากขึ้น ส่วนการผสมยางธรรมชาติร่วมกับคาโอไลน์ (5NR100-2) ให้พื้นผิวที่เรียบคล้ายคลึงกับรูป 3.5 (a) เพราะปริมาณสารตัวเติมที่ใส่เท่ากันคือ 20 phr แต่จะสังเกตเห็นเส้นสีเทา (อนุภาคของคาโอไลน์) กระจายตัวได้ดีในตัวยางทั้ง 2 ชนิดที่ไม่มีการแยกวัฏภาคออกจากกัน

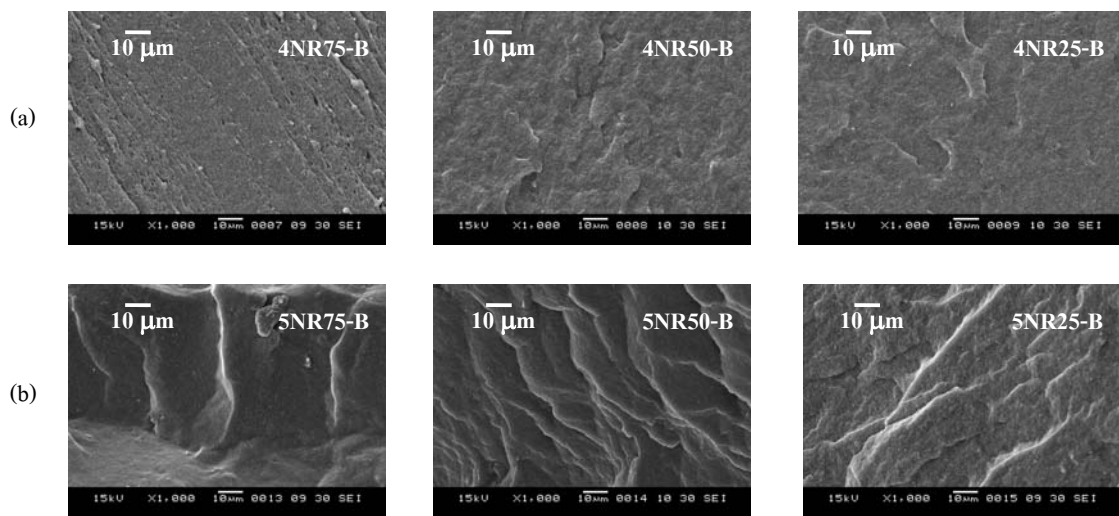
รูปที่ 3.6 และ 3.7 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของภาพตัดขวางของชิ้นงานยางธรรมชาติบดผสมร่วมกับยางคลอโรบิวไทล์และยางโบรโมบิวไทล์หลังผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน ตามลำดับ โดยใช้เทคนิคการบดผสมแบบชั้นเดียว (ในสูตรที่ 4) และเทคนิคการบดผสมแบบสองชั้น (ในสูตรที่ 5) ตามลำดับ พบว่าการบดผสมแบบชั้นเดียวจะแสดงความเรียบเนียนของพื้นผิวที่ดีกว่าการบดผสมแบบสองชั้นทั้งในยางธรรมชาติผสมร่วมกับยางคลอโรบิวไทล์และยางธรรมชาติผสมร่วมกับยางโบรโมบิวไทล์ แสดงว่าการบดผสมแบบชั้นเดียวจะทำให้ยางธรรมชาติที่ผสมร่วมกับยางสังเคราะห์บิวไทล์ทั้ง 2 ชนิดมีความเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีกว่า จึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 3.5 การเปรียบเทียบภาพตัดขวางของชิ้นงานยางธรรมชาติหลังผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน (a) ใส่ผงเขม่าดำ (4NR100) (b) ใส่ผงเขม่าดำร่วมกับคาโอไลน์ (5NR100-1) (c) ใส่คาโอไลน์ (5NR100-2) ของสูตรที่ 4 และ 5 โดยเทคนิคเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 3.6 การเปรียบเทียบภาพตัดขวางของชิ้นงานยางธรรมชาติผสมร่วมกับยางคลอโรพรีนไพล์หลังผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันของสูตรที่ 4 และ 5 ใช้เทคนิคในการบดผสม (a) แบบชั้นเดียว (b) แบบสองชั้น โดยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 3.7 การเปรียบเทียบภาพตัดขวางของชิ้นงานยางธรรมชาติผสมร่วมกับยางโพรโมบิวไพล์หลังผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันของสูตรที่ 4 และ 5 ใช้เทคนิคในการบดผสม (a) แบบชั้นเดียว (b) แบบสองชั้น โดยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

4.7 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าต่อการพัฒนาเชิงพาณิชย์

การวิเคราะห์ราคายางธรรมชาติและสารเคมีของสูตร 4NR100 ที่ใช้ในกระบวนการผลิตยางในรถจักรยานยนต์ พบว่าผลิตภัณฑ์ยางในรถจักรยานยนต์ที่ถูกออกแบบขึ้นในจากงานวิจัยนี้โดยใช้สูตรที่ 4 (4NR100) มีต้นทุนในการผลิตเท่ากับ 529.29 บาท/batch (1 batch เท่ากับคอมปาวด์ยางหนัก 2,722.5 กรัม) เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับราคาของยางในรถจักรยานยนต์ที่ผลิตจากยางธรรมชาติ (150 บาท/เส้น) และยางสังเคราะห์ไพล์ (250 บาท/เส้น) ที่มีขายในเชิงพาณิชย์ พบว่าผลิตภัณฑ์ยางในรถจักรยานยนต์ของสูตร 4NR100 มีราคาต่ำกว่า ทั้งนี้เนื่องมาจากการผลิตยางใน

รถจักรยานยนต์ของสูตร 4NR100 จะใช้คอมปาวด์ยางที่มีน้ำหนักถึง 2,722.5 กรัม/batch แสดงว่าคอมปาวด์ยางนั้นสามารถขึ้นรูปเป็นยางในรถจักรยานยนต์ได้ประมาณ 5-6 เส้นแต่ละเส้นหนักประมาณ 500 กรัม ซึ่งจะส่งผลให้ราคาของยางในรถจักรยานยนต์ที่ผลิตขึ้นมีราคาประมาณ 88-106 บาท/เส้น ผู้วิจัยคาดหวังว่าการนำคอมปาวด์ยางสูตรที่ 4 (4NR100) ไปผลิตเป็นยางในรถจักรยานยนต์จะทำให้ต้นทุนในการผลิตต่ำกว่าราคาที่คำนวณได้จากการทดลอง เนื่องจากราคาที่ได้อาจจากการคำนวณเป็นค่าใช้จ่ายที่สิ้นเปลือง ไม่ว่าจะเป็นราคาเหมาจ่ายของการใช้เครื่องบดผสมสองลูกกลิ้งและเครื่องเอ็กทราuder แต่อย่างไรก็ตามจากผลงานวิจัยนี้สามารถลดต้นทุนในการผลิตยางในได้ร้อยละ 60 เมื่อเทียบกับการใช้ยางในรถจักรยานยนต์ที่ผลิตจากยางสังเคราะห์บีวีไทล์ นอกจากนี้การใช้ยางธรรมชาติเพียงอย่างเดียวยังช่วยพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศไทย สร้างงานและสร้างรายได้ให้แก่คนไทย ตลอดจนการใช้ยางธรรมชาติเพียงอย่างเดียวมีประโยชน์ในแง่ทั้งการเลือกระบบการคงรูปที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน ความหนืดของยางธรรมชาติต่ำทำให้ขึ้นรูปง่าย ไม่มีการปลดปล่อยก๊าซพิษ เช่น HCl หรือ HBr (เมื่อเปรียบเทียบกับยางสังเคราะห์ฮาโลบีวีไทล์) และยังมีการปลดปล่อยพลังงานความร้อนที่ต่ำอีกด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้สามารถใช้ยางธรรมชาติทดแทนการใช้ยางสังเคราะห์บีวีไทล์ในการผลิตยางในรถจักรยานยนต์ได้สำเร็จ

4. สรุปผลการทดลอง (Conclusion)

งานวิจัยนี้ศึกษาการออกแบบสูตรยางในรถจักรยานยนต์ทั้งหมด 5 สูตร เพื่อบ่งเน้นการใช้ยางธรรมชาติมาทดแทนการใช้ยางสังเคราะห์บีวีไทล์ในกระบวนการผลิตยางในรถจักรยานยนต์ ยางที่ใช้ในงานวิจัยมี 3 ชนิด คือยางธรรมชาติ ยางคลอโรบีวีไทล์ และยางโบรโมบีวีไทล์ ตามลำดับ สูตรยางที่ดีที่สุดที่ให้สมบัติการคงรูป สมบัติเชิงกล ความร้อนสะสม และการรั่วซึมของอากาศที่ใกล้เคียงกับยางในที่มีขายในเชิงพาณิชย์ รวมทั้งผ่านค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของยางในรถจักรยานยนต์ (มอก. 683-2530) คือการใช้ยางธรรมชาติ 100 phr, ผงเขม่าคาร์บอน N550 60 phr, น้ำมันแอฟทานิก 8 phr, สไตรกทอล 4 phr, ซิงก์ออกไซด์ 3 phr, PEG 2 phr, กรดสเตียริก 1 phr, MBT 1 phr, 6PPD 1 phr, TMTM 0.5 phr, กำมะถัน 0.5 phr และแมกนีเซียมออกไซด์ 0.5 phr ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่าการใช้สูตรนี้ในการผสมระหว่างการใช้ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ฮาโลบีวีไทล์ 2 ชนิด (คลอโรบีวีไทล์, โบรโมบีวีไทล์) นั้น จะให้สมบัติการคงรูปและสมบัติเชิงกลที่ดีต่อยางธรรมชาติผสมร่วมกับยางโบรโมบีวีไทล์มากกว่ายางธรรมชาติผสมร่วมกับยางคลอโรบีวีไทล์ จากข้อมูลที่ได้ในการออกแบบสูตรในงานวิจัยนี้ สามารถนำยางธรรมชาติไปผลิตเป็นยางในรถจักรยานยนต์ เพื่อทดแทนการใช้ยางสังเคราะห์ บีวีไทล์ได้จริง และสามารถลดต้นทุนการผลิตได้ถึง 150 บาท/เส้น

ข้อเสนอแนะ

1. ควรปรับปรุงสูตรที่ 4 แม้ว่าสมบัติเชิงกล ได้แก่ ค่า T_B และ E_B ของชิ้นงานใน 4NR100 ที่ได้จะผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของยางในรถจักรยานยนต์ แต่ค่า E_B ที่ได้ยังน้อยกว่าเมื่อเทียบกับยางในรถจักรยานยนต์ที่ผลิตจากยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์บีวีไทล์ที่มีขายในเชิงพาณิชย์
2. ควรทดลองเพิ่มเติมในสูตร 5NR100-1 เนื่องจากสมบัติเชิงกล คือค่า T_B ที่ได้แม้จะผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของยางในรถจักรยานยนต์ และค่า M_{100} , M_{300} , T_B และค่าความแข็งแรงจะสูงกว่าเมื่อเทียบกับยางในรถจักรยานยนต์ที่ผลิตจากยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์บีวีไทล์ที่มีขายในเชิงพาณิชย์ แต่ค่า E_B ที่ได้ยังน้อยกว่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของยางในรถจักรยานยนต์ที่กำหนดไว้ นอกจากนี้ยังศึกษาการใส่คาโอลิไนท์ว่าจะสามารถช่วยลดการซึมผ่านของอากาศได้มากน้อยเพียงใด

5. คำขอบคุณ (Acknowledgements)

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.) ที่มอบเงินทุนสนับสนุนตลอดงานวิจัยนี้จนทำให้โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Wang Y., *et al.* Preparation and properties of natural rubber/rectrite nanocomposites. *Eur. Polym. J.*, 2005, 41, 2776-2783.
- [2] Choudalakis G., Gotsis A. D., Permeability of polymer/clay nanocomposites: A review. *Eur. Polym. J.*, 2009, 45, 967-984.
- [3] Buzaré J. Y., *et al.* Aging effects on vulcanized natural rubber studied by high resolution solid state C-NMR. *Eur. Polym. J.*, 2001, 37, 85-91.
- [4] Park D. M., *et al.* Heat generation of filled rubber vulcanizates and its relationship with vulcanizate network structures. *Eur. Polym. J.*, 2000, 36, 2429-2436.
- [5] Saowapark T., Reinforcement of natural rubber with silica/carbon black hybrid filler. *Polym. Sci. Technol.*, Mahidol University, 2005.
- [6] ดร.พงษ์ธร แซ่อู๋. สารเคมียาง. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, ปทุมธานี, 2548.
- [7] Hofmann W., Rubber Technology Handbook. Hanser Publishers, Munich, 1989.

สรุปข้อคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิต่อร่างรายงานของโครงการ
“การเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟสำหรับใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงในยางธรรมชาติ” สัญญาเลขที่ RDG5350032

ข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ	ชี้แจงโดยนักวิจัย
<u>ความเห็นด้านการพิมพ์ (Editorial)</u> - ขอให้ใส่เลขหน้ากำกับในรายงาน - การเขียนอธิบายและรูปภาพควรอยู่ในหน้าเดียวกันจะทำให้อ่านเข้าใจได้ง่ายขึ้น	แก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิเรียบร้อยแล้ว แก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิเรียบร้อยแล้ว
<u>ความเห็นด้านวิชาการ (Technical)</u> - นักวิจัยควรทบทวนการวิจารณ์ผลการทดลองในส่วนที่เกี่ยวข้องกับสมบัติต่างๆของยางที่เติมสารตัวเติมชนิดต่างๆทั้งหมด โดยต้องคำนึงถึงหลักทฤษฎีที่เป็นตามหลักวิชาการและความเหมาะสม ถูกต้อง เช่น - ข้อ 2.1 การวิจารณ์ผลของ MV ควรอิงกับหลักการที่เครื่องทำงาน/เครื่องอ่านค่าอะไร และการได้ค่าสูง/ต่ำน่าจะเป็นเนื่องจากอะไร - ข้อ 2.2 เหตุผลที่พยายามสนับสนุนผลที่วิจัยได้ก็ไม่น่าจะต้องตามหลักวิชาการ - ข้อ 2.3.1-2.3.3 และ ข้อ 2.4 มีทั้งการให้เหตุผลโดยพยายามให้สอดคล้องกับผลการทดลอง บางกรณีก็ไม่มีเหตุผลสนับสนุน - ควรระบุด้วยว่ามีการทดลองกี่ซ้ำ ข้อมูลที่สรุปได้มาจากค่าเฉลี่ยหรืออย่างไร	ได้ทำการแก้ไขการวิจารณ์ผลตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิเรียบร้อยแล้ว (สามารถดูได้ในรายงานฉบับสมบูรณ์: หัวข้อ 2.1) ได้ทำการแก้ไขและอธิบายเพิ่มเติมโดยอาศัยค่าความเป็นกรด-ด่างของสารตัวเติม (สามารถดูได้ในรายงานฉบับสมบูรณ์: ผลการทดลอง 2.2) ได้กล่าวถึงเหตุผลสนับสนุนผลการทดลองที่ได้ไว้หลังหัวข้อ 2.5 แก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิเรียบร้อยแล้ว (สามารถดูได้ในรายงานฉบับสมบูรณ์: หัวข้อการทดสอบ)

ข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ	ชี้แจงโดยนักวิจัย
<u>ข้อเสนอแนะ</u> 1. การทำถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ น่าจะมีต้นทุนการผลิตที่สูงและราคาแพง นักวิจัยควรคำนึงถึงประเด็นนี้ด้วย 2. ควรหาผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำประโยชน์จากถ่านกัมมันต์นี้ไปใช้ได้โดยตรง เช่น นำไปผสมในเส้นใยผ้าสีดำ เพื่อดูดซับกลิ่นต่างๆ เป็นต้น	สำหรับถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้ ได้นำเอากากกาแฟซึ่งเป็นขยะที่ได้จากการบริโภคกาแฟมาใช้เป็นวัตถุดิบ และเลือกใช้การกระตุ้นภายใต้สภาวะการรับอนไดออกไซด์ จึงทำให้ต้นทุนที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ในครั้งนี้ไม่สูง