



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การใช้เถ้าปล้มน้ำมันเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ

Using palm oil fuel ash as a filler in natural rubber

โดย ดร. ปุณณานิซ อินทรพัฒน์ และคณะ

สิงหาคม 2555

รายงานฉบับสมบูรณ์

การใช้เถ้าปล้มน้ำมันเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ

Using palm oil fuel ash as a filler in natural rubber

คณะผู้วิจัย

สังกัด

1. ดร.ปญญานิซ อินทรพัฒน์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

2. นายอรุณ คงหนู

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

3. พญ. ชีรนนท์ เลหาวิริยะกมล

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

4. นายกวิชาติ กะเตื่องงาน

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ชุดโครงการวิจัยขนาดเล็กเรื่องยางพารา

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปรายงานสำหรับผู้บริหาร (Executive Summary)

ชื่อโครงการวิจัย : การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ

Using palm oil fuel ash as a filler in natural rubber

หัวหน้าโครงการ : ดร. ปุณยานิช อินทรพัฒน์ หน่วยงาน คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ โทรศัพท์ 086-2868154, 074-286848

โทรสาร 074-429758 E-mail Address: punyanich@hotmail.com

ผู้ร่วมวิจัย : อาจารย์อรุณ กงหนู หน่วยงาน คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
 พญ.ธีรนนท์ เลหาวิริยะกมล หน่วยงาน คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
 อาจารย์กวีชาติ กะเตื่องงาน หน่วยงาน คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ระยะเวลาดำเนินการ 12 เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 สิงหาคม 2554 ถึงวันที่ 30 สิงหาคม 2555

ปัญหาที่ทำวิจัยและความสำคัญ

เถ้าปาล์มน้ำมัน (Palm oil fuel ash) เป็นของเสียที่เกิดขึ้นจากการนำเศษวัสดุจากกระบวนการผลิตปาล์ม น้ำมัน เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงแก่หม้อกำเนิดไอน้ำ (Stream boiler) สำหรับป้อนเข้าสู่กระบวนการผลิต ทำให้มีปริมาณ เถ้าปาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นจากการใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงสูงถึงประมาณ 107,000 ตันต่อปี และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เถ้าปาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นผงฝุ่นและมีองค์ประกอบทางเคมี คือ SiO_2 เถ้าปาล์มน้ำมัน ร้อยละ 30-70 (ชัย, 2553; Tonnayopas *et al*, 2006) และยังประกอบด้วยโลหะออกไซด์ต่างๆ เช่น Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO และ CaO เป็นต้น ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันจากงานวิจัยเบื้องต้นที่ผ่านมา ซึ่งมีองค์ประกอบเช่นเดียวกับสารตัวเติมซิลิกา ที่มีความนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมยางเพราะให้สมบัติที่ดี ฉะนั้นหากสามารถนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติเพื่อทดแทนหรือลดปริมาณใน ส่วนของซิลิกาหรือสารตัวเติมอื่นๆ ก็จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งทั้งในด้านของเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม ขณะเดียวกันยังช่วยลดปัญหาการกำจัดของเสียเถ้าปาล์มน้ำมันของโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มได้อีกทางหนึ่งแทนการ ปล่อยทิ้งไว้เป็นของเสียที่ไม่มีคุณค่า

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการใช้ผงเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติและสมบัติของยาง

ผลการดำเนินงาน

การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาการใช้เถาปลาล์มน้ำมันเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ โดยศึกษาถึงองค์ประกอบทางเคมีของเถาปลาล์มน้ำมัน หมู่ฟังก์ชันและสมบัติพื้นฐานทางกายภาพ ซึ่งพบว่าเถาปลาล์มน้ำมันมีองค์ประกอบหลักทางเคมี คือ ซิลิกอนไดออกไซด์หรือซิลิกา 46.8 % และพบหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญคือ หมู่ไฮดรอกซิลของไซลันอลและหมู่ไซลอกเซน นอกจากนี้เถาปลาล์มน้ำมันยังมีรูปร่างอนุภาคที่แตกต่างกัน ซึ่งมีทั้งที่เป็นรูปร่างทรงกลมตันและเป็นแท่งที่มีความพรุนสูง มีค่าพีเอชเท่ากับ 9.8 สำหรับวิธีการทดลอง เถาปลาล์มน้ำมันจะถูกนำมาร้อนผ่านตะแกรงเพื่อคัดแยกขนาด และนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ โดยศึกษาอิทธิพลของปริมาณและขนาดอนุภาคเถาปลาล์มน้ำมัน เพื่อเลือกสภาวะที่ดีที่สุดนำมาใช้เปรียบเทียบกับสารตัวเติมทางการค้า ได้แก่ ซิลิกา เหม่าดำ และแคลเซียมคาร์บอเนต รวมทั้งการนำเถาปลาล์มน้ำมันมาใช้เป็นสารตัวเติมผสมระหว่างเถาปลาล์มน้ำมันกับสารตัวเติมทางการค้าดังกล่าว จากผลการทดลองโดยกำหนดขนาดเถาปลาล์มน้ำมัน 325 เมช พบว่า การเพิ่มปริมาณเถาปลาล์มน้ำมันจาก 20, 30 และ 40 phr ในยางธรรมชาติส่งผลให้เวลาการคงรูปลดลง หลังจากนั้นมีความหนืดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนค่ามอดูลัสและความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถาปลาล์มน้ำมัน ในขณะที่ความทนต่อแรงดึงและความทนต่อการฉีกขาดมีค่าสูงสุดที่ปริมาณเถาปลาล์มน้ำมัน 30 phr ส่วนความเสถียรทางความร้อนของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถาปลาล์มน้ำมันที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณเถาปลาล์มน้ำมันที่เพิ่มขึ้นทำให้อนุภาคอยู่ใกล้กันและเกิดการรวมกลุ่มได้ เมื่อใช้ขนาดอนุภาคเถาปลาล์มน้ำมันแตกต่างกันที่ 120, 200 และ 325 เมช ที่ปริมาณ 30 phr พบว่า เถาปลาล์มน้ำมันที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ส่งผลให้เวลาสกอชและเวลาวัลคาไนซ์ของยางสั้นกว่าขนาดอนุภาคเล็ก (200 และ 325 เมช ตามลำดับ) ส่วนค่าผลต่างแรงบิดของยางธรรมชาติที่เติมเถาปลาล์มน้ำมันขนาดอนุภาคเล็กจะสูงกว่าขนาดใหญ่ สมบัติเชิงกลและความเสถียรทางความร้อนของยางเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ขนาดอนุภาคเถาปลาล์มน้ำมันเล็กลงและยังพบว่า เถาปลาล์มน้ำมันที่มีขนาดอนุภาคเล็ก (325 เมช) มีการกระจายตัวในยางธรรมชาติ และมีการยึดเกาะระหว่างเฟสดีกว่าที่ขนาด 200 และ 120 เมช ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบชนิดของเถาปลาล์มน้ำมันกับสารตัวเติมทางการค้า พบว่า ยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติมเถาปลาล์มน้ำมันมีเวลาสกอชและเวลาวัลคาไนซ์น้อยกว่าซิลิกาแต่มากกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตและเหม่าดำเล็กน้อย สมบัติเชิงกลของยางที่ใส่เถาปลาล์มน้ำมันมีค่าใกล้เคียงกับซิลิกา ขณะที่เถาปลาล์มน้ำมันทำใหยางมีความเสถียรต่อความร้อนสูงกว่าสารตัวเติมอื่นๆ ส่วนการใช้สารตัวเติมผสมของเถาปลาล์มน้ำมันกับสารตัวเติมทางการค้า (ซิลิกา เหม่าดำ และแคลเซียมคาร์บอเนต) พบว่า เมื่อสัดส่วนของเถาปลาล์มน้ำมันในสารตัวเติมผสมทุกชนิดเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาสกอชและเวลาวัลคาไนซ์ลดลง สำหรับสมบัติเชิงกล พบว่า การเพิ่มสัดส่วนเถาปลาล์มน้ำมันในสารตัวเติมผสมของเถาปลาล์มน้ำมันกับซิลิกาและเถาปลาล์มน้ำมันกับแคลเซียมคาร์บอเนตทำให้มีค่าเพิ่มขึ้น แต่การใช้สารตัวเติมผสมของเถาปลาล์มน้ำมันกับเหม่าดำพบว่ามีค่าลดลงเล็กน้อย ส่วนความสามารถในการยึดของยาง ณ จุดขาด ของยางที่ใช้สารตัวเติมผสมมีค่าลดลง ในขณะที่ความเสถียรทางความร้อนของยางที่ใช้สารตัวเติมผสมสูงกว่าการใช้สารตัวเติมเพียงตัวเดียว

สรุปผลการวิจัย

ถ้าปาล์มน้ำมันสามารถนำมาใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงในยางธรรมชาติได้และยังให้สมบัติที่เหนือกว่าการใช้ซิลิกาทางการค้าในด้านสมบัติการวัลคาไนซ์ ได้แก่ เวลาสกอชและเวลาวัลคาไนซ์ที่น้อยกว่า ซึ่งเป็นสิ่งที่มีประโยชน์ต่อกระบวนการขึ้นรูปยางโดยจะช่วยลดเวลาในการผลิตได้ และยังให้ค่าผลต่างแรงบิดที่สูงกว่าซึ่งบ่งบอกถึงมีความหนาแน่นพันธะเชื่อมโยงมากกว่า นอกจากนี้การใช้ถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณ 30 phr ซึ่งให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด (ได้แก่ มอดูลัส ความทนต่อแรงดึง ความทนต่อการฉีกขาด เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดและความแข็ง) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการใช้ซิลิกาที่ปริมาณเดียวกัน นอกจากนี้การใช้ถ้าปาล์มน้ำมันเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติยังช่วยให้เพิ่มความเสถียรทางความร้อนให้แก่ยางได้ดีกว่าสารตัวเติมทางการค้า (ซิลิกา เหมำดำ และแคลเซียมคาร์บอเนต)

ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการเสริมแรงของถ้าปาล์มน้ำมันโดยใช้สารคู่ควบ (coupling agent) เช่น สารคู่ควบไซเลน เพื่อเพิ่มอันตรกิริยาและการยึดติดระหว่างยางกับอนุภาคสารตัวเติม ซึ่งจะทำให้สมบัติเชิงกลและสมบัติอื่นๆดีขึ้นด้วย

ผลงานทางวิชาการที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

- ผลงานตีพิมพ์ระดับนานาชาติ 1 เรื่อง

บทคัดย่อ

โครงการวิจัย: RDG5450062

ชื่อโครงการวิจัย : การใช้เถาปล้ำน้ำมันเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ

นักวิจัย: ดร. ปุญญานิช อินทรพัฒน์และคณะ (คณะกรรมการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

วิทยาเขตหาดใหญ่ อ. หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112)

E-mail address: punyanich@hotmail.com

ระยะเวลาที่ทำการวิจัย : 1 สิงหาคม 2554 ถึงวันที่ 30 สิงหาคม 2555

เถาปล้ำน้ำมันมีองค์ประกอบหลักทางเคมี คือ ซิลิกอนไดออกไซด์หรือซิลิกา 46.8 % และพบหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญคือ หมู่ไฮดรอกซิลของโซลานอลและหมู่ไฮลอคเซน เมื่อนำเถาปล้ำน้ำมันมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติโดยศึกษาอิทธิพลของปริมาณเถาปล้ำน้ำมันที่ 20, 30, 40, 50, 60 และ 70 phr และขนาดอนุภาคเถาปล้ำน้ำมันที่ 120, 200 และ 325 เมช พบว่า การใช้เถาปล้ำน้ำมันที่ปริมาณ 30 phr และขนาดอนุภาค 325 เมช ส่งผลให้ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงกลดีที่สุด ส่วนสมบัติการวัลคาไนซ์ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเถาปล้ำน้ำมันส่งผลให้เวลาสกอซและเวลาวัลคาไนซ์ลดลง ขณะที่ค่าผลต่างแรงบิดเพิ่มขึ้น สำหรับอุณหภูมิการสลายตัวของยางมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณเถาปล้ำน้ำมันที่เพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นถึงความเสถียรทางความร้อนที่เพิ่มขึ้น จากฐานฐานวิทยา พบว่าการเพิ่มปริมาณเถาปล้ำน้ำมันทำให้มีเถาปล้ำน้ำมันกระจายตัวอยู่ในยางเพิ่มขึ้นและมีแนวโน้มรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน เมื่อเปรียบเทียบสมบัติของยางที่ใช้เถาปล้ำน้ำมันเป็นสารตัวเติมกับสารตัวเติมทางการค้าอื่นๆ (ซิลิกา เชม่าดำ และแคลเซียมคาร์บอเนต) พบว่ายางธรรมชาติที่ใส่เถาปล้ำน้ำมันมีเวลาสกอซและเวลาวัลคาไนซ์น้อยกว่ายางธรรมชาติที่ไม่ใส่สารตัวเติมและใส่ซิลิกา ตามลำดับ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนตและเชม่าดำจะมากกว่าเล็กน้อย สำหรับสมบัติเชิงกลของยางที่ใส่เถาปล้ำน้ำมันนั้นมีความใกล้เคียงกับซิลิกา แต่มีความเสถียรต่อความร้อนสูงกว่าสารตัวเติมอื่นๆ จากฐานฐานวิทยา พบว่าเถาปล้ำน้ำมัน ซิลิกา และเชม่าดำมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ และมีการยึดเกาะระหว่างเฟสยางกับสารตัวเติมดีกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต เมื่อศึกษาการใช้สารตัวเติมผสมของเถาปล้ำน้ำมันร่วมกับสารตัวเติมทางการค้า (ซิลิกา เชม่าดำ และแคลเซียมคาร์บอเนต) ที่สัดส่วนเท่ากับ 0:30, 5:25, 15:15, 25:5 และ 30:0 phr พบว่า เมื่อสัดส่วนของเถาปล้ำน้ำมันในสารตัวเติมผสมทุกชนิดเพิ่มขึ้นส่งผลให้เวลาสกอซและเวลาวัลคาไนซ์ลดลง ส่วนสมบัติเชิงกล พบว่าการเพิ่มสัดส่วนเถาปล้ำน้ำมันในสารตัวเติมผสมของเถาปล้ำน้ำมันกับซิลิกาและเถาปล้ำน้ำมันกับแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้น แต่การใช้สารตัวเติมผสมของเถาปล้ำน้ำมันกับเชม่าดำพบว่าสมบัติเชิงกลมีค่าลดลงเล็กน้อย ความเสถียรทางความร้อนของยางที่ใช้สารตัวเติมผสมสูงกว่าการใช้สารตัวเติมเพียงตัวเดียว ส่วนฐานฐานวิทยาของสารตัวเติมผสมของเถาปล้ำน้ำมันกับซิลิกาและเถาปล้ำน้ำมันกับแคลเซียมคาร์บอเนตมีการกระจายตัวสม่ำเสมอมากกว่าสารตัวเติมผสมของเถาปล้ำน้ำมันกับเชม่าดำ

คำสำคัญ : ยางธรรมชาติ, เถาปล้ำน้ำมัน, สารตัวเติม

Abstract

Project Code: RDG5350026

Title: Using palm oil fuel ash as a filler in natural rubber

Investigator: Dr. Punyanich Intharapat, et al. (Faculty of Environmental Management, Prince of Songkla University, Hadyai Campus, Songkhla 90112)

E-mail address: punyanich@hotmail.com

Project period: August 1, 2010 – August 30, 2011

Palm oil fuel ash (POFA) mainly consists chemical composition of silicon dioxide or silica 46.8% with existing of important functional groups such as hydroxyl group of silanol and siloxane group. Using POFA as a filler in natural rubber (NR) considering on the effect of POFA content in 20, 30, 40, 50, 60 and 70 phr and particle size of POFA at 120, 200 and 325 mesh was found that the introducing of POFA at 30 phr with particle size of 325 mesh yielded optimum mechanical properties. Cure characteristic such as scorch time and cure time decreased while torque difference increased with increasing of POFA content. For degradation temperature of POFA filled NR, it increased with increasing POFA content. This indicated the increasing of thermal stability. Morphology revealed that increasing of POFA content caused increasing dispersed phase in NR and trend to form agglomeration. Comparing properties of POFA and commercial fillers (i.e., silica, carbon black and calcium carbonate) filled NR, it was found that NR containing POFA provided shorter scorch time and cure time than gum NR and NR containing silica but it was slightly longer scorch time and cure time than carbon black and calcium carbonate. For mechanical properties, NR containing POFA was comparable to NR containing silica. Thermal stability of NR containing POFA showed the highest degradation temperature over other fillers. Morphology showed the greater uniform dispersion and interfacial adhesion of POFA, silica and carbon black over than calcium carbonate. In case of NR filled hybrid fillers with POFA:commercial fillers (i.e., silica, carbon black and calcium carbonate) ratios of 0:30, 5:25, 15:15, 25:5 and 30:0 phr on cure characteristic showed that scorch time and cure time decreased with increasing amount of POFA in all types of hybrid fillers. For mechanical properties, increasing amount of POFA in POFA:silica and POFA:calcium carbonate hybrid fillers can improve mechanical properties but in POFA:carbon black hybrid fillers was slightly deficient. Thermal stability of NR filled with all type of hybrid fillers was superior to non-hybrid fillers. Morphology of POFA:silica and POFA:calcium carbonate hybrid fillers showed more uniform dispersion than POFA:carbon black hybrid fillers.

Keywords: natural rubber, palm oil fuel ash, filler

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ โครงการวิจัยแห่งชาติ: ยางพารา ฝ้ายอุตสาหกรรม สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สำหรับทุนวิจัย ที่ทำให้งานวิจัยนี้เกิดขึ้นและสำเร็จลุล่วงไปได้

ขอขอบคุณ กลุ่มบริษัทท่าฉางอุตสาหกรรม อ.ท่าฉาง จ.สุราษฎร์ธานี ที่กรุณาเอื้อเพื่อเช่าปาล์มน้ำมัน สำหรับการทำงานวิจัยตลอดโครงการจนสำเร็จลุล่วงไปได้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย อุบลราชธานี ที่เอื้อเพื่อสถานที่และอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้

ขอขอบคุณ นางสาวชิราภรณ์ สมกึ่ง นางสาวรัตนาวดี นิลจันทร์ อาจารย์กวีชาติ กะเตื่องงาน และอาจารย์ อรุณ คงหนู รวมทั้งเจ้าหน้าที่ทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกตลอดระยะเวลาการทำวิจัย จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จ ลุล่วงไปได้

ดร. ปุณณนิช อินทรพัฒน์

30 สิงหาคม 2555

สารบัญ

	หน้า
บทสรุปรายงานสำหรับผู้บริหาร (Executive Summary)	i
บทคัดย่อ	iv
Abstract	v
กิตติกรรมประกาศ	vi
สารบัญ	vii
สารบัญตาราง	ix
สารบัญรูป	x
เนื้อหา	
1. ความสำคัญและความเป็นมาของการวิจัย	1
2. วัตถุประสงค์	2
3. ทฤษฎี แนวคิดในการวิจัย และผลงานที่เกี่ยวข้อง	2
4. วิธีดำเนินการวิจัย	4
4.1 สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ	4
4.2 การเตรียมผงถ่านปาล์มน้ำมัน	5
4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างและองค์ประกอบถ่านปาล์มน้ำมัน	6
4.4 การเตรียมยางคอมพาวนด์	6
4.5 การทดสอบสมบัติของยาง	10
5. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	13
5.1 โครงสร้าง องค์ประกอบ และสมบัติของถ่านปาล์มน้ำมัน	13
5.2 อิทธิพลของปริมาณของถ่านปาล์มน้ำมันต่อสมบัติด้านต่างๆของยางคอมพาวนด์และยางวัลคาไนซ์	16
5.3 อิทธิพลของขนาดอนุภาคถ่านปาล์มน้ำมันต่อสมบัติด้านต่างๆของยางคอมพาวนด์และยางวัลคาไนซ์	23
5.4 อิทธิพลของชนิดของสารตัวเติมทางการค้าเปรียบเทียบกับถ่านปาล์มน้ำมันต่อสมบัติด้านต่างๆของยางคอมพาวนด์และยางวัลคาไนซ์	29

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.5 อิทธิพลของสารตัวเติมผสมของเถ้าปาล์มน้ำมันกับสารตัวเติมทางการค้า (ซิลิกา เหมาดำ และแคลเซียม คาร์บอเนต) ต่อสมบัติด้านต่างๆของยางคอมพาวนด์ และยางวัลคาไนซ์	36
6. สรุปผลการทดลอง	46
7. คำขอบคุณ	49
8. ข้อเสนอแนะ	49
เอกสารอ้างอิง	50
ภาคผนวก	52

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 องค์ประกอบธาตุที่มีในเถาปลาล์มน้ำมัน	3
4.1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมยางคอมพาวนด์ผสมเถาปลาล์มน้ำมันที่ปริมาณต่างๆ	7
4.2 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมยางคอมพาวนด์ผสมเถาปลาล์มน้ำมันที่ขนาดอนุภาคต่างๆ	7
4.3 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมยางคอมพาวนด์ผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ	8
4.4 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมยางคอมพาวนด์ผสมสารตัวเติมทางการค้าร่วมกับผงเถาปลาล์มน้ำมัน	9
4.5 ลำดับการใส่สารเคมี	10
5.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถาปลาล์มน้ำมัน	14
5.2 พื้นที่ผิวและความถ่วงจำเพาะของเถาปลาล์มน้ำมัน	14
5.3 อุณหภูมิสลายตัวที่ตำแหน่ง Onset และ Midpoint ของยางธรรมชาติที่มีปริมาณเถาปลาล์มน้ำมัน 0, 30 และ 60 phr	20
5.4 อุณหภูมิสลายตัวที่ตำแหน่ง Onset และ Midpoint ของยางธรรมชาติผสมเถาปลาล์มน้ำมัน ที่ขนาดอนุภาคต่างๆ	28
5.5 อุณหภูมิสลายตัวที่ตำแหน่ง Onset และ Midpoint ของยางธรรมชาติผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ	34
5.6 อุณหภูมิสลายตัวที่ตำแหน่ง Onset และ Midpoint ของยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติมผสมของ เถาปลาล์มน้ำมันกับซิลิกา เถาปลาล์มน้ำมันกับเขม่าดำ และเถาปลาล์มน้ำมันกับแคลเซียมคาร์บอเนต ที่สัดส่วนต่างๆ	43

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 กองถ้ำปลาล์มน้ำมัน	2
3.2 การดูคลื่นรังสีอินฟราเรดของถ้ำปลาล์มน้ำมัน	3
4.1 พงถ้ำปลาล์มน้ำมันก่อนและหลังร้อนผ่านตะแกรงคัดแยกขนาด	5
5.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของถ้ำปลาล์มน้ำมัน	13
5.2 ลักษณะวิทยาของถ้ำปลาล์มน้ำมัน (กำลังขยาย 200 เท่า)	15
5.3 เวลาสก๊ชและเวลาวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 160°C ของยางธรรมชาติผสมถ้ำปลาล์มน้ำมัน ปริมาณต่างๆ	16
5.4 ผลต่างแรงบิดของยางธรรมชาติผสมถ้ำปลาล์มน้ำมันที่ปริมาณต่างๆ	17
5.5 ค่ามอดูลัส ณ การยืดตัว 100 เปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติผสมถ้ำปลาล์มน้ำมันที่ปริมาณต่างๆ	17
5.6 ความทนต่อแรงดึงและความทนต่อการฉีกขาดของยางธรรมชาติผสมถ้ำปลาล์มน้ำมัน ที่ปริมาณต่างๆ	18
5.7 ความสามารถในการยืดขนาดของยางธรรมชาติผสมถ้ำปลาล์มน้ำมันที่ปริมาณต่างๆ	19
5.8 ความแข็งแรงของยางธรรมชาติผสมถ้ำปลาล์มน้ำมันที่ปริมาณต่างๆ	19
5.9 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่ออุณหภูมิของยางธรรมชาติผสมถ้ำปลาล์มน้ำมันที่ปริมาณต่างๆ	20
5.10 ลักษณะวิทยาของยางธรรมชาติผสมถ้ำปลาล์มน้ำมันที่ปริมาณต่างๆ (กำลังขยาย 200 เท่า)	22
5.11 เวลาสก๊ชและเวลาวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 160°C ของยางธรรมชาติผสมถ้ำปลาล์มน้ำมันที่ ขนาดอนุภาคต่างๆ	23
5.12 ผลต่างแรงบิดของยางธรรมชาติผสมถ้ำปลาล์มน้ำมันที่ขนาดอนุภาคต่างๆ	24
5.13 ค่ามอดูลัส ณ การยืดตัว 100 เปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติผสมถ้ำปลาล์มน้ำมัน ที่ขนาดอนุภาคต่างๆ	24
5.14 ความทนต่อแรงดึงและความทนต่อการฉีกขาดของยางธรรมชาติผสมถ้ำปลาล์มน้ำมัน ที่ขนาดอนุภาคต่างๆ	25
5.15 เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติผสมถ้ำปลาล์มน้ำมันที่ขนาดอนุภาคต่างๆ	26
5.16 ความแข็งแรงของยางธรรมชาติผสมถ้ำปลาล์มน้ำมันที่ขนาดอนุภาคต่างๆ	27
5.17 ลักษณะวิทยาของยางธรรมชาติผสมถ้ำปลาล์มน้ำมันที่ขนาดอนุภาคต่างๆ (กำลังขยาย 1,000 เท่า)	29
5.18 เวลาสก๊ชและเวลาวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 160°C ของยางธรรมชาติผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ	29
5.19 ผลต่างแรงบิดของยางธรรมชาติผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ	30
5.20 ค่ามอดูลัส ณ การยืดตัว 100 เปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ	31

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.21 ความทนต่อแรงดึงและความทนต่อการนึ่งของยางธรรมชาติผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ	31
5.22 เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางธรรมชาติผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ	32
5.23 ความแข็งของยางธรรมชาติผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ	33
5.24 สันฐานวิทยาของยางธรรมชาติผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ (กำลังขยาย 1,000 เท่า)	35
5.25 เวลาสกออกและเวลาวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติมผสมของถ้ำปาล์มน้ำมัน ร่วมกับซิลิกา เหมาดำ และแคลเซียมคาร์บอเนตที่สัดส่วนต่างๆ	36
5.26 ผลต่างแรงบิดของยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติมผสมของถ้ำปาล์มน้ำมันร่วมกับซิลิกา เหมาดำ และแคลเซียมคาร์บอเนตที่สัดส่วนต่างๆ	37
5.27 ค่ามอดูลัส ณ การยืดตัว 100 เปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติมผสมของ ถ้ำปาล์มน้ำมันร่วมกับซิลิกา เหมาดำ และแคลเซียมคาร์บอเนตที่สัดส่วนต่างๆ	38
5.28 ความทนต่อแรงดึงและความทนต่อการนึ่งของยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติมผสมของ (a) ถ้ำปาล์มน้ำมันกับซิลิกา (b) ถ้ำปาล์มน้ำมันกับเหมาดำ และ (c) ถ้ำปาล์มน้ำมันกับแคลเซียมคาร์บอเนตที่สัดส่วนต่างๆ	40
5.29 เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติมผสมของ (a) ถ้ำปาล์มน้ำมันกับซิลิกา (b) ถ้ำปาล์มน้ำมันกับเหมาดำ และ (c) ถ้ำปาล์มน้ำมันกับแคลเซียมคาร์บอเนตที่สัดส่วนต่างๆ	41
5.30 ความแข็งของยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติมผสมของถ้ำปาล์มน้ำมันกับซิลิกา ถ้ำปาล์มน้ำมันกับเหมาดำ และถ้ำปาล์มน้ำมันกับแคลเซียมคาร์บอเนตที่สัดส่วนต่างๆ	42
5.31 สันฐานวิทยาของยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติมผสมของถ้ำปาล์มน้ำมันกับซิลิกา ถ้ำปาล์มน้ำมันกับเหมาดำ และถ้ำปาล์มน้ำมันกับแคลเซียมคาร์บอเนตที่สัดส่วนเท่ากับ 15:15	46

1. ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

การผลิตผลิตภัณฑ์ยางในปัจจุบันจำเป็นต้องมีการผสมสารเคมีเข้าไป เพื่อปรับปรุงให้ยางมีสมบัติตามที่ต้องการและเหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งสารเคมีที่มีการใช้ในปริมาณมากและช่วยปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางได้อย่างมาก คือ สารตัวเติม ซึ่งเป็นสารเคมีที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรมยาง สารเหล่านี้ ได้แก่ เชม่าดำ ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต แต่เนื่องจากสารตัวเติมที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ ยังมีราคาค่อนข้างสูงและผลิตจากปิโตรเลียมหรือก๊าซธรรมชาติ (ในกรณีของเชม่าดำ) การระบิดเอาแร่หินมาบด หรือการสังเคราะห์ขึ้นมา (ในกรณีของซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนต) ซึ่งมีความยุ่งยากในกระบวนการผลิตและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้น การเอาชีวมวล (Biomass) จากวัสดุเหลือใช้ เช่น ผงเถ้าปาล์มน้ำมัน แทนการใช้สารตัวเติมในปัจจุบัน จะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการซื้อสารตัวเติม และปริมาณของเสียจากโรงงานผลิตปาล์มน้ำมันที่จะต้องนำไปกำจัดทิ้ง

เถ้าปาล์มน้ำมัน (Palm oil fuel ash) เป็นของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันและโรงงานที่มีการเผาากของเสียของผลปาล์ม เช่น เศษกะลา เส้นใย และทะลายปาล์ม เพื่อเป็นเชื้อเพลิงให้หม้อกำเนิดไอน้ำ (Stream boiler) สำหรับป้อนเข้าสู่กระบวนการผลิต โดยมีปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นจากการใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงสูงถึงประมาณ 107,000 ตันต่อปี และคาดว่าจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นถึงประมาณ 3 เท่า ในอีก 10-15 ปีข้างหน้า เนื่องมาจากรัฐบาลมีนโยบายที่จะนำปาล์มน้ำมันมาใช้เป็นพลังงานทดแทนในการผลิตไบโอดีเซล และน้ำมันพืช สำหรับใช้ในการบริโภคซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสัดส่วนปริมาณของเสียที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน จากข้อมูลสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรและสหกรณ์ (ศูนย์สารสนเทศการเกษตร, 2545) พบว่าในปี พ.ศ. 2544 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกปาล์มทั้งหมดประมาณ 1,457,000 ไร่ และมีผลผลิตเป็นอันดับ 4 ของโลกประมาณ 4,089,000 ตันต่อปี โดยพบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นผงฝุ่นน้ำหนักเบาสามารถฟุ้งกระจายได้ง่าย และมีองค์ประกอบหลักทางเคมีในรูปของ SiO_2 ร้อยละ 30-70 (ชัย, 2553; Tonmayopas, *et al.*, 2006) รวมทั้งโลหะออกไซด์อื่นๆ (MgO , CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O และ P_2O_5 เป็นต้น) ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันจากงานวิจัยเบื้องต้นที่ผ่านมา ซึ่งมีองค์ประกอบของออกไซด์ของซิลิกอนเป็นส่วนใหญ่ และในปัจจุบันได้มีการนำมาใช้เป็นวัสดุเติมแต่งในผลิตภัณฑ์ประเภทคอนกรีต (สุรพันธ์ และคณะ, 2545) แต่อย่างไรก็ตาม ปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นยังมีการนำมาใช้ประโยชน์น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณที่เกิดขึ้นในแต่ละปี โดยปริมาณเถ้าปาล์มที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่มักจะถูกนำไปกำจัดด้วยการฝังกลบหรือทิ้ง ซึ่งส่งผลทำให้เกิดปัญหาในเรื่องการกำจัดตามมาโดยเฉพาะปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมและการจัดการ ดังนั้นจากองค์ประกอบหลักที่เป็นซิลิกอนไดออกไซด์ และออกไซด์ของโลหะต่างๆในเถ้าปาล์มน้ำมัน ซึ่งมีองค์ประกอบเช่นเดียวกับสารตัวเติมประเภทซิลิกา ที่มีความนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมยาง เพราะให้สมบัติที่ดี และเนื่องจากยังไม่มีงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันร่วมกับยางธรรมชาติ มีเพียงการใช้กากน้ำมันปาล์มในส่วนของมิโซคาร์ป (Mesocarp) (อรสา, 2549) และการวิจัยการใช้งานในรูปเส้นใยปาล์มน้ำมัน และผงไม้จากลำต้นปาล์มน้ำมัน (Ismail, 1998; Ismail, 2001) ร่วมกับยางธรรมชาติเท่านั้น เพราะฉะนั้นถ้าหากสามารถนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติเพื่อทดแทน

หรือลดปริมาณในส่วนของซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนตหรือเขม่าดำในทางการค้าได้ ก็จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งทั้งในด้านของเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก เนื่องจากการช่วยประหยัดต้นทุนด้านการผลิตและลดปัญหามลพิษด้านสิ่งแวดล้อม ขณะเดียวกันยังช่วยลดปัญหาการกำจัดของเสียถ้าปาล์มน้ำมันของโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มได้อีกทางหนึ่งแทนการปล่อยทิ้งไว้เป็นของเสียที่ไม่มีคุณค่า

2.วัตถุประสงค์

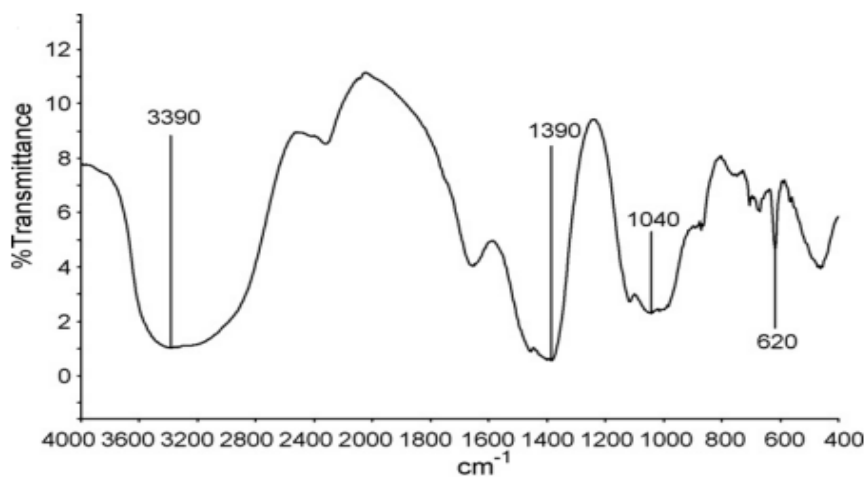
เพื่อศึกษาการใช้ผงถ่านปาล์มน้ำมันเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติและสมบัติของยาง

3.ทฤษฎี แนวคิดในการวิจัย และผลงานที่เกี่ยวข้อง

ถ่านปาล์มน้ำมัน (Palm oil fuel ash) เป็นวัสดุพลอยได้จากการนำกากของผลปาล์มน้ำมัน ได้แก่ เศษกะลา เส้นใย และทะลายปาล์มเปล่าเผาเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อกำเนิดไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า มีอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้ประมาณ $800 - 900^{\circ}\text{C}$ ข้อมูลจากสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรและสหกรณ์ พบว่าในปี พ.ศ. 2544 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกปาล์มประมาณ 1,457,000 ไร่ และมีผลผลิตเป็นอันดับ 4 ของโลกประมาณ 4,089,000 ตันต่อปี ทำให้กากของผลปาล์มมีปริมาณที่สูงตามผลการผลิตปาล์มหรือประมาณ 2,147,000 ตันต่อปี และหลังจากการเผาพบว่าถ่านปาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นมีปริมาณสูงถึง 107,000 ตันต่อปี ถ่านปาล์มน้ำมันมีลักษณะเป็นผงฝุ่นน้ำหนักเบาสามารถฟุ้งกระจายได้ง่าย (ดังแสดงในรูปที่ 3.1) ถ่านปาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นมีการนำมาใช้ประโยชน์น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณที่เกิดขึ้นในแต่ละปี ส่วนใหญ่ต้องนำไปทิ้งทำให้เกิดปัญหาในเรื่องการกำจัดทิ้งและปัญหาทางด้านสถานะแวดล้อมตามมา แต่ถึงอย่างไรก็ตามจากองค์ประกอบทางเคมีของถ่านปาล์มน้ำมัน พบว่ามีองค์ประกอบของ SiO_2 ร้อยละ 40-65 มีปริมาณ SO_3 ต่ำกว่าร้อยละ 5 และปริมาณ LOI (Loss on ignition) ร้อยละ 10 (Kroehong, *et al.*, 2011; Ismail, 2010; Tangchirapat, *et al.*, 2007) เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของถ่านปาล์มน้ำมันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (รูปที่ 3.2) พบว่าประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ในช่วง $1300-1400\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นช่วงของการดูดกลืนของฟีนอล (Phenol) และ แอลกอฮอล์ (Alcohol) และแถบการดูดกลืนของหมู่ไฮดรอกซิลในช่วง 3300 cm^{-1} และที่การดูดกลืนในช่วง $1050-800\text{ cm}^{-1}$ ของหมู่ซิลิกอนออกไซด์



รูปที่ 3.1 กองถ่านปาล์มน้ำมัน



รูปที่ 3.2 การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของเถ้าปาล์มน้ำมัน (Chin, *et al.*, 2009)

ธาตุและสารประกอบที่สำคัญในเถ้าปาล์มน้ำมันนั้น ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบธาตุที่มีในเถ้าปาล์มน้ำมัน

Component	Weight (%)		
	[A]	[B]	[C]
Silicon dioxide (SiO ₂)	54.00	57.71	10.0
Aluminum oxide (Al ₂ O ₃)	0.90	4.56	0.84
Iron oxide (Fe ₂ O ₃)	2.00	3.30	0.29
Calcium oxide (CaO)	12.90	6.55	3.4
Magnesium oxide (MgO)	4.90	4.23	3.0
Sodium oxide (Na ₂ O)	1.00	0.50	0.13
Potassium oxide (K ₂ O)	13.50	8.27	27.0
Sulfur trioxide (SO ₃)	4.00	0.25	1.8
Loss on ignition (LOI)	3.70	10.52	50.3

[A] = (Kroehong, *et al.*, 2011) [B] = (Tangchirapat, *et al.*, 2007) [C] = (Ismail, 2010)

จากองค์ประกอบทางเคมีที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก จึงได้มีการนำผงเถ้าปาล์มน้ำมันมาประยุกต์ใช้เป็นสารตัวเติมในยางต่างๆ ได้แก่ การศึกษาการใช้เถ้าปาล์ม (Palm ash) และ ฮาโลไซด์ (Halloysite nanotubes) เป็นสารตัวเติมในยางอีพียีเอ็ม (Ethylene propylene diene monomer) โดยทำการบดผสมด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง (Two roll mill) พบว่าเมื่อสัดส่วนของผงเถ้าปาล์มเพิ่มขึ้น จะทำให้ระยะเวลาการแปรรูป (Scorch time) เวลาในการวัลคาไนซ์ (Curing time) แรงบิดสูงสุด (Maximum torque) ความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) และ โมดูลัส (Modulus) ลดลง แต่ค่าการยืดจนขาด (Elongation at break) จะเพิ่มขึ้น ส่วนลักษณะพื้นฐานวิทยา พบว่า ฮาโลไซด์จะมีความเข้ากันกับยางได้ดีกว่าเถ้าปาล์มน้ำมัน (Ismail and Shaari, 2010) นอกจากนี้ ยังมีการเตรียมวัสดุคอมโพสิตของยางธรรมชาติโดยใช้เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นสารตัวเติมและใช้ยางธรรมชาติมาลีเอต (Maleated natural rubber; MANR) เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ (Coupling agent) พบว่า เมื่อปริมาณของเถ้าปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาการแปรรูป และ เวลาในการวัลคาไนซ์ของยางลดลง Ismail and Haw (2008) ศึกษาวัสดุคอมโพสิตของยางธรรมชาติ ที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่ปริมาณแตกต่างกันเติมลงในยางธรรมชาติ โดยจะบดผสมด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้งขนาด 160×320 มิลลิเมตร ผลการทดลองพบว่าระยะเวลาการแปรรูป เวลาในการวัลคาไนซ์ และค่าทอร์คสูงสุดของยางลดลงเมื่อปริมาณของเถ้าปาล์มเพิ่มขึ้น ส่วนสมบัติเชิงกล ได้แก่ ค่าโมดูลัส มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของเถ้าปาล์มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความทนต่อแรงดึง และค่าการยืดจนขาดมีค่าลดลงจากการศึกษาพื้นฐานวิทยา พบว่ายางธรรมชาติมาลีเอตจะช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างยางกับเถ้าปาล์มน้ำมันซึ่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางที่เติมเถ้าปาล์มน้ำมันมีสมบัติดีขึ้น Foo and Hameed (2009) ได้ศึกษาลักษณะเฉพาะของเถ้าปาล์มน้ำมันโดยศึกษาถึงธาตุองค์ประกอบของเถ้าปาล์มน้ำมัน พบว่าเถ้าจากส่วนต่างๆ ของปาล์มน้ำมันนั้นจะมีซิลิกาอยู่ประมาณ 30-70 % และเมื่อนำเถ้าปาล์มน้ำมันผสมลงในยางธรรมชาติ พบว่าการเพิ่มปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันจะทำให้เกิดความเข้ากันได้กับยาง และพื้นผิวจะเกิดความขรุขระอย่างชัดเจน

4. วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

4.1.1 สารเคมี

- 4.1.1.1 เถ้าปาล์มน้ำมัน (Palm oil fuel ash, POFA)
- 4.1.1.2 ยางแผ่นผึ่งแห้ง (Air dried sheet, ADS)
- 4.1.1.3 พริซิพิเตทซิลิกา (Silica)
- 4.1.1.4 เขม่าดำ (Carbon black) เกรด N 330
- 4.1.1.5 พริซิพิเตทแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate, CaCO_3)
- 4.1.1.6 กรดสเตียริก (Stearic acid)
- 4.1.1.7 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO)
- 4.1.1.8 วิงสแตย์แอล (Wingstay L)
- 4.1.1.9 เตตระเมทิลไทูรัมโมโนซัลไฟด์ (Tetramethyl tiuram monosulfide, TMTM)

4.1.1.10 กำมะถัน (Sulfur, S)

4.1.1.11 โทลูอีน (Toluene)

4.1.1.12 อะซิโตน (Acetone)

4.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

4.1.2.1 ตะแกรง (Sieve) ขนาด 120, 200 เมช และ 325 เมช

4.1.2.2 เครื่องผสมยางสองลูกกลิ้ง (Two roll mill)

4.1.2.3 เครื่องฟูริเยร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrophotometer, FT-IR)

4.1.2.4 เครื่องวัดพีเอช (pH meter)

4.1.2.5 เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile testing machine)

4.1.2.6 เครื่องทดสอบสมบัติวิคคาไนซ์ของยางแบบคายเคลื่อนที่ (Moving die rheometer, MDR)

4.1.2.7 เครื่องทดสอบการสลายตัวทางความร้อน (Thermal gravimetric analyzer, TGA)

4.1.2.8 เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรมิเตอร์ (X-Ray fluorescence spectrometer, XRF)

4.1.2.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM)

4.1.2.10 เครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness tester)

4.2 การเตรียมผงถ่านปาล์มน้ำมัน

ถ่านปาล์มน้ำมันที่ใช้ตลอดงานวิจัยนี้ เป็นถ่านที่นำมาในครั้งเดียวกันโดยเกิดจากการเผาเส้นใยปาล์ม และ ทลายปาล์มที่อุณหภูมิ 800-900 °C การเตรียมนำถ่านปาล์มน้ำมันเพื่อใช้เป็นสารตัวเติมนั้น ถ่านปาล์มน้ำมันจะถูก นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาร่อนผ่านตะแกรงขนาด 120 เมช 200 เมช และ 325 เมช เพื่อคัดแยกขนาดผงถ่านปาล์มน้ำมันสำหรับใช้เป็นสารตัวเติมต่อไป



รูปที่ 4.1 ผงถ่านปาล์มน้ำมันก่อนและหลังร่อนผ่านตะแกรงคัดแยกขนาด

4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างและองค์ประกอบเก้าปาล์มน้ำมัน

4.3.1 วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของเก้าปาล์มน้ำมันด้วยเครื่อง Fourier transforms infrared spectrophotometer

การทดสอบใช้เทคนิคการอัดแผ่น (KBr-pellet technique) โดยนำเก้าปาล์มน้ำมัน 1 ส่วน บดผสมกับ KBr 10 ส่วน จนกระทั่งเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำไปอัดเป็นแผ่นวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10-20 มิลลิเมตร บันทึกผลด้วยเครื่องรุ่น Omnic ESP Magna-IR 560 Spectrometer, Nicolet ผลิตโดยบริษัท Perkin Elmer Instrument ประเทศสหรัฐอเมริกา ใช้ในการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเก้าปาล์มน้ำมันและสารตัวเติมอื่นๆ ในช่วงเลขคลื่น $4000-400\text{ cm}^{-1}$

4.3.2 การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบในเก้าปาล์มน้ำมันด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence (XRF) Spectrometer

การวิเคราะห์หาองค์ประกอบและปริมาณธาตุในสารตัวอย่างเก้าปาล์มน้ำมัน ทดสอบด้วยเครื่อง X-ray fluorescence spectrometer รุ่น PW2400, Philips ประเทศเนเธอร์แลนด์

4.3.3 การวิเคราะห์พื้นผิว (BET analyzer)

เป็นเครื่อง Surface Area and Porosity Analyzer ยี่ห้อ Coulter รุ่น SA 3100 ใช้สำหรับหาพื้นที่ผิว BET ของสารตัวเติม

4.4 การเตรียมยางคอมพาวนด์

4.4.1 อิทธิพลของปริมาณของเก้าปาล์มน้ำมันต่อสมบัติด้านต่างๆของยางคอมพาวนด์และยางวัลคาไนซ์
เตรียมยางคอมพาวนด์ด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิห้อง อัตราส่วนความเร็วลูกกลิ้งหน้าต่อลูกกลิ้งหลัง เท่ากับ 1:1.21 โดยแปรชนิดของเก้าปาล์มน้ำมัน ที่ปริมาณ 20, 30, 40, 50, 60 และ 70 phr ตามลำดับ สารเคมีที่ใช้ในการผสมเพื่อเตรียมยางคอมพาวนด์ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 จากนั้นนำยางคอมพาวนด์ที่ได้ไปทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่อง Moving die rheometer ที่อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 15 นาที แล้วนำไปขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดเบ้า ที่อุณหภูมิ 160°C ยาง วัลคาไนซ์ที่ได้จะถูกนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล (ความทนต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด ความทนต่อการฉีกขาด ความแข็ง สันฐานวิทยา และสมบัติเชิงความร้อน)

ตารางที่ 4.1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมยางคอมพาวนด์ผสมเถ้าปล้มน้ำมันที่ปริมาณต่างๆ

Chemicals	Quantities (phr)						
NR	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Stearic acid	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Zinc oxide	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
Palm oil fuel ash (POFA)*	0.00	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0
Wingstay L	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
TMTM	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Sulfur	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0

4.4.2 อิทธิพลของขนาดอนุภาคเถ้าปล้มน้ำมันต่อสมบัติด้านต่างๆของยางคอมพาวนด์และยางวัลคาไนซ์เตรียมยางคอมพาวนด์ด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิห้อง อัตราส่วนความเร็วลูกกลิ้งหน้าต่อลูกกลิ้งหลัง เท่ากับ 1:1.21 โดยแปรขนาดอนุภาคของเถ้าปล้มน้ำมันที่ 120, 200 และ 325 เมช สารเคมีที่ใช้ในการผสมเพื่อเตรียมยางคอมพาวนด์ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 จากนั้นนำยางคอมพาวนด์ที่ได้ไปทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่อง Moving die rheometer ที่อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 15 นาที แล้วนำไปขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดเบ้าที่อุณหภูมิ 160°C ยางวัลคาไนซ์ที่ได้จะถูกนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล (ความทนต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด ความทนต่อการฉีกขาด ความแข็ง สัมฐานวิทยา และสมบัติเชิงความร้อน)

ตารางที่ 4.2 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมยางคอมพาวนด์ผสมเถ้าปล้มน้ำมันที่ขนาดอนุภาคต่างๆ

Chemicals	Quantities (phr)
NR	100.0
Stearic acid	1.0
Zinc oxide	5.0
Palm oil fuel ash (POFA) 120, 200 and 325 mesh	30.0
Wingstay L	1.0
TMTM	0.6
Sulfur	2.0

4.4.3 อิทธิพลของชนิดของสารตัวเติมต่อสมบัติด้านต่างๆของยางคอมพาวนด์และยางวัลคาไนซ์

เตรียมยางคอมพาวนด์ด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิห้อง อัตราส่วนความเร็วลูกกลิ้งหน้าต่อลูกกลิ้งหลัง เท่ากับ 1:1.21 โดยแปรชนิดของสารตัวเติม ได้แก่ เชมดำ ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต ที่ปริมาณ 30 phr เปรียบเทียบกับเอ้าปาล์มน้ำมัน ขนาด 325 เมช สารเคมีที่ใช้ในการผสมเพื่อเตรียมยางคอมพาวนด์ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 จากนั้นนำยางคอมพาวนด์ที่ได้ไปทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่อง Moving die rheometer ที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 15 นาที แล้วนำไปขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดบ่า ที่อุณหภูมิ 160°C ยางวัลคาไนซ์ที่ได้จะถูกนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล (ความทนต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด ความทนต่อการฉีกขาด ความแข็ง สันฐานวิทยา และสมบัติเชิงความร้อน)

ตารางที่ 4.3 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมยางคอมพาวนด์ผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ

Chemicals	Quantities (phr)
NR	100.0
Stearic acid	1.0
Zinc oxide	5.0
Various fillers (i.e., POFA, Silica, Carbon black and Calcium carbonate)	30.0
Wingstay L	1.0
TMTM	0.6
Sulfur	2.0

4.4.4 อิทธิพลของชนิดของสารตัวเติมทางการค้าร่วมกับเถ้าปาล์มน้ำมันต่อสมบัติต่างๆของยางคอมพาวนด์และยางวัลคาไนซ์

เตรียมยางคอมพาวนด์ โดยบดผสมด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิห้อง อัตราส่วนความเร็วลูกกลิ้งหน้าต่อลูกกลิ้งหลัง เท่ากับ 1.1:1.25 โดยใช้สารตัวเติมทางการค้า 3 ชนิด ได้แก่ เชม์ดำ ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต ผสมร่วมกับเถ้าปาล์มน้ำมัน ที่ปริมาณ 30 phr โดยสัดส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันต่อสารตัวเติมชนิดต่างๆ เท่ากับ 0:30, 5:25, 15:15, 25:5 และ 30:0 สารเคมีที่ใช้ในการผสมเพื่อเตรียมยางคอมพาวนด์ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 จากนั้นนำยางคอมพาวด์ที่ได้ไปทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่อง Moving die rheometer ที่อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 15 นาที แล้วนำไปขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดเป่า ที่อุณหภูมิ 160 °C ยางวัลคาไนซ์ที่ได้จะถูกนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล (ความทนต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความแข็ง) สันฐานวิทยา และสมบัติเชิงความร้อน

ตารางที่ 4.4 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมยางคอมพาวนด์ผสมสารตัวเติมทางการค้าร่วมกับผงเถ้าปาล์มน้ำมัน

Chemicals	Quantities (phr)
NR	100.0
Stearic acid	1.0
Zinc oxide	5.0
POFA/Fillers: (0:30, 5:25, 15:15, 25:5, 30:0)	30.0
Wingstay L	1.0
TMTM	0.6
Sulfur	2.0

ตารางที่ 4.5 ลำดับการใส่สารเคมีของการเตรียมยางคอมพาวนด์ในงานวิจัย

ลำดับ	เวลา (นาที)	ขั้นตอนการทำ
1	3	บดยางจนพันลูกกลิ้งและมีผิวเรียบสม่ำเสมอ
2	1	เติม ZnO
3	1	เติม Stearic acid
4	6	ใส่สารตัวเติม
5	1	เติม Wingstay L
6	1	เติม TMTM
7	1	เติม Sulfur
8	3	ตัดม้วนยาง 8 ครั้ง แล้วรีดเป็นแผ่นยาง หนาประมาณ 1 มม.

4.5 การทดสอบสมบัติของยาง

4.5.1 การทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์

ทดสอบยางผสมสารเคมีด้วยเครื่อง MD 2000 ที่อุณหภูมิ 160 °C มุมบิด 1° หาค่าผลต่างแรงบิด (Torque difference, $M_H - M_L$) ช่วงเวลาที่สามารถแปรรูปได้ (Scorch time, ts_1) และเวลาในการวัลคาไนซ์ (Cure time, tc_{90}) ตามมาตรฐาน ASTM D 2084 – 81

4.5.2 การศึกษาสมบัติเชิงความร้อน (Thermal analysis)

การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนโดยใช้เครื่อง Thermal gravimetric analyzer, TGA รุ่น STA 500 โดยการนำชิ้นตัวอย่างที่มีน้ำหนัก 5 มิลลิกรัม โดยทดสอบสภาวะก๊าซไนโตรเจน ที่มีอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 20 ml/min ทดสอบที่อุณหภูมิในช่วง 30-800°C ใช้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ 10°C/min รายงานผลเป็นค่าอุณหภูมิการสลายตัวและเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักการสลายตัวของชิ้นตัวอย่าง

4.5.3 การหาค่าความทนต่อแรงดึง (Tensile strength)

ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 412 โดยนำแผ่นยางวัลคาไนเซทมาตัดเป็นชิ้นทดสอบแบบ Dumb-bell (Die C) Type 1 ความยาว 115 mm กว้าง 6 ± 0.4 mmหนา 2 ± 0.2 mm ตามทิศของแนวเกรน (Grain) แล้วนำมาดึงด้วยเครื่องทดสอบความทนต่อแรงดึง (Tensile testing machine) โดยนำยางรูป Dumb-bell มาใส่ระหว่างที่จับของเครื่อง Tensometer ต้องให้ตัวอย่างอยู่กึ่งกลางที่จับเพื่อให้แรงกระจายตัวบนตัวอย่างอย่างสม่ำเสมอ โดยอัตราของความเร็วในการดึง 500 mm/min การคำนวณจะคำนวณโดยใช้แรงในการดึงชิ้นทดสอบหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของยางก่อนทำการดึงยึด ดังสมการที่ 4.1

$$\text{Tensile strength (N/mm}^2 \text{ or MPa)} = \frac{F}{A} \quad (4.1)$$

โดยที่ F = แรงที่ใช้ในการดึงจนชิ้นทดสอบจนขาด (N)

A = พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของยางขณะที่ไม่ได้ยึด (mm^2)

4.5.4 โมดูลัส (Modulus)

โมดูลัสคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อความเครียดในช่วงที่มีค่าความเครียด 100%

$$\text{โมดูลัสที่ระยะยืด 100\%} = \frac{F_m}{A} \quad (4.2)$$

โดยที่ F_m = แรงดึงที่ทำให้ยางยืดออกกระยะ 100% (N)

A = พื้นที่หน้าตัดของยางที่ไม่ได้ยืด (mm^2)

4.5.5 ความสามารถในการยืดจนขาด (Elongation at break)

เป็นการทดสอบระยะการยืดของยางจนขาด โดยเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ตัววัดจากจุดเริ่มต้น 20 มิลลิเมตร โดยการทดสอบทำเช่นเดียวกับการทดสอบความทนต่อแรงดึง แต่จะทำการวัดระยะยืดแทนการวัดค่าแรง โดยจะคำนวณตามสมการ 4.3

$$\text{Elongation at break (\%)} = \left[\frac{(L - L_0)}{L_0} \right] \times 100 \quad (4.3)$$

โดยที่ L = ระยะห่างระหว่างเส้นที่ขีดบนชิ้นทดสอบเมื่อยืดจนขาด (mm)

L_0 = ระยะห่างระหว่างเส้นที่ขีดบนชิ้นทดสอบก่อนยืด (mm)

4.5.6 ความทนต่อการฉีกขาด (Tear strength)

การทดสอบการฉีกขาดจะใช้ตัวอย่างแบบมุม ตามมาตรฐาน ASTM D642 โดยมุมมีขนาด 90° ความยาวชิ้นทดสอบ 100 มิลลิเมตร การทดสอบเป็นการวัดแรงที่ทำให้ยางฉีกขาดสมบูรณ์ การทดสอบการฉีกขาดใช้วิธีการทดสอบเช่นเดียวกับการทดสอบ Tensile strength ด้วยเครื่อง Tensometer แตกต่างกันไปเพียงรูปร่างชิ้นทดสอบ มีสูตรการคำนวณดังสมการที่ 4.4

$$\text{คำนวณความทนต่อการฉีกขาด (Tear resistance)} = F/d \quad (4.4)$$

โดยที่ F = แรงดึงจนขาด (N)

D = ความหนาของชิ้นทดสอบ (mm)

4.5.7 ความแข็ง (Hardness)

นำตัวอย่างยางที่มีความหนาประมาณ 6 ถึง 8 มิลลิเมตร มาวัดความแข็ง โดยกดหัวอ่านของเครื่องวัดความแข็งแบบ Durometer type A ลงบนตัวอย่างยาง ให้หัวกดมีระยะจากขอบของตัวอย่างยางประมาณ 8 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM D 2240

4.5.8 สัณฐานวิทยา (Morphology)

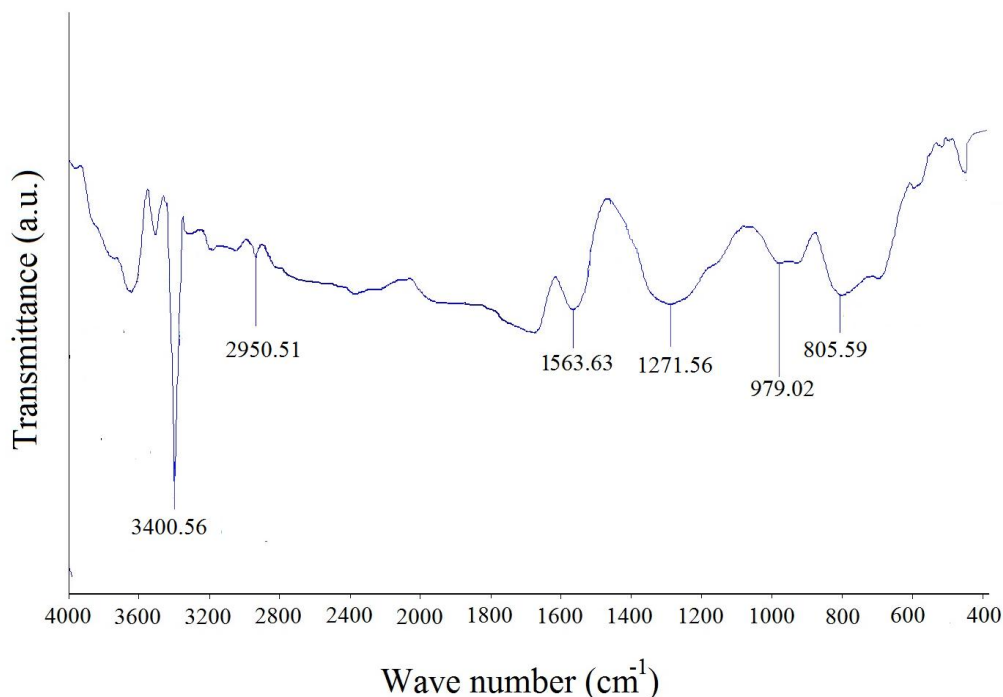
นำชิ้นตัวอย่างยางจุ่มลงในไนโตรเจนเหลวแล้วหักชิ้นทดสอบเพื่อให้เกิดผิวหน้า นำตัวอย่างไปเคลือบด้วยทองด้วยเครื่อง Sputter coater แล้วจึงนำไปทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 200, 350 และ 1000 เท่า เพื่อศึกษาการกระจายตัวและการยึดติดของสารตัวเติมในยางวัลคาไนซ์

5. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 โครงสร้าง องค์ประกอบและสมบัติของเถ้าปาล์มน้ำมัน

5.1.1 โครงสร้างทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน

ในการทดลองใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้มาอบที่อุณหภูมิ 110°C แล้วนำเถ้าปาล์มที่เตรียมได้มาบดผสมกับ โพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) จากนั้นอัดเป็นเม็ด และนำไปทดสอบด้วย FT-IR โดยใช้ช่วงรังสีอินฟราเรดที่ $4000 - 400\text{ cm}^{-1}$ ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของเถ้าปาล์มน้ำมัน

จากรูปที่ 5.1 พบว่า เถ้าปาล์มน้ำมันประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันต่างๆ จากการปรากฏพีกที่ตำแหน่งเลขคลื่น ประมาณ 3623.00 และ 3400.56 cm^{-1} ซึ่งเป็นแถบการดูดกลืนของหมู่-OH ที่มีพันธะไฮโดรเจนและหมู่-OH ของซิลานอล (Si-OH) ตามลำดับ ส่วนที่เลขคลื่น 1271.56 cm^{-1} และ 979.02 cm^{-1} เป็นแถบดูดกลืนของหมู่ไซลอกเซนของพันธะ Si-O-Si นอกจากนี้ยังพบที่ตำแหน่งเลขคลื่น 805.59 cm^{-1} แสดงพีกการดูดกลืนของ Al-O (Chindaprasirt, *et al.*, 2008)

5.1.2 ธาตุองค์ประกอบทางเคมีในเถ้าปาล์มน้ำมัน

ตารางที่ 5.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้ทดลองงานวิจัยนี้ พบว่า เถ้าปาล์มน้ำมันมีซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) หรือซิลิกา เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับร้อยละ 46.81 ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเถ้าปาล์มน้ำมัน (รูปที่ 5.1) นอกจากนี้ยังมีองค์ประกอบของออกไซด์ต่างๆ ในปริมาณที่ลดหลั่นลงไป

ตามลำดับ ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) โพแทสเซียมออกไซด์ (K₂O) ฟอสฟอรัส เพนตะออกไซด์ (P₂O₅) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และ เหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) เป็นต้น

ตารางที่ 5.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน

Compound formula	Concentration (%)
SiO ₂	46.815
CaO	23.233
K ₂ O	10.837
P ₂ O ₅	7.150
MgO	3.259
Fe ₂ O ₃	3.255
SO ₃	2.318
Cl	1.675
Al ₂ O ₃	0.653
MnO	0.423
CuO	0.152
SrO	0.121
Rb ₂ O	0.108

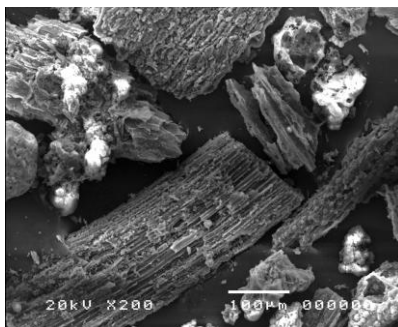
5.1.3 การวิเคราะห์พื้นผิว (BET analyzer)

ตารางที่ 5.2 แสดงพื้นที่ผิวจำเพาะ พบว่า เมื่อเถ้าปาล์มมีขนาดอนุภาคเล็กลงส่งผลให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงขึ้น ส่วนค่าความถ่วงจำเพาะ พบว่า เถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.97 เมื่อนำเถ้าปาล์มมาบดให้ละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 120, 200 และ 325 เมช พบว่าเถ้าปาล์มที่ได้มีค่าความถ่วงจำเพาะสูงขึ้นเท่ากับ 1.99, 2.03 และ 2.14 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากการบดให้มีขนาดอนุภาคเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีขนาดเล็กลงจะส่งผลให้มีรูพรุนแตกออกจึงมีรูพรุนน้อยลง ทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้น

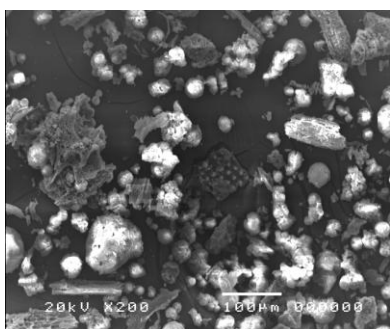
ตารางที่ 5.2 พื้นที่ผิวและความถ่วงจำเพาะของเถ้าปาล์มน้ำมัน

ลักษณะตัวอย่าง	Specific Surface Area, (m ² /g)	Specific gravity
เถ้าปาล์มน้ำมัน	60.1	1.97
เถ้าปาล์มน้ำมันที่ 120 mesh	63.3	1.99
เถ้าปาล์มน้ำมันที่ 200 mesh	90.4	2.03
เถ้าปาล์มน้ำมันที่ 325 mesh	153.3	2.14

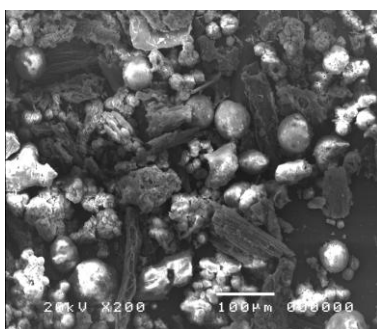
5.1.4 สัณฐานวิทยา



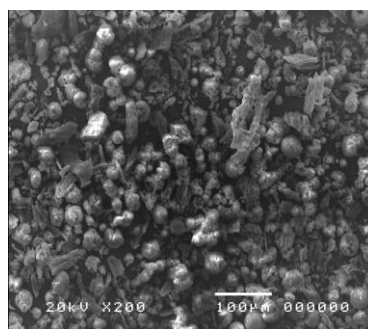
เถาปลาล์มน้ำมันก่อนผ่านตะแกรง



120 เมช



200 เมช



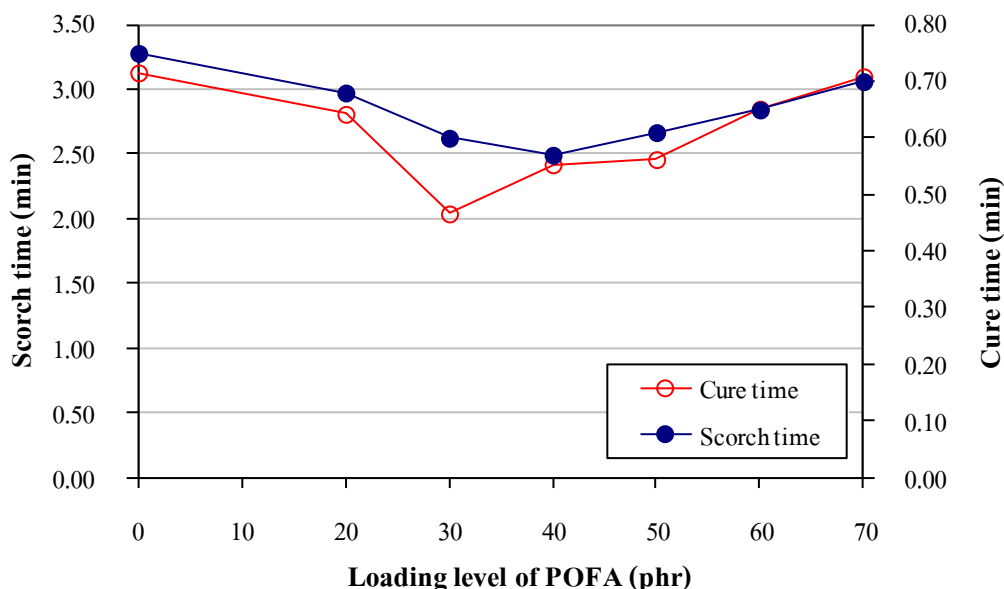
325 เมช

รูปที่ 5.2 สัณฐานวิทยาของเถาปลาล์มน้ำมัน (กำลังขยาย 200 เท่า)

รูปที่ 5.2 แสดงสัณฐานวิทยาของเถาปลาล์มน้ำมัน พบว่า เถาปลาล์มน้ำมันมีรูปร่างอนุภาคที่แตกต่างกัน ซึ่งมีทั้งที่เป็นรูปร่างทรงกลมตันและเป็นแท่งที่มีความพรุนสูง และเมื่อนำมาร่อนผ่านตะแกรงที่ขนาด 120, 200 และ 325 เมช ส่งผลให้ได้อนุภาคเถาปลาล์มน้ำมันที่สม่ำเสมอและมีขนาดเล็กลงตามลำดับ

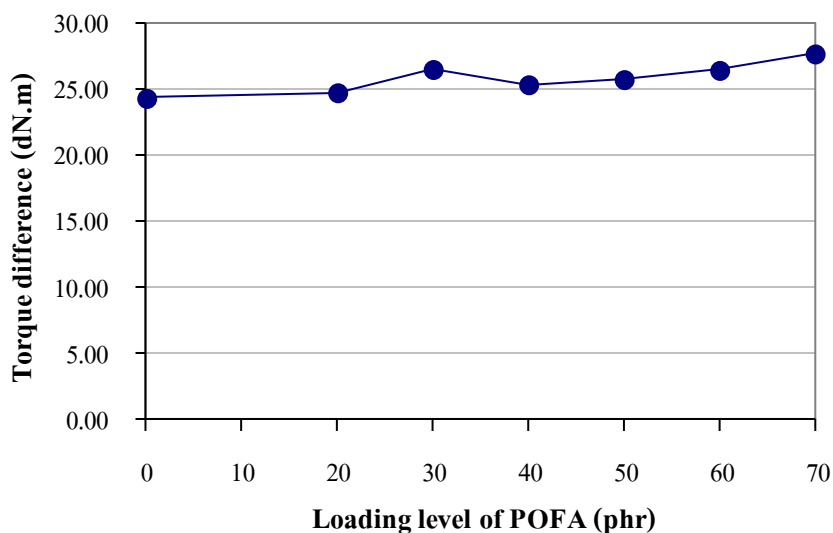
5.2 อิทธิพลของปริมาณของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อสมบัติด้านต่างๆของยางคอมพาวนด์และยางวัลคาไนซ์

5.2.1 อิทธิพลของปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันต่อสมบัติการวัลคาไนซ์



รูปที่ 5.3 เวลาสกorchและเวลาวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 160°C ของยางธรรมชาติผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่ปริมาณต่างๆ

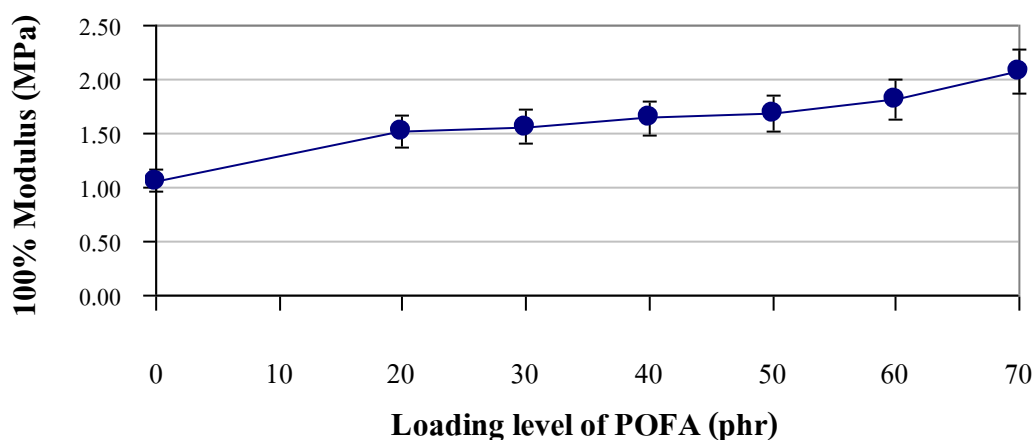
จากสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางที่ใช้ปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันต่างๆต่อเวลาการสกorchและเวลาการวัลคาไนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 5.3 พบว่าการเพิ่มปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันจนถึง 40 phr ในยางธรรมชาติส่งผลให้เวลาสกorchและเวลาวัลคาไนซ์ลดลง เนื่องจากภาวะความเป็นด่างของเถ้าปาล์มน้ำมัน ซึ่งมีค่า pH ประมาณ 9.8 ประกอบกับโลหะออกไซด์ต่างๆที่เป็นองค์ประกอบ ทำให้ช่วยเร่งปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ให้เกิดได้เร็วขึ้น แต่จะพบว่าการเพิ่มปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันในช่วง 50 – 70 phr ส่งผลให้เวลาสกorchและเวลาวัลคาไนซ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากสารตัวเร่งถูกดูดซับจากหมู่ไฮดรอกซิลบนผิวเถ้าปาล์มน้ำมันได้มากขึ้นตามปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันที่เพิ่มขึ้น ทำให้มีสารตัวเร่งเพียงบางส่วนที่สามารถเข้าไปช่วยในปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เซชันระหว่างยางและสารวัลคาไนซ์ ส่งผลให้ปฏิกิริยาในการคงรูปเกิดได้ช้าลง ระยะเวลาสกorchและระยะเวลาวัลคาไนซ์จึงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังอาจเป็นไปได้ว่าการใช้ปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันที่สูงขึ้น จะทำให้การก่อตัวของสารตัวเติมเป็นแบบ coherent gel กล่าวคือ อนุภาคของสารตัวเติมอยู่ใกล้กันมาก ทำให้มีโอกาสเกิดการเชื่อมกันระหว่างแอกกรีเกต (aggregate) จนล้อยางบางส่วนไว้อย่างมาก ทำให้แสดงพฤติกรรมคล้ายกับป้องกันยางที่จะไปเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ขึ้นได้



รูปที่ 5.4 ผลต่างแรงบิดของยางธรรมชาติผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่ปริมาณต่างๆ

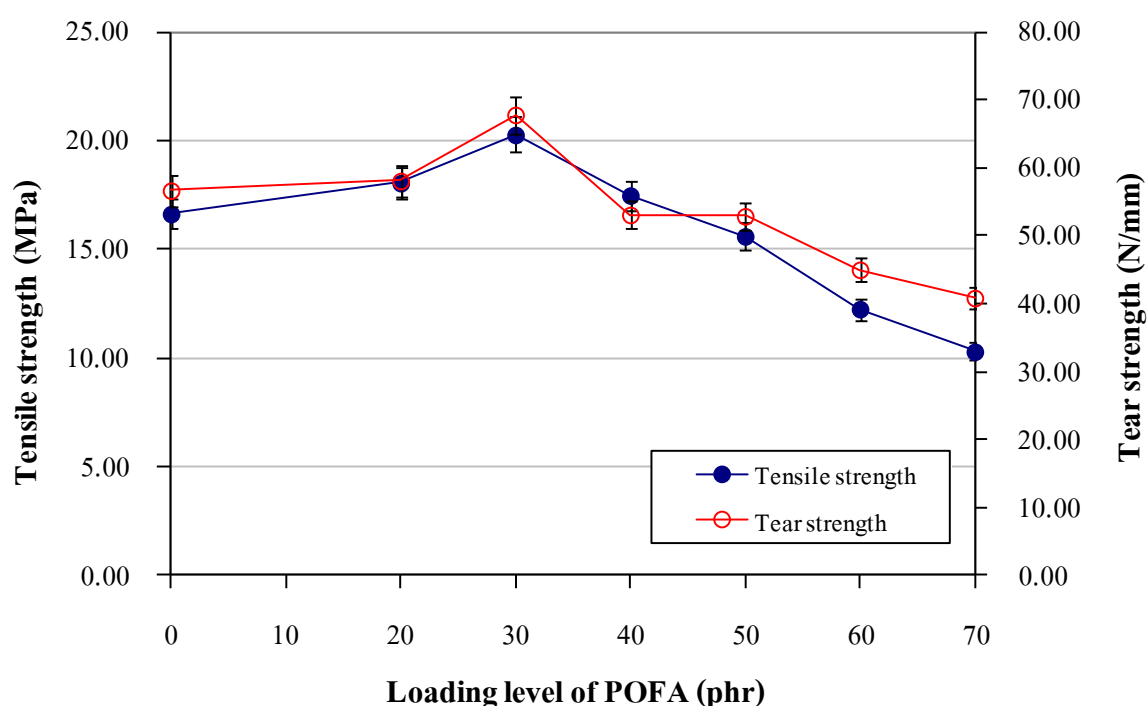
จากรูปที่ 5.4 แสดงอิทธิพลของปริมาณสารตัวเติมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีต่อผลต่างแรงบิดของยางคอมพาวนด์ พบว่าปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อผลต่างแรงบิดซึ่งสัมพันธ์กับความหนาแน่นพันธะเชื่อมโยงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะการเติมเถ้าปาล์มน้ำมันซึ่งมีความแข็งแรงลงในยางธรรมชาติจึงทำให้สมบัติความแข็งแรงโดยรวมเพิ่มขึ้น และอิทธิพลของสารประกอบอนินทรีย์ โดยเฉพาะโลหะออกไซด์ ที่มีผลในการช่วยเร่งปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์และทำให้ได้ปริมาณพันธะเชื่อมโยงสูงขึ้น นอกจากนี้หมู่ไฮดรอกซิลที่มีอยู่บนผิวอนุภาคเถ้าปาล์มน้ำมัน ทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างเถ้าปาล์มน้ำมันด้วยตัวเอง จึงส่งผลให้มีค่าความหนาแน่นพันธะเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าปาล์มที่เพิ่มขึ้น

5.2.2 อิทธิพลของปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันต่อสมบัติเชิงกล



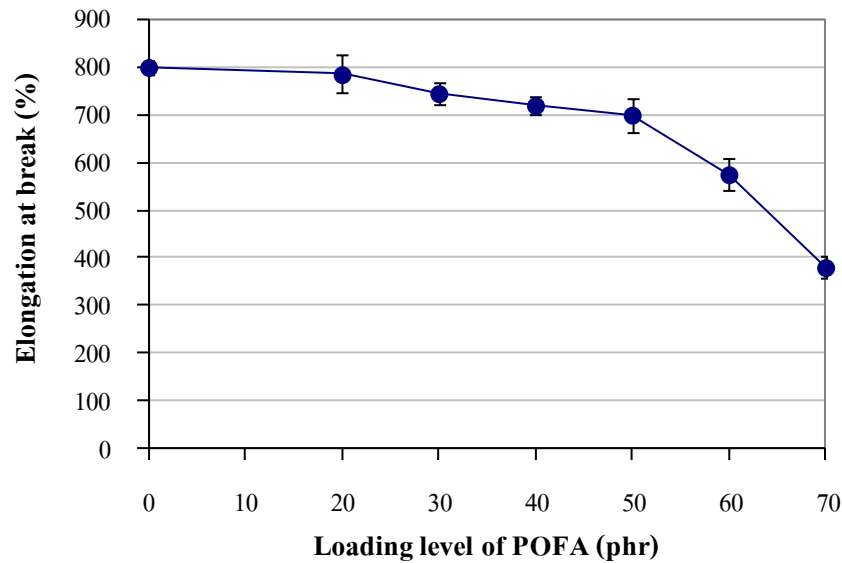
รูปที่ 5.5 ค่ามอดูลัส ณ การยืดตัว 100 เปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่ปริมาณต่างๆ

ค่ามอดูลัส ณ การยืดตัว 100 เปอร์เซ็นต์ของยางวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันต่างๆ แสดงในรูปที่ 5.5 พบว่า ค่ามอดูลัสของยางธรรมชาติที่เติมเถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ เนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นสารตัวเติมที่มีความแข็งแรงและมีองค์ประกอบหลักทางเคมีเป็นซิลิกา ส่งผลให้ยางมีความแข็งแรง และการเกิดอันตรกิริยา (เช่น แรงวัลเดอรัวาลและพันธะไฮโดรเจน) ระหว่างผิวอนุภาคเถ้าปาล์มน้ำมันกับยาง ทำให้เกิดการยึดติดระหว่างเฟสดี ดังนั้นจะเห็นได้ว่าแรงที่ใช้ในการดึงเพื่อให้ยางเกิดการยืดที่ระยะ 100% จึงสูงขึ้นด้วย ส่งผลให้ค่ามอดูลัสที่ได้เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลต่างแรงบิดข้างต้น

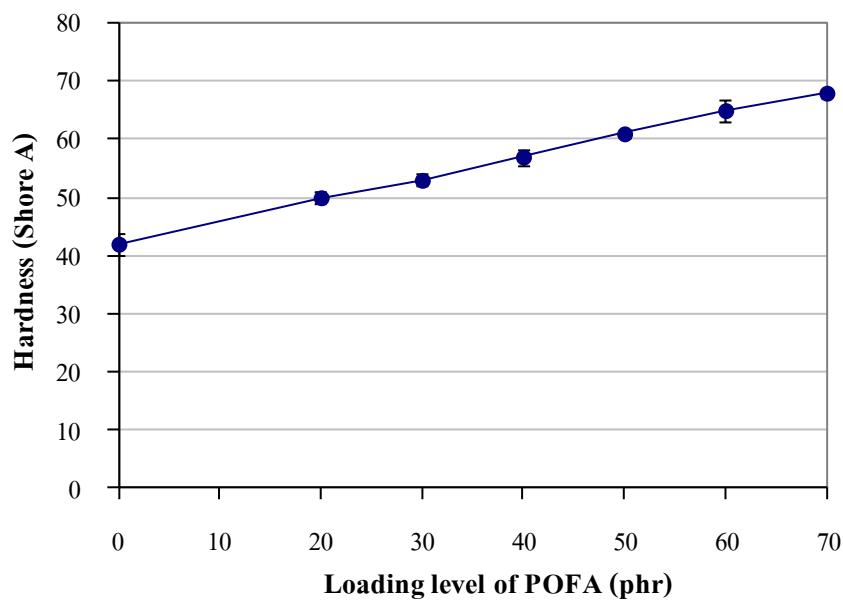


รูปที่ 5.6 ความทนต่อแรงดึงและความทนต่อการฉีกขาดของยางธรรมชาติผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่ปริมาณต่างๆ

รูปที่ 5.6 แสดงผลของปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีต่อความทนต่อแรงดึงและความทนต่อการฉีกขาด พบว่ายางธรรมชาติที่เติมเถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าความทนต่อแรงดึงและความทนต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งที่ปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมัน 30 phr หลังจากนั้นค่าความทนต่อแรงดึงและความทนต่อการฉีกขาดมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้นทำให้อนุภาคของสารตัวเติมอยู่ใกล้ชิดกันมากจนทำให้อันตรกิริยาระหว่างยางและสารตัวเติมลดลง (เอกชัย และคณะ, 2549) ส่งผลให้ความแข็งแรงของยางลดลง



รูปที่ 5.7 ความสามารถในการยืดตัวของยางธรรมชาติผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่ปริมาณต่างๆ

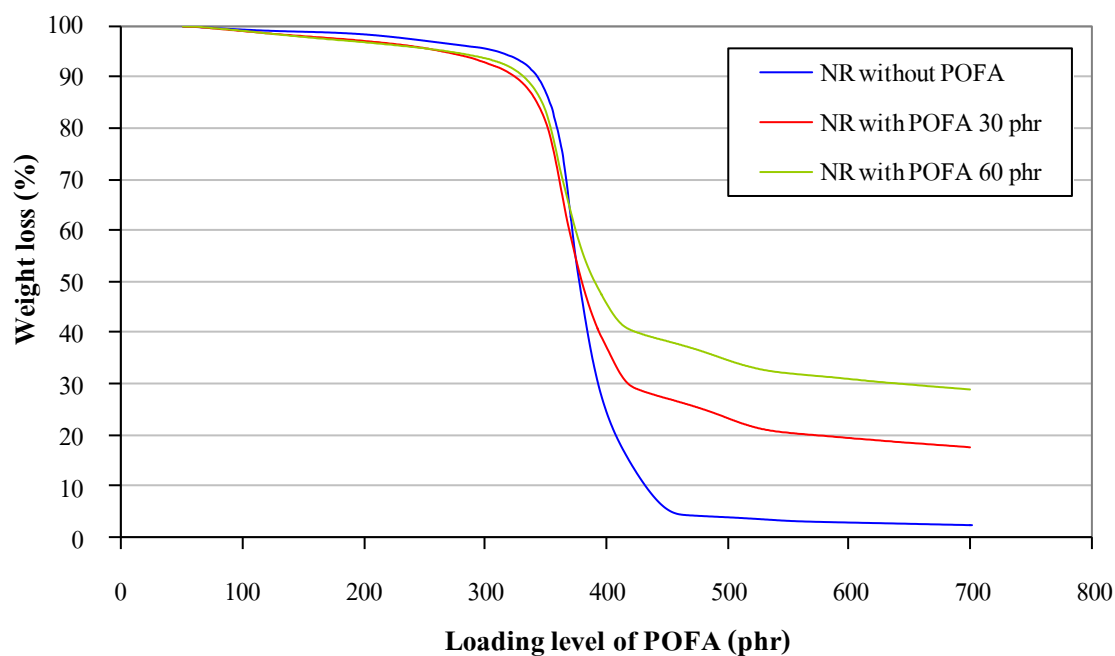


รูปที่ 5.8 ความแข็งของยางธรรมชาติผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่ปริมาณต่างๆ

รูปที่ 5.7 แสดงผลของปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีต่อเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด พบว่ายางธรรมชาติที่เติมเถ้าปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการยืดตัวของยาง ณ จุดขาดลดลง เนื่องจากการใส่สารตัวเติมที่มากขึ้นในยางทำให้ยางมีโมดูลัสหรือความแข็งตึง (stiffness) จากการดึงยืดของยางที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการลดความยืดหยุ่นของยาง รูปที่ 5.8 แสดงความแข็งของยางธรรมชาติที่มีปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันต่างๆ พบว่า ความแข็งเพิ่ม

ขึ้นตามปริมาณเถ้าปลั่มน้ำมันที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเถ้าปลั่มน้ำมันเป็นของแข็ง เมื่อใส่ลงไปยางจึงทำให้ความแข็งของยางเพิ่มขึ้น

5.2.3 อิทธิพลของปริมาณเถ้าปลั่มน้ำมันต่อสมบัติเชิงความร้อน



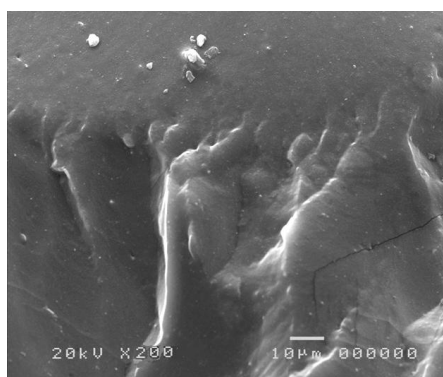
รูปที่ 5.9 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่ออุณหภูมิของยางธรรมชาติผสมเถ้าปลั่มน้ำมันที่ปริมาณต่างๆ

ตารางที่ 5.3 อุณหภูมิสลายตัวที่ตำแหน่ง Onset และ Midpoint ของยางธรรมชาติที่มีปริมาณเถ้าปลั่มน้ำมัน 0, 30 และ 60 phr

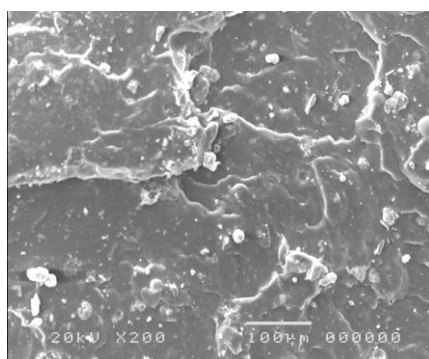
Type of samples	Temperature (°C)	
	Onset (T_{onset})	Mid-point ($T_{mid-point}$)
NR without filler	324.0	376.3
NR with POFA 30 phr	352.1	393.2
NR with POFA 60 phr	371.5	402.7

จากรูปที่ 5.9 และตารางที่ 5.3 แสดงอุณหภูมิการสลายตัวของยางธรรมชาติที่มีปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมัน 0, 30 และ 60 phr พบว่า อุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้น (onset temperature, T_{onset}) และอุณหภูมิที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักมากที่สุด (midpoint temperature, $T_{\text{mid-point}}$) ของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันที่เพิ่มขึ้น โดยยางธรรมชาติที่ไม่ใส่เถ้าปาล์มน้ำมันมีค่า T_{onset} และ $T_{\text{mid-point}}$ เท่ากับ 324.0 °C และ 376.3 °C ตามลำดับ ขณะที่ยางธรรมชาติที่ใส่เถ้าปาล์มน้ำมันที่ 30 และ 60 phr มีค่า T_{onset} และ $T_{\text{mid-point}}$ เท่ากับ 352.1 °C กับ 371.5 °C และ 393.2 °C กับ 402.7 °C ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของสมบัติด้านความเสถียรทางความร้อนของยาง เนื่องจากการผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน ที่เป็นเช่นนี้เพราะเถ้าปาล์มน้ำมันมีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกาซึ่งเป็นสารประกอบที่มีความเสถียรต่อความร้อนสูงและสูงมากกว่ายางธรรมชาติ ทำให้อุณหภูมิการสลายของยางที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันสูงกว่ายางที่ไม่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน และมีค่าอุณหภูมิการสลายตัวของยางเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าปาล์มที่เพิ่มขึ้น

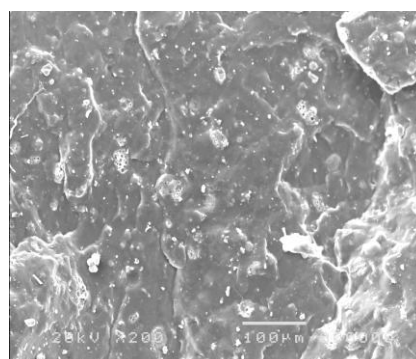
5.2.4 อิทธิพลของปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันต่อสัณฐานวิทยา



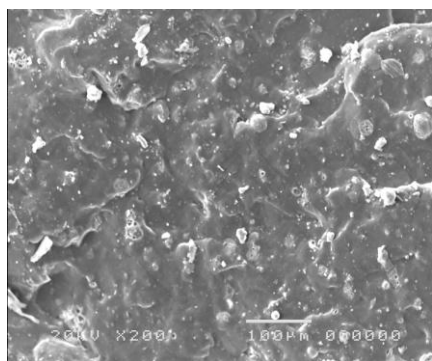
0 phr



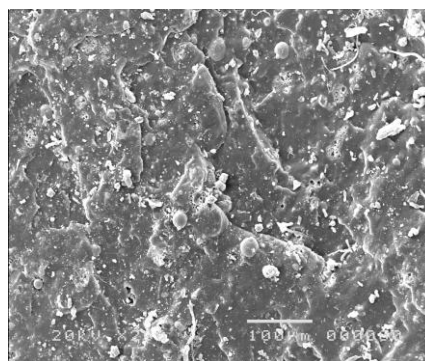
20 phr



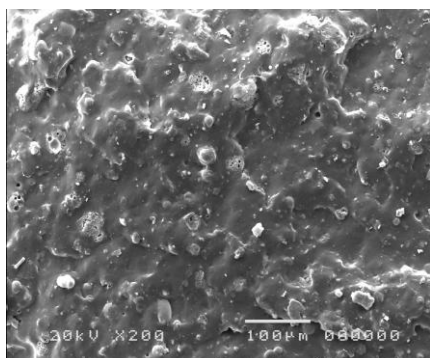
30 phr



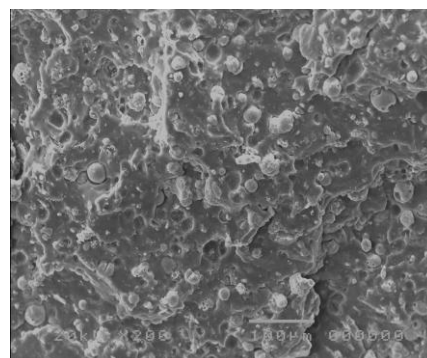
40 phr



50 phr



60 phr



70 phr

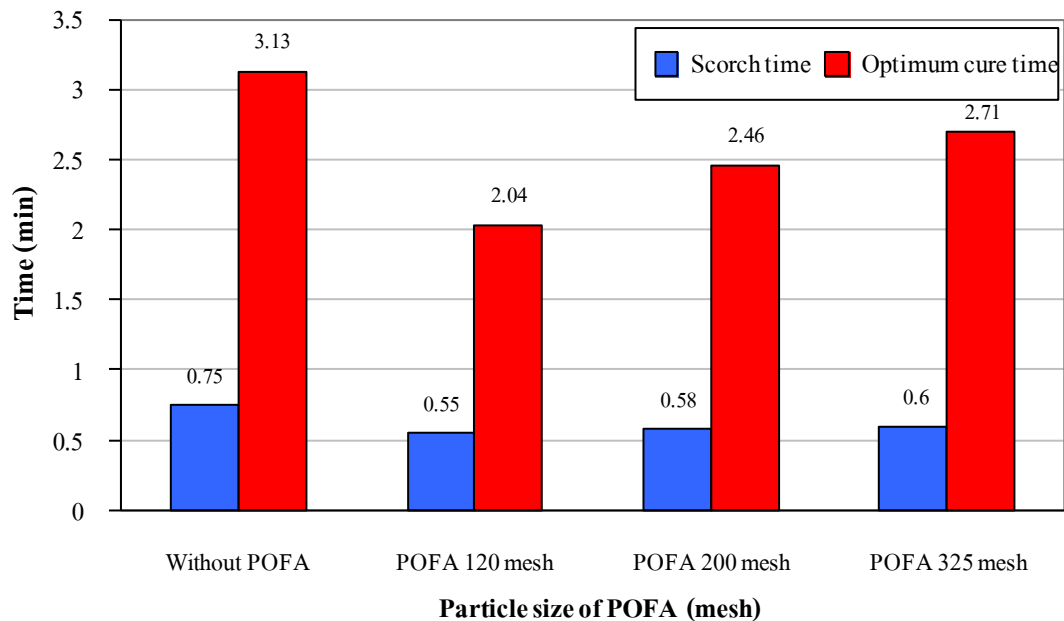
รูปที่ 5.10 สัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่ปริมาณต่างๆ (กำลังขยาย 200 เท่า)

สัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติที่มีปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันต่างๆ แสดงในรูปที่ 5.10 พบว่า การเพิ่มปริมาณเถ้าปาล์มมากขึ้น ส่งผลให้มีปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันกระจายตัวในยางมากขึ้น ซึ่งการกระจายตัวของเถ้าปาล์มน้ำมันจะเห็นได้ชัดเจนมากขึ้นตามปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันที่เพิ่มขึ้นทำให้อนุภาคอยู่ใกล้กันและเกิดการรวมกลุ่มได้ ดังจะเห็นได้ว่าสัณฐานวิทยาของเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีปริมาณสูงมีการกระจายของกลุ่มสารตัวเติมใหญ่ขึ้น

จากผลของสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่ใส่เถ้าปาล์มน้ำมันข้างต้น จึงได้ทำการเลือกปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันที่ 30 phr ซึ่งเป็นปริมาณที่ให้สมบัติเชิงกลโดยรวมของยางธรรมชาติดีที่สุด (ความทนต่อการดึง และความทนต่อการฉีกขาด) เพื่อนำไปศึกษาขนาดอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันและการนำไปเสริมแรงร่วมกับสารตัวเติมทางการค้า ได้แก่ ฟริชพิเทตซิลิกา เขม่าดำ เกรด N330 และฟริชพิเทตแคลเซียมคาร์บอเนตต่อไป

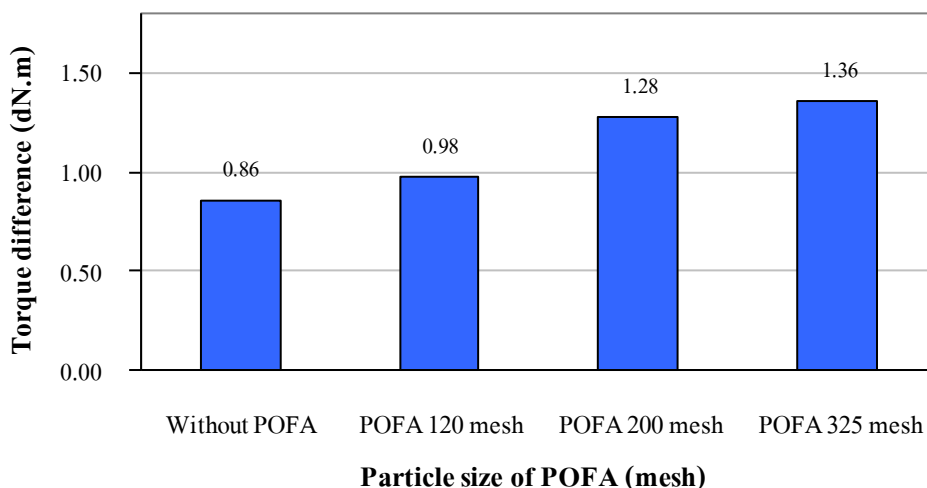
5.3 อิทธิพลของขนาดอนุภาคเถ้าปาล์มน้ำมันต่อสมบัติด้านต่างๆของยางคอมพาวนด์และยางวัลคาไนซ์

5.3.1 อิทธิพลของขนาดอนุภาคเถ้าปาล์มน้ำมันต่อสมบัติการวัลคาไนซ์



รูปที่ 5.11 เวลาสกอกซ์และเวลาวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 160°C ของยางธรรมชาติผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่ขนาดอนุภาคต่างๆ

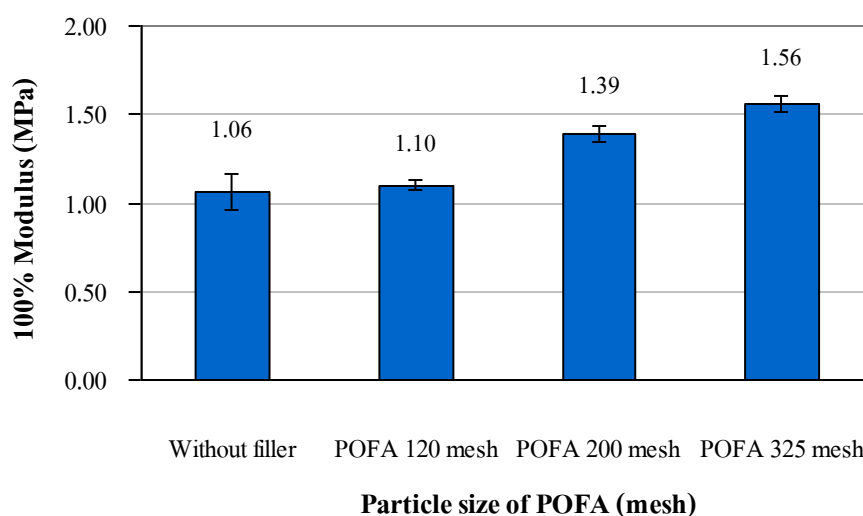
รูปที่ 5.11 แสดงเวลาสกอกซ์และเวลาวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันขนาดอนุภาค 120, 200 และ 325 เมช พบว่า ยางธรรมชาติที่เติมเถ้าปาล์มน้ำมันที่ขนาดอนุภาคใดๆส่งผลให้เวลาสกอกซ์และเวลาวัลคาไนซ์ของยางสั้นกว่ายางธรรมชาติที่ไม่มีเถ้าปาล์มน้ำมัน เนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันมีฤทธิ์เป็นด่างและโลหะออกไซด์ซึ่งจะช่วยเร่งให้ปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ให้เกิดได้เร็วขึ้น ทำให้เวลาสกอกซ์และเวลาวัลคาไนซ์ของยางที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันน้อยกว่ายางที่ไม่มีเถ้าปาล์มน้ำมัน เมื่อเปรียบเทียบยางธรรมชาติที่มีเถ้าปาล์มน้ำมันที่ขนาดอนุภาคต่างๆ คือ 120, 200 และ 325 เมช พบว่า ยางธรรมชาติที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด คือ 120 เมช ให้เวลาสกอกซ์และเวลาวัลคาไนซ์ของยางสั้นที่สุด รองลงมาคือยางที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่ขนาดอนุภาค 200 และ 325 เมช ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันขนาด 120 เมช มีขนาดอนุภาคใหญ่ ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำกว่า ทำให้การดูดซับสารตัวเร่งจากหมู่ไฮดรอกซิลบนผิวอนุภาคปาล์มน้ำมันน้อยกว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีขนาดอนุภาคเล็ก (เช่น 200 และ 325 เมช) จึงทำให้สารกระตุ้นซึ่งก่อออกไซด์ทำปฏิกิริยากับสารตัวเร่งหรือสารตัวเร่งที่มีกัมมันต์เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ($\text{AccS}_x\text{ZnS}_x\text{Acc}$) ซึ่งรบกวนต่อการทำปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ขึ้นได้มากกว่า ส่งผลให้ปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ขึ้นเกิดได้ง่ายและเร็วกว่า ดังนั้นเวลาสกอกซ์และเวลาวัลคาไนซ์ของยางที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันขนาดอนุภาค 120 เมช จึงน้อยกว่าการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่มีขนาดอนุภาค 200 และ 325 เมช ตามลำดับ



รูปที่ 5.12 ผลต่างแรงบิดของยางธรรมชาติผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่ขนาดอนุภาคต่างๆ

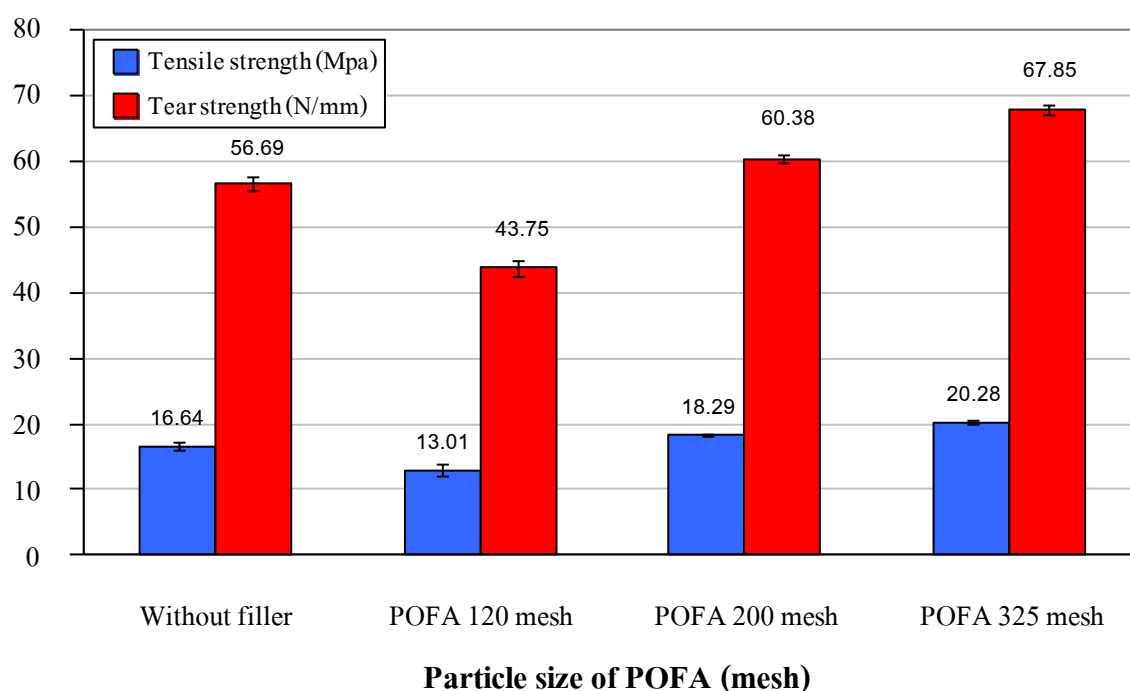
รูปที่ 5.12 แสดงผลต่างแรงบิดของยางธรรมชาติที่มีขนาดอนุภาคเถ้าปาล์ม 120, 200 และ 325 เมช พบว่ายางธรรมชาติที่เติมเถ้าปาล์มน้ำมันที่ขนาดอนุภาคใดๆส่งผลให้ผลต่างแรงบิดของยางสูงกว่ายางธรรมชาติที่ไม่มีเถ้าปาล์ม เนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันมีองค์ประกอบของโลหะออกไซด์ (เช่น MgO , CaO , Fe_2O_3 เป็นต้น) ซึ่งช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาวัลคาไนซ์และทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาระหว่างขนาดอนุภาคเถ้าปาล์ม พบว่าค่าผลต่างแรงบิดของยางธรรมชาติที่เติมเถ้าปาล์มน้ำมันขนาดอนุภาค 325 เมช สูงกว่าการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่ 200 และ 120 เมช ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเติมเถ้าปาล์มน้ำมันขนาดอนุภาคเล็กจะสามารถกระจายตัวในยางได้ดี ทำให้เกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันได้ดีเช่นกัน รวมทั้งการมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับอนุภาคสารตัวเติมได้มาก จึงส่งผลให้ผลต่างแรงบิดสูง

5.3.2 อิทธิพลของขนาดอนุเถ้าปาล์มน้ำมันต่อสมบัติเชิงกล



รูปที่ 5.13 ค่ามอดูลัส ณ การยืดตัว 100 เปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่ขนาดอนุภาคต่างๆ

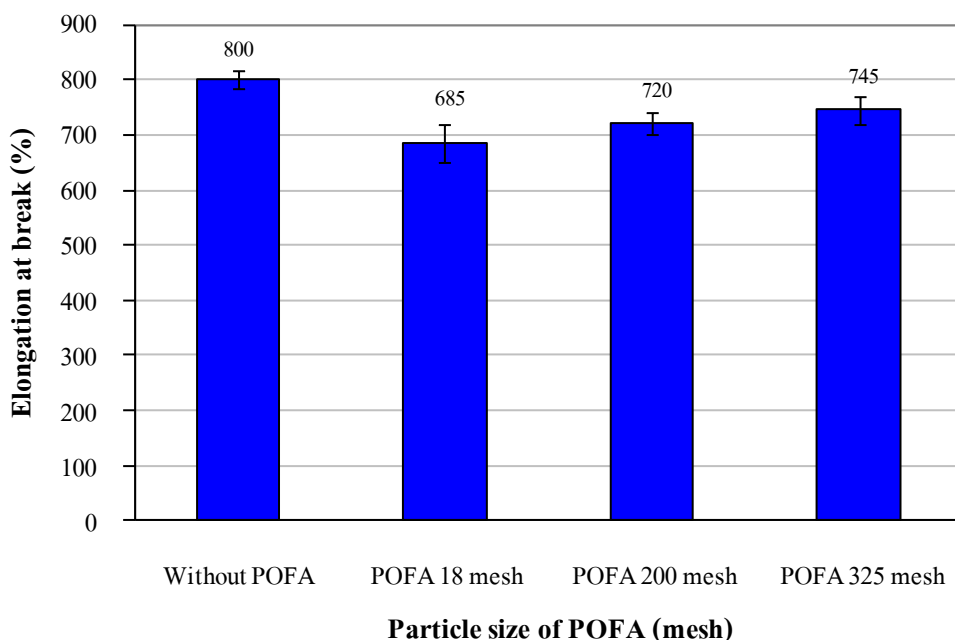
ค่ามอดูลัส ณ การยืดตัว 100 เปอร์เซ็นต์ของยางวัลคาไนซ์ที่มีขนาดอนุภาคต่างๆ แสดงในรูปที่ 5.13 พบว่าค่ามอดูลัสของยางธรรมชาติที่เติมถั่วปาล์มน้ำมันมีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติที่ไม่เติมถั่วปาล์มน้ำมัน ทั้งนี้เนื่องจากการเติมถั่วปาล์มน้ำมันส่งผลให้ยางมีความแข็งตึงซึ่งเป็นผลมาจากความแข็งของสารตัวเติม การเกิดอันตรกิริยาและการยึดติดระหว่างเฟสยางกับอนุภาคสารตัวเติม ทำให้ต้องใช้แรงในการดึงเพื่อให้ยางผิดรูปสูงขึ้นด้วย ส่งผลให้ค่ามอดูลัส ณ การยืดตัว 100 เปอร์เซ็นต์ของยางที่เติมถั่วปาล์มน้ำมันสูงกว่ายางที่ไม่ใส่ถั่วปาล์มน้ำมัน เมื่อเปรียบเทียบขนาดอนุภาคถั่วปาล์มน้ำมันที่ 120, 200 และ 325 เมช พบว่า ยางที่เติมถั่วปาล์มน้ำมันขนาด 325 เมช ส่งผลให้มีค่ามอดูลัสสูงที่สุด รองลงมาคือถั่วปาล์มน้ำมันขนาด 200 และ 120 เมช ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากถั่วปาล์มน้ำมันขนาด 325 เมช มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ส่งผลให้มีการยึดติดระหว่างเฟสยางกับอนุภาคถั่วปาล์มน้ำมันสูง ทำให้ยางมีความต้านทานต่อการผิดรูปจากการดึงได้สูง ดังนั้นค่ามอดูลัสของยางที่ใช้ถั่วปาล์มน้ำมันขนาด 325 เมช จึงสูงที่สุด



รูปที่ 5.14 ความทนต่อแรงดึงและความทนต่อการฉีกขาดของยางธรรมชาติผสมถั่วปาล์มน้ำมันที่ขนาดอนุภาคต่างๆ

รูปที่ 5.14 แสดงผลของขนาดอนุภาคถั่วปาล์มน้ำมันที่มีต่อความทนต่อแรงดึงและความทนต่อการฉีกขาด พบว่ายางธรรมชาติที่เติมถั่วปาล์มน้ำมันขนาด 120 เมช มีค่าความทนต่อแรงดึงและความทนต่อการฉีกขาดต่ำที่สุด และต่ำกว่ายางธรรมชาติที่ไม่เติมสารตัวเติม ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากการผสมถั่วปาล์มน้ำมันที่มีขนาดอนุภาคใหญ่

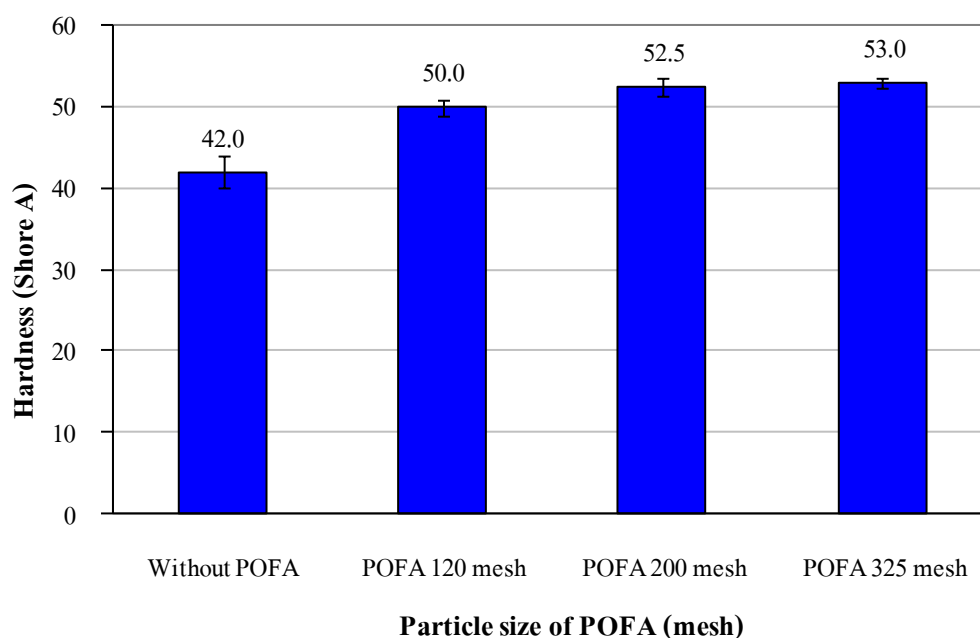
และมีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำ ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับยางได้น้อย ทำให้การยึดติดระหว่างยางกับอนุภาคสารตัวเติมไม่ดีและเกิดช่องว่างระหว่างเฟสยางกับอนุภาคสารตัวเติมซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดการสะสมของความเค้นในยางได้ง่าย ทำให้มีผลต่อการรับแรงและการกระจายแรงที่มากระทำต่อยางลดลง จึงทำให้ความทนต่อแรงดึงและการฉีกขาดลดลง ส่วนยางธรรมชาติที่เติมเถ้าปลัมน้ำมันที่ขนาด 325 และ 200 เมช มีความทนต่อแรงดึงและการฉีกขาดสูงกว่ายางธรรมชาติที่ไม่เติมเถ้าปลัมน้ำมันและสูงกว่ายางธรรมชาติที่เติมเถ้าปลัมน้ำมันขนาด 120 เมช ตามลำดับ เนื่องจากการมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงกว่า ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวในการเกิดอันตรกิริยาและการยึดติดระหว่างเฟสยางกับอนุภาคสารตัวเติมได้มาก ทำให้ความทนต่อแรงดึงและการฉีกขาดสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าเถ้าปลัมน้ำมันที่มีขนาดอนุภาคเล็กให้ประสิทธิภาพการเสริมแรงได้ดีกว่าขนาดอนุภาคใหญ่และสามารถใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงในยางธรรมชาติได้



รูปที่ 5.15 เปอร์เซนต์การยืดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติผสมเถ้าปลัมน้ำมันที่ขนาดอนุภาคต่างๆ

รูปที่ 5.15 แสดงผลของขนาดอนุภาคเถ้าปลัมน้ำมันที่มีต่อเปอร์เซนต์การยืดตัว ณ จุดขาด พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่ใส่สารตัวเติม ยางธรรมชาติที่เติมเถ้าปลัมน้ำมันที่ขนาดใดๆ ส่งผลให้ความสามารถในการยืดตัวของยาง ณ จุดขาดลดลง เนื่องจากการใส่สารตัวเติมทำให้ความยืดหยุ่นของสายโซ่โมเลกุลยางลดลง เมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซนต์การยืดตัว ณ จุดขาด ของยางที่ใส่เถ้าปลัมน้ำมันขนาดต่างๆ ที่ 120, 200 และ 325 เมช พบว่า ยางธรรมชาติที่ใส่เถ้าปลัมน้ำมันขนาดอนุภาค 325 เมช ให้ค่าสูงที่สุด รองลงมาคือ 200 และ 120 เมช ตามลำดับ อาจเนื่องมาจากเถ้าปลัมน้ำมันที่มีขนาดอนุภาคเล็ก (325 เมช) ส่งผลให้การกระจายตัว

สม่ำเสมอและการยึดติดระหว่างยางกับอนุภาคสารตัวเติมดีกว่า ทำให้การเกิดช่องว่างระหว่างเฟสยางและสารตัวเติมน้อยกว่าเช่นกัน ดังนั้นยางจึงเกิดความล้มเหลวหรือการขาดได้ลดลง ทำให้ยางสามารถยืดได้มากกว่า



รูปที่ 5.16 ความแข็งของยางธรรมชาติผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่ขนาดอนุภาคต่างๆ

ความแข็งยางธรรมชาติที่ไม่ใส่เถ้าปาล์มน้ำมันและใส่เถ้าปาล์มน้ำมันที่ขนาดอนุภาคต่างๆ แสดงในรูปที่ 5.16 พบว่า ยางธรรมชาติที่ใส่เถ้าปาล์มน้ำมันที่ขนาดอนุภาคใดๆ ส่งผลให้มีค่าความแข็งของยางสูงกว่ายางที่ไม่ใส่เถ้าปาล์มน้ำมัน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างขนาดอนุภาคเถ้าปาล์มที่ 120, 200 และ 325 เมช พบว่า ความแข็งของยางที่ใส่เถ้าปาล์มขนาดอนุภาคต่างๆ มีค่าใกล้เคียงไม่แตกต่างกัน โดยยางที่มีขนาดเถ้าปาล์มน้ำมัน 325 เมช มีค่าความแข็งสูงกว่ายางที่ขนาดเถ้าปาล์มที่ 120 และ 200 เมช เล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีมากกว่า

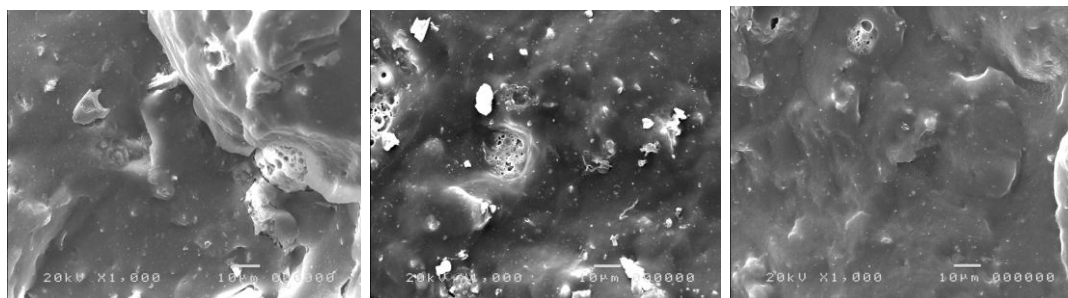
5.3.3 อิทธิพลของขนาดอนุภาคถ้าปาล์มน้ำมันต่อสมบัติเชิงความร้อน

ตารางที่ 5.4 อุณหภูมิสลายตัวที่ตำแหน่ง Onset และ Midpoint ของยางธรรมชาติผสมถ้าปาล์มน้ำมันที่ขนาดอนุภาคต่างๆ

Type of samples	Temperature (°C)	
	Onset (T_{onset})	Mid-point ($T_{\text{mid-point}}$)
NR without filler	324.0	376.3
NR with POFA 120 mesh	331.0	379.0
NR with POFA 200 mesh	339.7	381.1
NR with POFA 325 mesh	352.1	393.2

จากตารางที่ 5.4 แสดงอุณหภูมิการสลายตัวของยางธรรมชาติที่ใส่ถ้าปาล์มน้ำมันที่ขนาดอนุภาค 120, 200 และ 325 เมช พบว่า อุณหภูมิเริ่มการสลายตัว (onset temperature, T_{onset}) และอุณหภูมิที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักมากที่สุด (midpoint temperature, $T_{\text{mid-point}}$) ของยางธรรมชาติที่ใส่ถ้าปาล์มน้ำมันที่ขนาดอนุภาค 325 เมช มีค่าสูงกว่ายางที่ใส่ถ้าปาล์มน้ำมันที่ขนาดอนุภาค 200 และ 120 เมช และยางที่ไม่ใส่ถ้าปาล์มน้ำมันตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากถ้าปาล์มน้ำมันมีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกาและสารอนินทรีย์ต่างๆที่มีความเสถียรต่อความร้อนสูง ทำให้อุณหภูมิการสลายของยางที่ผสมถ้าปาล์มน้ำมันสูงกว่ายางที่ไม่ผสมถ้าปาล์มน้ำมัน และที่ขนาดอนุภาคถ้าปาล์มน้ำมัน 325 เมช มีค่าอุณหภูมิการสลายตัวของยางสูงที่สุด เนื่องจากการกระจายตัวที่ดีและการมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ทำให้การยึดติดระหว่างเฟสยางและเฟสของอนุภาคถ้าปาล์มน้ำมันดีกว่าที่ขนาดอนุภาคอื่นๆ ส่งผลให้กระจายความร้อนจากยางไปยังสารตัวเติมได้มีประสิทธิภาพ และสารตัวเติมจะทำหน้าที่เป็นตัวชะลอหรือขัดขวางความร้อนที่จะสัมผัสกับยาง จึงทำให้มีความเสถียรทางความร้อนสูง

5.3.4 อิทธิพลของขนาดอนุภาคเถ้าปาล์มน้ำมันต่อฐานวิทยา



120 mesh

200 mesh

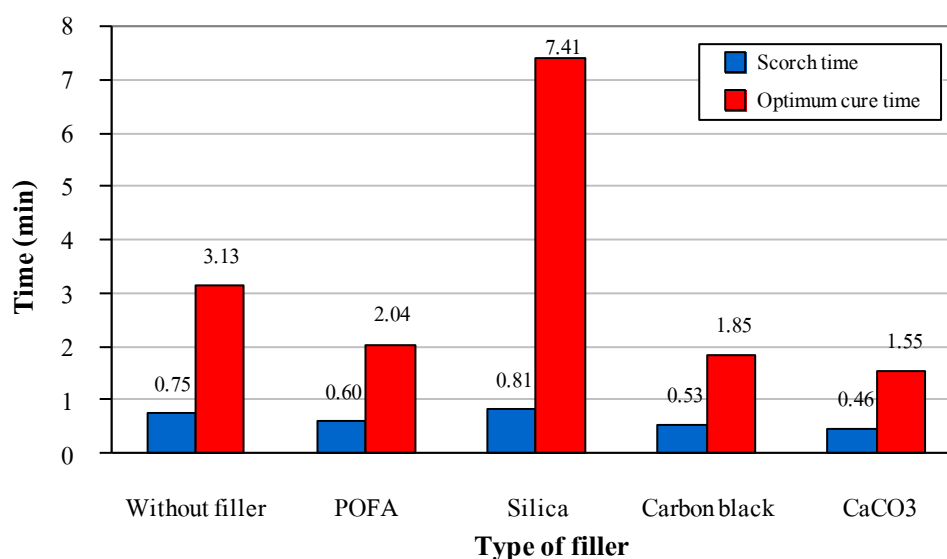
325 mesh

รูปที่ 5.17 ฐานวิทยาของยางธรรมชาติผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่ขนาดอนุภาคต่างๆ (กำลังขยาย 1,000 เท่า)

ฐานวิทยาของยางธรรมชาติที่มีขนาดอนุภาคเถ้าปาล์มน้ำมันต่างๆ แสดงในรูปที่ 5.17 พบว่า เถ้าปาล์มน้ำมันที่มีขนาดอนุภาค 325 เมช มีการกระจายตัวในยางธรรมชาติที่ดี นอกจากนี้ยังพบว่าการยึดเกาะระหว่างเฟส (interfacial adhesion) ของยางกับอนุภาคเถ้าปาล์มน้ำมันที่ขนาด 325 เมช ดีกว่าเนื่องจากมีพื้นที่ผิวมาก ทำให้โมเลกุลยางสามารถยึดเกาะกับอนุภาคสารตัวเติมได้ดี โดยเห็นได้จากไม่มีช่องว่างระหว่างเฟสยางและสารตัวเติมเกิดขึ้นหรือเกิดขึ้นน้อยกว่าที่ขนาดอนุภาค 200 และ 120 เมช ซึ่งจากลักษณะฐานวิทยาดังกล่าวสอดคล้องกับสมบัติเชิงกล (รูปที่ 5.13-5.15) และสมบัติเชิงความร้อน (ตารางที่ 5.4)

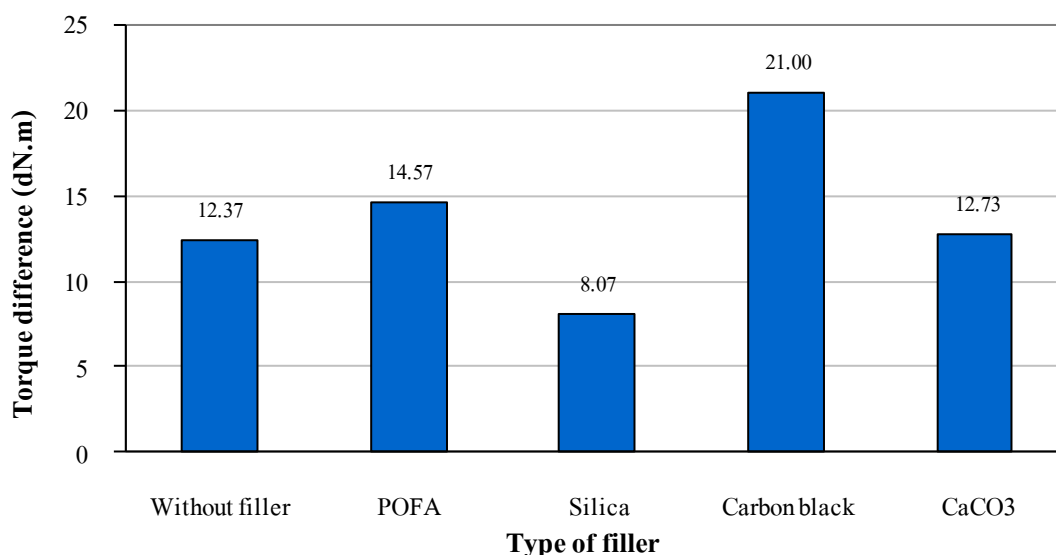
5.4 อิทธิพลของชนิดของสารตัวเติมทางการค้าเปรียบเทียบกับเถ้าปาล์มน้ำมันต่อสมบัติด้านต่างๆของยางคอมพาวนด์และยางวัลคาไนซ์

5.4.1 อิทธิพลของชนิดสารตัวเติมต่อสมบัติการวัลคาไนซ์



รูปที่ 5.18 เวลาสกorchและเวลาวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 160°C ของยางธรรมชาติผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ

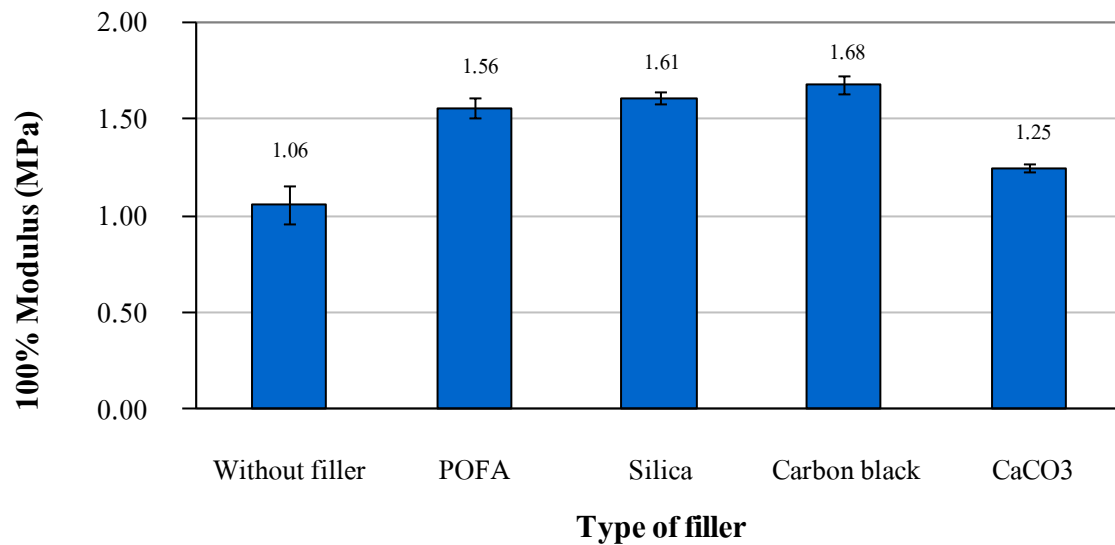
รูปที่ 5.18 แสดงเวลาสกออกและเวลาวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ พบว่า ยางธรรมชาติที่ผสมสารตัวเติมถั่วปาล์มน้ำมันมีเวลาสกออกและเวลาวัลคาไนซ์น้อยกว่ายางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติม ซิลิกา ถึงแม้ว่าถั่วปาล์มน้ำมันจะมีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกา ทั้งนี้เนื่องจากถั่วปาล์มน้ำมันมีโลหะออกไซด์เป็นองค์ประกอบร่วมด้วย (ตารางที่ 5.1) ทำให้อัตราการคงรูปเร็วขึ้น (Costa, *et al.*, 2002) และปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่บนผิวของถั่วปาล์มน้ำมันไม่หนาแน่นเท่ากับซิลิกาทางการค้าทำให้การดูดซับสารตัวเร่งบนผิวน้อยกว่าส่งผลให้ปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์เกิดขึ้นได้เร็วกว่า แต่ถึงอย่างไรก็ตามยางที่เติมถั่วปาล์มน้ำมันมีเวลาการสกออกและเวลาการวัลคาไนซ์มากกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตและเขม่าดำตามลำดับ เป็นเพราะถั่วปาล์มน้ำมันยังคงมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ทำให้ดูดซับสารตัวเร่งได้บ้าง ทำให้ปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ของยางที่เติมถั่วปาล์มน้ำมันเกิดได้ช้ากว่าแคลเซียมคาร์บอเนตและเขม่าดำเล็กน้อย



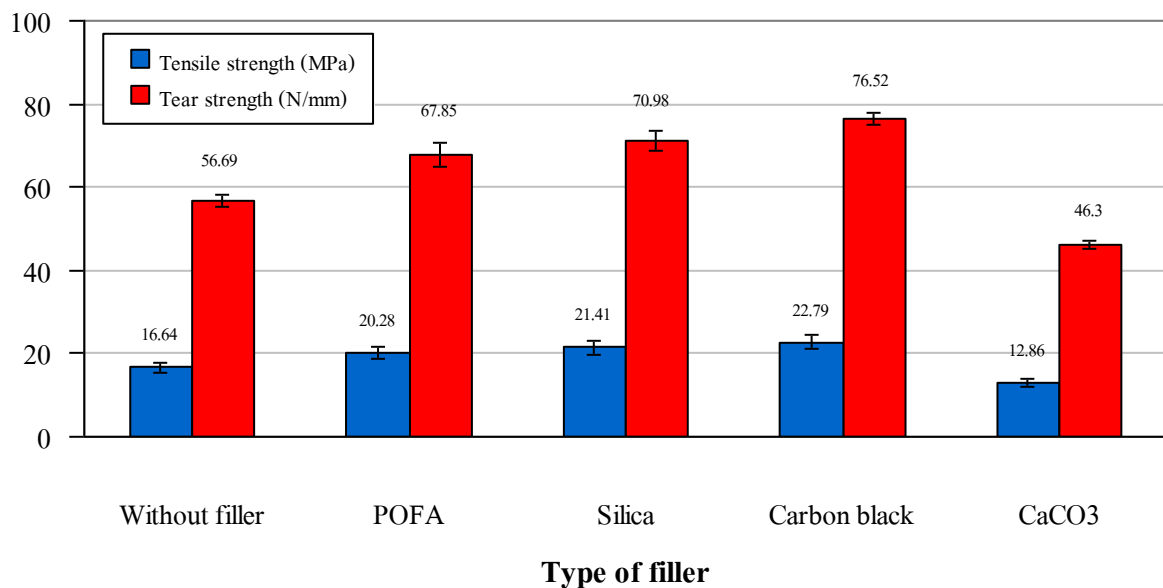
รูปที่ 5.19 ผลต่างแรงบิดของยางธรรมชาติผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ

ผลต่างแรงบิดของยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ แสดงในรูปที่ 5.19 พบว่า ยางธรรมชาติที่ใช้ถั่วปาล์มน้ำมันมีค่าผลต่างแรงบิดสูงกว่ายางธรรมชาติที่ใช้แคลเซียมคาร์บอเนต ยางธรรมชาติที่ไม่ใส่สารตัวเติม และยางธรรมชาติที่ใช้ซิลิกาในทางการค้า ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากโลหะออกไซด์ในถั่วปาล์มน้ำมันซึ่งมีผลในการช่วยเร่งปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์และทำให้ได้ปริมาณพันธะเชื่อมโยงสูงขึ้น ดังนั้นค่าผลต่างแรงบิดจึงเพิ่มขึ้น แต่ยังคงมีค่าต่ำกว่ายางธรรมชาติที่ใช้เขม่าดำ อาจเป็นผลเนื่องจากความเข้ากันระหว่างเขม่าดำกับยางมีมากกว่าเพราะยางธรรมชาติจัดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้วหรือมีขั้วต่ำ ทำให้การผสมและการกระจายตัวของเขม่าดำดีกว่า นอกจากนี้บนผิวนอนุภาคเขม่าดำจะมีหมู่ฟังก์ชันเคมี เช่น ฟีนอลิก ควิโนน คาร์บอกซิล และแอลกอฮอล์ที่มีความว่องไวทางปฏิกิริยา (พงศธร, 2548) ส่งผลให้เกิดอันตรกิริยาและปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ขึ้นได้มากกว่า ดังนั้นผลต่างแรงบิดของยางที่ใช้เขม่าดำจึงสูงกว่ายางที่ใช้ถั่วปาล์มน้ำมัน

5.4.2 อิทธิพลของชนิดสารตัวเติมต่อสมบัติเชิงกล



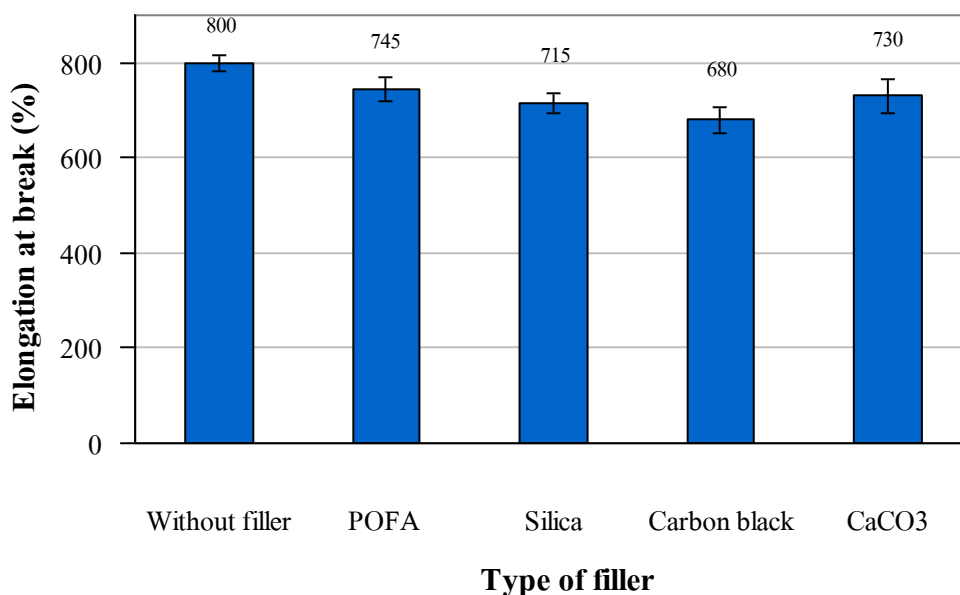
รูปที่ 5.20 ค่ามอดูลัส ณ การยืดตัว 100 เปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ



รูปที่ 5.21 ความทนต่อแรงดึงและความทนต่อการฉีกขาดของยางธรรมชาติผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ

รูปที่ 5.20 แสดงค่ามอดูลัส ณ การยืดตัว 100 เปอร์เซ็นต์ที่ใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ พบว่ายางธรรมชาติที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติที่ได้เคลือบคาร์บอนเนต และยางธรรมชาติที่ไม่ใส่สารตัวเติม แต่มีค่ามอดูลัสน้อยกว่ายางธรรมชาติที่ได้เขม่าดำและซิลิกาตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปัจจัยของขนาดอนุภาคสารตัวเติมและพื้นที่ผิวจำเพาะที่ส่งผลต่อการเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติม โดยเขม่าดำกับซิลิกามีขนาด

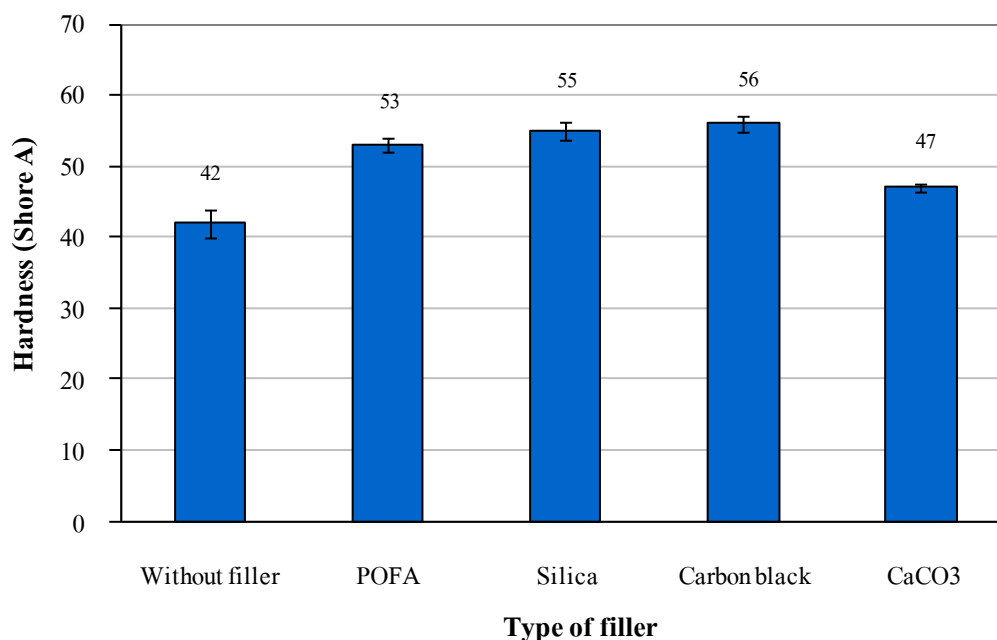
อนุภาคเล็กและหมู่ฟังก์ชันบนผิวอนุภาคดังที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้นทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติม ได้ดีส่งผลให้ค่ามอดูลัสสูง ซึ่งมีแนวโน้มและอธิบายได้เช่นเดียวกันกับความทนต่อแรงดึงและความทนต่อการฉีกขาดดังแสดงในรูปที่ 5.21



รูปที่ 5.22 เปอร์เซนต์การยืด ณ จุดขาดของยางธรรมชาติผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ

จากรูปที่ 5.22 แสดงผลของสารตัวเติมชนิดต่างๆที่มีต่อเปอร์เซนต์การยืดตัว ณ จุดขาด พบว่ายางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมชนิดใดๆ ส่งผลให้ความสามารถในการยืดตัวของยาง ณ จุดขาดลดลงจากยางธรรมชาติที่ไม่ใส่สารตัวเติม เนื่องจากการใส่สารตัวเติมทำให้ความยืดหยุ่นของสายโซ่โมเลกุลยางลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับเปอร์เซนต์การยืดตัว ณ จุดขาด ของยางที่ใส่ถั่วปาล์มน้ำมันกับสารตัวเติมทางการค้าชนิดต่างๆ พบว่า ยางธรรมชาติที่ใส่ถั่วปาล์มน้ำมันมีค่าการยืด ณ จุดขาด สูงกว่ายางธรรมชาติที่ใส่แคลเซียมคาร์บอเนต อาจเนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตมีขนาดอนุภาคขนาดใหญ่และมีพื้นที่ผิวน้อยกว่าถั่วปาล์มน้ำมัน ทำให้การยึดติดระหว่างเฟสยางกับสารตัวเติมไม่ดี ส่งผลให้เกิดช่องว่างระหว่างเฟสยางกับอนุภาคสารตัวเติมขึ้น (รูปที่ 5.24) ซึ่งลักษณะดังกล่าวจะเป็นจุดตำหนิที่เกิดการสะสมความเค้นได้มาก เมื่อถูกยืดจะเกิดความล้มเหลวของยางได้ง่าย ทำให้ความสามารถในการยืดลดลง ซึ่งจะสอดคล้องกับสมบัติเชิงกลอื่นๆ เช่น ความทนต่อแรงดึงและความทนต่อการฉีกขาดลดลงด้วย ดังในรูปที่ 5.21 เมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติที่ผสมถั่วปาล์มน้ำมันกับยางธรรมชาติที่ผสมเขม่าดำกับซิลิกา พบว่า ยางธรรมชาติที่ผสมเขม่าดำกับซิลิกามีเปอร์เซนต์การยืดตัว ณ จุดขาดน้อยกว่ายางธรรมชาติที่ใส่ถั่วปาล์มน้ำมันและ

แคลเซียมคาร์บอเนต เนื่องจากยางที่มีความแข็งแรงมากกว่าจะทำให้ความยืดหยุ่นลดลงจึงมักจะมีการยืดตัว ณ จุดขาดน้อยกว่า



รูปที่ 5.23 ความแข็งของยางธรรมชาติผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ

ความแข็งยางธรรมชาติที่ไม่ใส่เถ้าปาล์มน้ำมันและใส่เถ้าปาล์มน้ำมันที่ขนาดอนุภาคต่างๆ แสดงในรูปที่ 5.23 พบว่า ยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติมชนิดใดๆ ส่งผลให้มีค่าความแข็งของยางสูงกว่ายางที่ไม่ใส่สารตัวเติม เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชนิดสารตัวเติม ได้แก่ เถ้าปาล์มน้ำมัน ซิลิกา เขม่าดำ และแคลเซียมคาร์บอเนต พบว่า ความแข็งของยางที่ใส่เถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าใกล้เคียงกับซิลิกากับเขม่าดำ และมีค่าความแข็งสูงกว่ายางธรรมชาติที่ใส่แคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติมและสารตัวเติมกับสารตัวเติมของซิลิกา เขม่าดำ และเถ้าปาล์มน้ำมันมีมากกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต

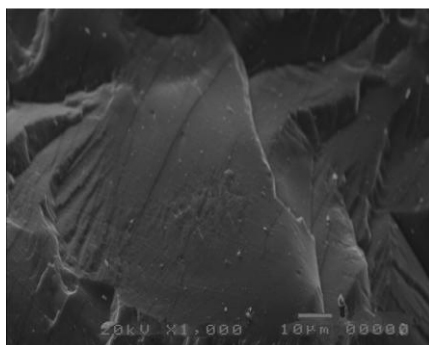
5.4.3 อิทธิพลของชนิดสารตัวเติมต่อสมบัติเชิงความร้อน

ตารางที่ 5.5 อุณหภูมิสลายตัวที่ตำแหน่ง Onset และ Midpoint ของยางธรรมชาติผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ

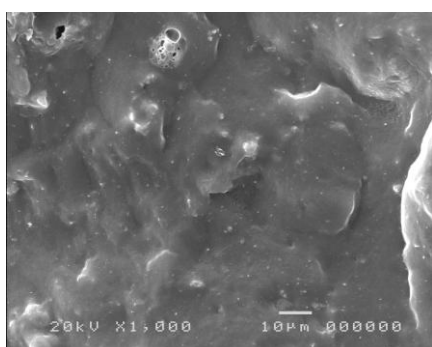
Type of filler	Temperature (°C)	
	Onset (T_{onset})	Mid-point ($T_{\text{mid-point}}$)
Without filler	324.0	376.3
POFA	352.1	393.2
Carbon black	340.3	382.0
Silica	347.7	389.5
CaCO ₃	345.8	387.0

จากตารางที่ 5.5 แสดงอุณหภูมิการสลายตัวของยางธรรมชาติที่ใส่เถ้าปาล์มน้ำมันเปรียบเทียบกับสารตัวเติมชนิดต่างๆ พบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นของการสลายตัว (Onset temperature, T_{onset}) และอุณหภูมิที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักมากที่สุด (Midpoint temperature, $T_{\text{mid-point}}$) ของยางธรรมชาติที่ใส่เถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติที่ใส่ซิลิกา ยางที่ใส่แคลเซียมคาร์บอเนต ยางที่ใส่เขม่าดำ และยางที่ไม่ใส่เถ้าปาล์มน้ำมันตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันมีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกาเช่นเดียวกับซิลิกาในทางการค้าและสารอนินทรีย์ต่างๆที่มีความเสถียรต่อความร้อนสูง ทำให้อุณหภูมิการสลายของยางที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าสูงกว่ายางที่ผสมสารตัวเติมอื่นๆ (ซิลิกา เขม่าดำ แคลเซียมคาร์บอเนต) และยางที่ไม่ผสมสารตัวเติม โดยสารตัวเติมจะทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันความร้อน (Heat barrier) ให้กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ จึงทำให้ยางมีความเสถียรทางความร้อนสูงหรือทำให้การเสื่อมสลายทางความร้อนของยางเกิดช้าลง

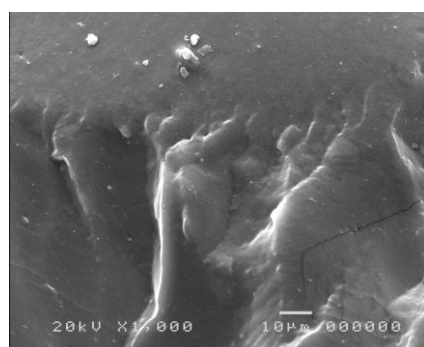
5.4.4 อิทธิพลของชนิดสารตัวเติมต่อฐานวิทยา



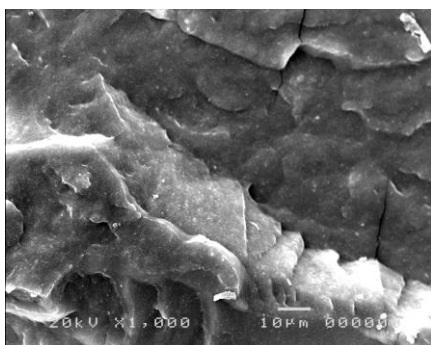
Without filler



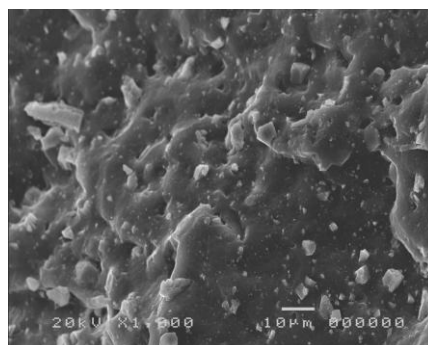
POFA



Silica



Carbon black



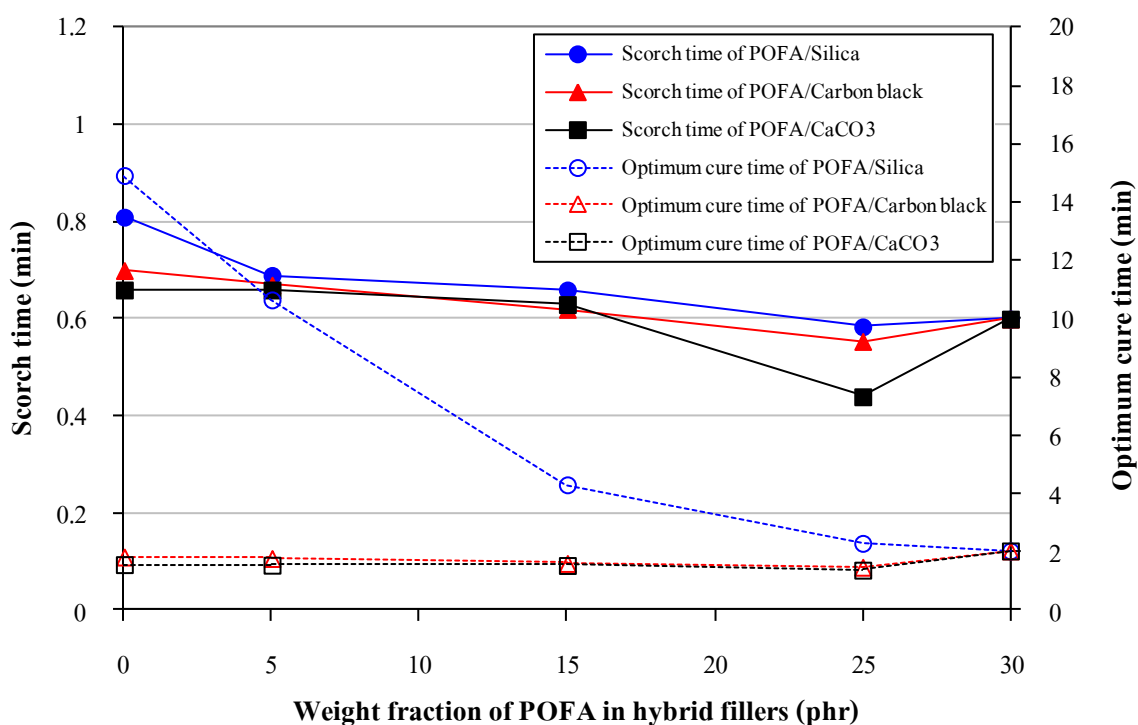
Calcium carbonate

รูปที่ 5.24 ฐานวิทยาของยางธรรมชาติผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ (กำลังขยาย 1,000 เท่า)

ฐานวิทยาของยางธรรมชาติที่ใส่ถั่วปาล์มน้ำมันและสารตัวเติมทางการค้าชนิดต่างๆ แสดงในรูปที่ 5.24 พบว่า ถั่วปาล์มน้ำมัน ซิลิกา และเขม่าดำมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ และมีการยึดเกาะระหว่างเฟสยางธรรมชาติกับสารตัวเติมดี ส่วนแคลเซียมคาร์บอเนตมีการยึดเกาะระหว่างเฟสยางธรรมชาติกับอนุภาคไม่ดี เหมือนกับสารตัวเติมอื่นๆ ซึ่งทำให้มีพื้นที่ผิวยึดเกาะกับเนื้อยางและความต่อเนื่องของเฟสยางในการรับแรงน้อยกว่า ซึ่งจากลักษณะฐานวิทยาดังกล่าวสอดคล้องกับสมบัติเชิงกล (รูปที่ 5.20-5.23)

5.5 อิทธิพลของสารตัวเติมผสมของเถ้าปลาล้างน้ำมันกับสารตัวเติมทางการค้า (ซิลิกา เหม่ดำ และแคลเซียมคาร์บอเนต) ต่อสมบัติด้านต่างๆของยางคอมพาวนด์และยางวัลคาไนซ์

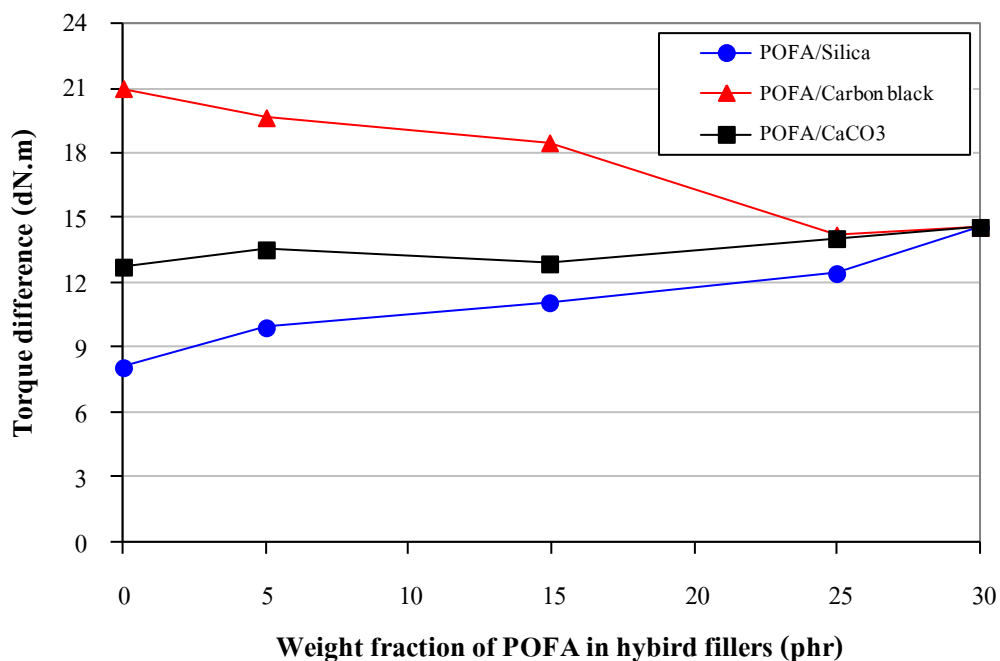
5.5.1 อิทธิพลของสารตัวเติมผสมของเถ้าปลาล้างน้ำมันกับสารตัวเติมทางการค้าต่อสมบัติการวัลคาไนซ์



รูปที่ 5.25 เวลาสกอชและเวลาวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 160°C ของยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติมผสมของเถ้าปลาล้างน้ำมันร่วมกับซิลิกา เหม่ดำ และแคลเซียมคาร์บอเนตที่สัดส่วนต่างๆ

รูปที่ 5.25 แสดงเวลาสกอชและเวลาวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติมผสมของเถ้าปลาล้างน้ำมันร่วมกับสารตัวเติมชนิดต่างๆ ที่สัดส่วนของเถ้าปลาล้างน้ำมันต่อสารตัวเติมทางการค้า เท่ากับ 0:30, 5:25, 15:15, 25:5 และ 30:0 พบว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนเถ้าปลาล้างน้ำมันในสารตัวเติมผสมของเถ้าปลาล้างน้ำมันกับซิลิกา ทำให้เวลาสกอชและเวลาวัลคาไนซ์ลดลง แม้ว่าเถ้าปลาล้างน้ำมันจะมีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกาแต่เถ้าปลาล้างน้ำมันมีโลหะออกไซด์เป็นองค์ประกอบร่วมด้วย (ตารางที่ 5.1) ทำให้อัตราการคงรูปเร็วขึ้น นอกจากนี้ปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่บนผิวของเถ้าปลาล้างน้ำมันไม่หนาแน่นเท่ากับซิลิกาทางการค้าทำให้การดูดซับสารตัวเร่งบนผิวน้อยกว่า ส่งผลให้ปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์เกิดขึ้นได้เร็วกว่า ดังนั้นเวลาสกอชและเวลาวัลคาไนซ์จึงลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าปลาล้างน้ำมันในยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติมผสมของเถ้าปลาล้างน้ำมันกับซิลิกา ส่วนการเพิ่มปริมาณเถ้าปลาล้างน้ำมันในยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติมผสมของเถ้าปลาล้างน้ำมันกับเหม่ดำและเถ้าปลาล้างน้ำมันกับแคลเซียมคาร์บอเนต พบว่า เวลาสกอชและ

เวลาวัลคาไนซ์เปลี่ยนแปลงไม่มากนักโดยมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากโลหะออกไซด์ เช่น แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ที่สามารถกระตุ้นปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ และฤทธิ์ที่เป็นด่างของเถ้าปาล์มน้ำมัน ทำให้ยางมีอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น ทำให้เวลาสกอกซ์และเวลาวัลคาไนซ์ของสารตัวเติมผสมระหว่างเถ้าปาล์มน้ำมันกับเขม่าดำและเถ้าปาล์มกับแคลเซียมคาร์บอเนตมีแนวโน้มลดลง แต่ถึงอย่างไรก็ตามยางที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันเพียงตัวเดียวมีเวลาการสกอกซ์และเวลาการวัลคาไนซ์มากกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตและเขม่าดำตามลำดับ อาจเนื่องจาก เถ้าปาล์มน้ำมันยังคงมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ทำให้ดูดซับสารตัวเร่งได้บ้าง ทำให้ปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ของยางที่เติมเถ้าปาล์มน้ำมันเกิดได้ช้ากว่าแคลเซียมคาร์บอเนตและเขม่าดำเล็กน้อย

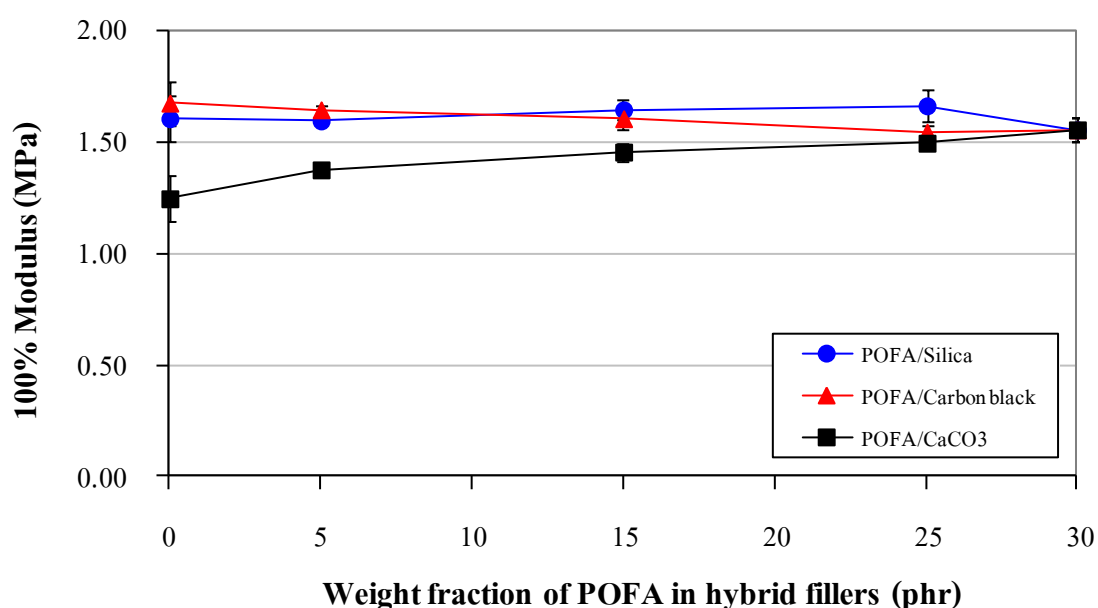


รูปที่ 5.26 ผลต่างแรงบิดของยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติมผสมของเถ้าปาล์มน้ำมันร่วมกับ ซิลิกา เขม่าดำ และ แคลเซียมคาร์บอเนตที่สัดส่วนต่างๆ

ผลต่างแรงบิดของยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติมผสมของเถ้าปาล์มน้ำมันกับสารตัวเติมชนิดต่างๆ แสดงใน รูปที่ 5.26 พบว่าการเพิ่มสัดส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันในยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติมผสมของเถ้าปาล์มน้ำมันร่วมกับ ซิลิกาและเถ้าปาล์มน้ำมันร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนตทำให้มีค่าผลต่างแรงบิดสูงขึ้น ทั้งนี้เป็นอิทธิพลของ สารประกอบอนินทรีย์ (โลหะออกไซด์) ที่มีอยู่ในเถ้าปาล์มน้ำมัน ส่วนในกรณีของยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติม ผสมระหว่างเถ้าปาล์มน้ำมันกับเขม่าดำ เมื่อเพิ่มสัดส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันในสารตัวเติมผสมทำให้ค่าผลต่างแรงบิดมี แนวโน้มลดลง อาจเนื่องมาจากการผสมเถ้าปาล์มน้ำมันทำให้การกระจายตัวของสารตัวเติมผสมด้อยลง ซึ่งเป็นผล จากความแตกต่างทางเคมี เช่น ความเป็นขี้ และทางกายภาพ เช่น ขนาดอนุภาคของสารตัวเติม ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว

เขม่าดำมีขนาดอนุภาคเล็ก รวมทั้งสามารถกระจายตัวในยางได้ดีกว่าสารตัวเติมที่มีความเป็นขั้วสูงอย่างเช่น ซิลิกา ดังนั้นเขม่าดำจึงผสมเข้ากับยางธรรมชาติได้ดีกว่า เมื่อนำเถ้าปาล์มซึ่งมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักและมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าผสมรวมกัน จึงอาจมีผลต่อการกระจายตัวที่ด้อยลง เป็นกลุ่มก้อนเบียดบังร่วมกับอนุภาคเขม่าดำ ทำให้การเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติมและลดประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาการคงรูปส่งผลต่อค่าผลต่างแรงบิดลดลง

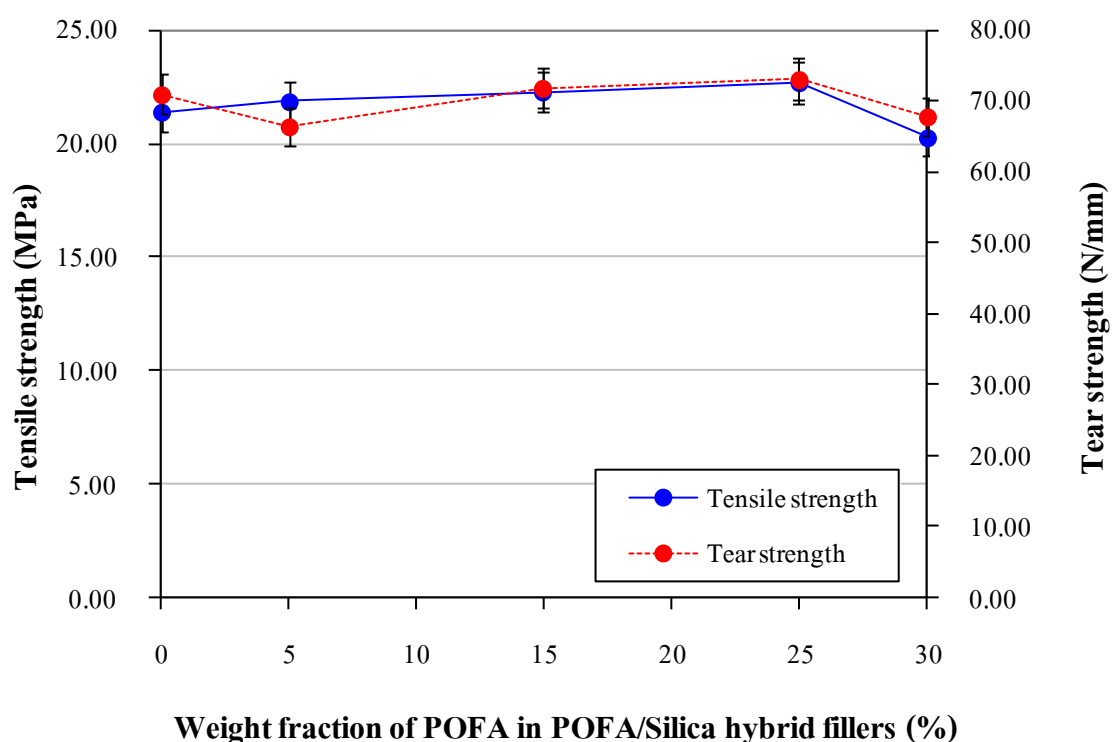
5.5.2 อิทธิพลของสารตัวเติมผสมระหว่างเถ้าปาล์มน้ำมันกับสารตัวเติมทางการค้าต่อสมบัติเชิงกล



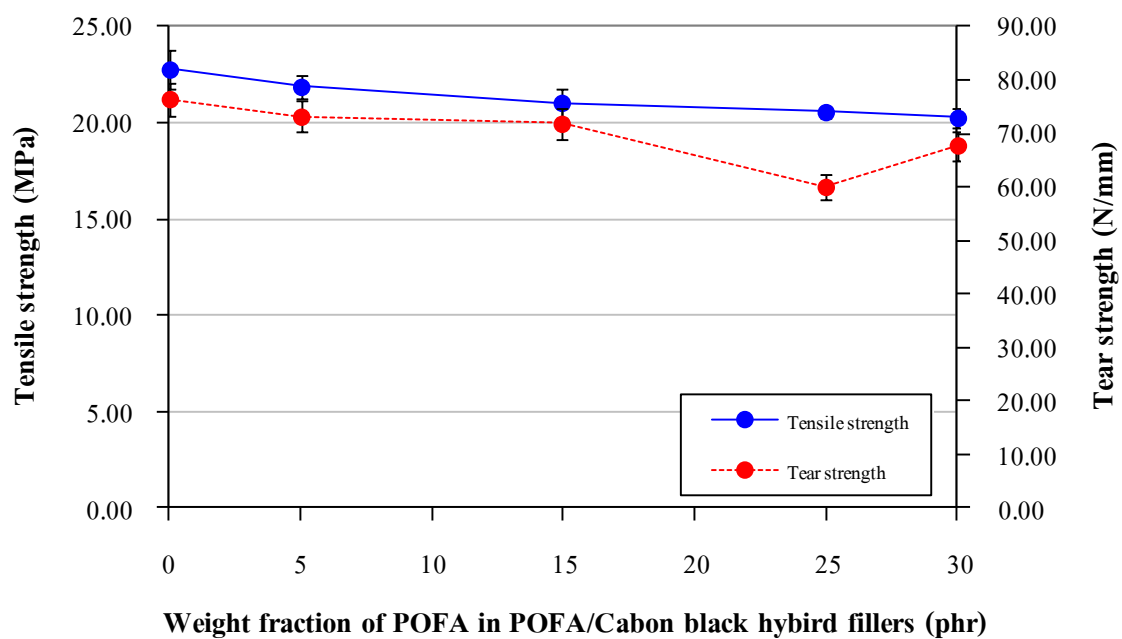
รูปที่ 5.27 ค่ามอดูลัส ณ การยืดตัว 100 เปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติมผสมของเถ้าปาล์มน้ำมันร่วมกับซิลิกา เขม่าดำ และแคลเซียมคาร์บอเนต ที่สัดส่วนต่างๆ

รูปที่ 5.27 แสดงค่ามอดูลัส ณ การยืดตัว 100 เปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติมผสมของเถ้าปาล์มน้ำมันร่วมกับสารตัวเติมชนิดต่างๆ พบว่า การเพิ่มสัดส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันในยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติมผสมของเถ้าปาล์มน้ำมันกับซิลิกาและเถ้าปาล์มน้ำมันกับแคลเซียมคาร์บอเนตทำให้มอดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากอิทธิพลของการกระจายตัวของสารตัวเติม โดยการเติมเถ้าปาล์มน้ำมันในสารตัวเติมผสมของเถ้าปาล์มน้ำมันกับซิลิกาอาจมีส่วนช่วยให้ซิลิกาแตกตัวในยางได้ดีขึ้น เนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันมีความหนาแน่นของหมู่ไฮดรอกซิลบนผิวอนุภาคน้อยกว่าซิลิกา ทำให้ลดการเกาะกลุ่มกันเองของอนุภาคซิลิกาได้ นอกจากนี้อนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันขนาดเล็กสามารถแทรกตัวเข้าไปทำลายโครงสร้างแอกไกลเมอเรตของพรีพอลิเมอร์ซิลิกาได้ ส่งผลให้

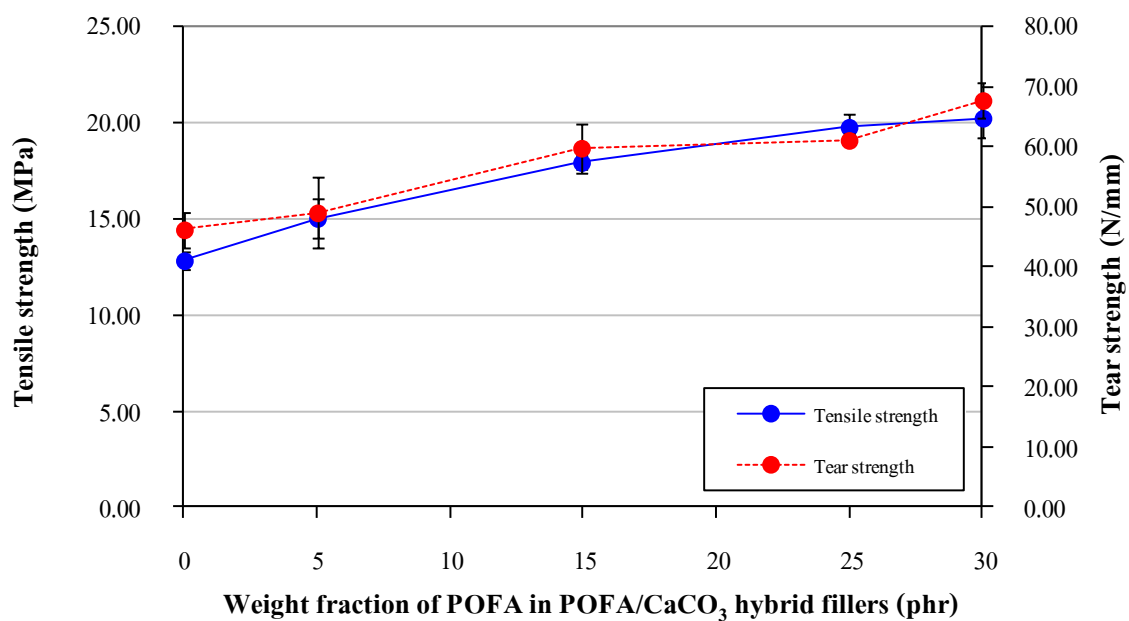
พริชพิเทตซิลิกาแตกตัวได้ดีขึ้น รวมถึงลดการดูดซับสารตัวเร่งในปฏิกิริยาการคงรูปทำให้เพิ่มประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน ส่วนการเพิ่มสัดส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันในยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติมผสมของเถ้าปาล์ม น้ำมันกับแคลเซียมคาร์บอเนตทำให้ค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าเมื่อใช้ร่วมกับเถ้าปาล์มน้ำมันซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าทำให้สามารถแทรกตัวกระจายอยู่ในยางได้ดีเพิ่มขึ้น โดยสัดส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันที่เพิ่มขึ้นจะช่วยเสริมแรงได้มากขึ้นเนื่องจากการมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงกว่าทำให้มีพื้นที่ที่เกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติมเกิดขึ้นมากกว่าส่งผลให้ค่ามอดูลัสสูงขึ้นและโลหะออกไซด์ในเถ้าปาล์มน้ำมันที่ช่วยในการกระตุ้นปฏิกิริยาการคงรูปด้วย สำหรับการใส่สารตัวเติมผสมของเถ้าปาล์ม น้ำมันกับเขม่าดำ พบว่า การเพิ่มสัดส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันในสารตัวเติมผสมทำให้ค่ามอดูลัสลดลงเล็กน้อย สามารถอธิบายได้โดยการผสมเถ้าปาล์มน้ำมันทำให้การกระจายตัวของสารตัวเติมผสมด้อยลง จึงทำให้การเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติมและการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันน้อยลง ดังนั้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันในสารตัวเติมผสมของเขม่าดำกับเถ้าปาล์มน้ำมันค่ามอดูลัสจึงลดลงซึ่งสอดคล้องกับค่าผลต่างแรงบิด



(a)



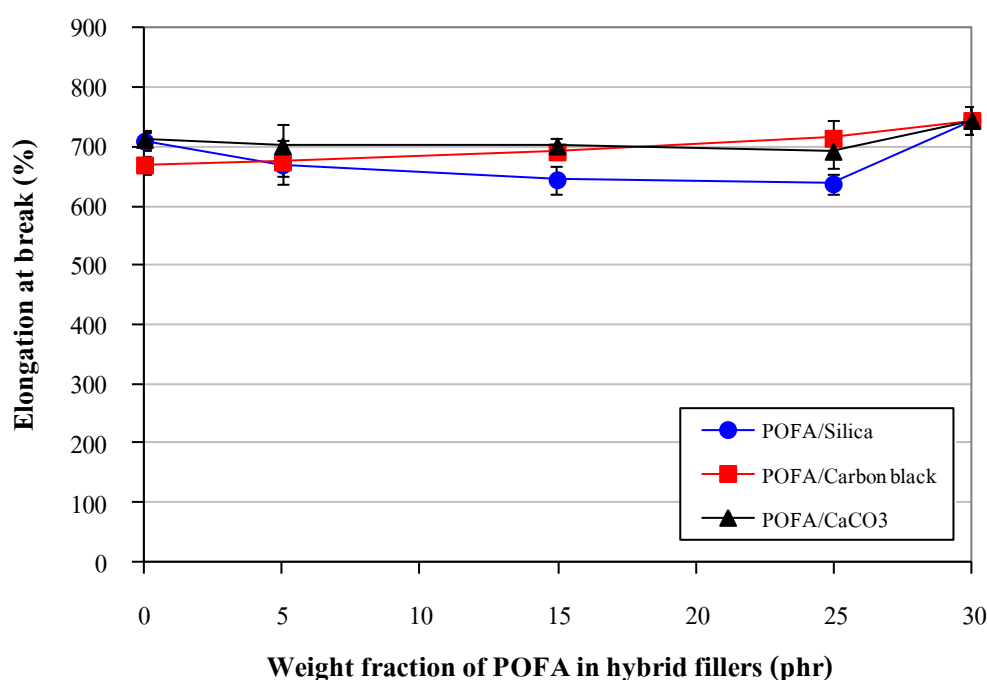
(b)



(c)

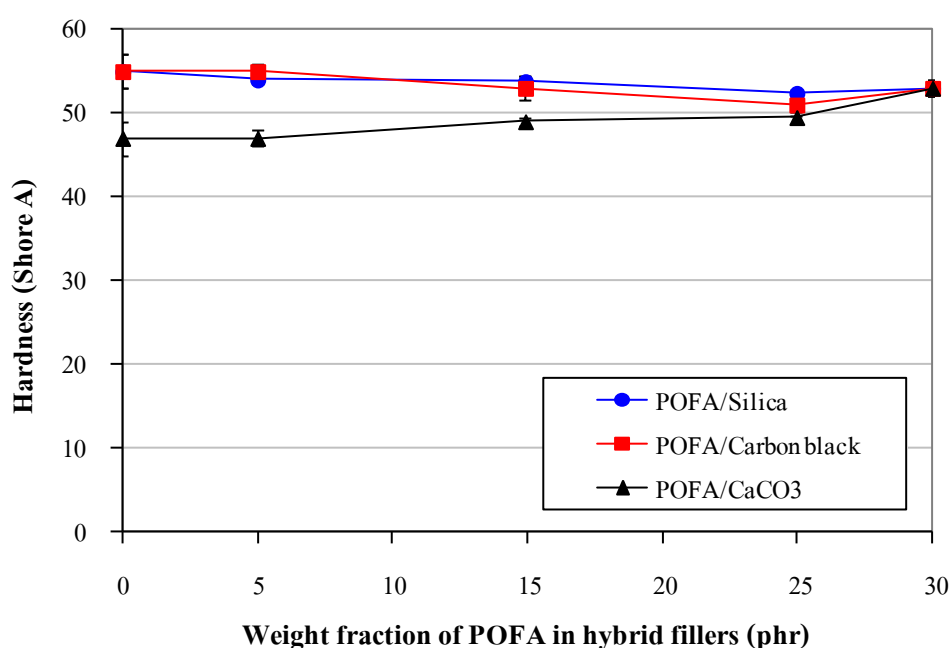
รูปที่ 5.28 ความทนต่อแรงดึงและความทนต่อการฉีกขาดของยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติมผสมของ (a) เถ้าปลั้มน้ำมันกับซิลิกา (b) เถ้าปลั้มน้ำมันกับเขม่าดำ และ (c) เถ้าปลั้มน้ำมันกับแคลเซียมคาร์บอเนตที่สัดส่วนต่างๆ

ความทนต่อแรงดึงและความทนต่อการฉีกขาดของยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติมผสมของเถ้าปาล์มน้ำมันกับสารตัวเติมต่างๆ แสดงในรูปที่ 5.28 พบว่า การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันร่วมกับซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนต (รูปที่ 5.28a และ 5.28c ตามลำดับ) ช่วยเสริมแรงให้แกยางได้ โดยค่าความทนต่อแรงดึงและความทนต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเห็นได้ชัดเจนในการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันร่วมกับซิลิกา เป็นผลมาจากเถ้าปาล์มน้ำมันมีฤทธิ์เป็นด่างและโลหะออกไซด์ซึ่งช่วยเร่งและเพิ่มประสิทธิภาพปฏิกิริยาการคงรูป เพราะโดยปกติ ซิลิกาจะมีฤทธิ์เป็นกรดและมีหมู่ไฮดรอกซิลบนผิวอนุภาคอย่างหนาแน่นทำให้สามารถดูดซับสารตัวเร่งได้ดีและง่ายต่อการเกิดอันตรกิริยาระหว่างกันของอนุภาคซิลิกาทำให้เกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มแอกโกลเมอเรต ดังนั้นการเติมเถ้าปาล์มน้ำมันแม้จะมีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกาแต่มีปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลไม่หนาแน่นเท่า จึงช่วยให้ซิลิกาลดการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคซิลิกาได้ทำให้เกิดการแตกตัวกระจายในเฟสยางที่ต่อเนื่องได้ดีขึ้น ส่งผลให้สามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติมได้ดีทำให้สามารถกระจายแรงที่กระทำได้อย่างสม่ำเสมอ จึงทำให้ความทนต่อแรงดึงและการฉีกขาด แต่การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันร่วมกับเขม่าดำพบว่าทำให้สมบัติดกตึงซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลเดียวกับค่ามอดูลัส



รูปที่ 5.29 เปรอ์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติมผสมของ (a) เถ้าปาล์มน้ำมันกับซิลิกา (b) เถ้าปาล์มน้ำมันกับเขม่าดำ และ (c) เถ้าปาล์มน้ำมันกับแคลเซียมคาร์บอเนตที่สัดส่วนต่างๆ

รูปที่ 5.29 แสดงเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติมผสม พบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันในสารตัวเติมผสมแต่ละชนิด ทำให้ความสามารถในการยืดของยาง ณ จุดขาด ที่ใช้สารตัวเติมผสมของเถ้าปาล์มน้ำมันกับเขม่าดำเพิ่มขึ้นในขณะที่สารตัวเติมผสมของเถ้าปาล์มน้ำมันกับซิลิกาและเถ้าปาล์มน้ำมันกับแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากอันตรกิริยาเมื่อเติมเถ้าปาล์มน้ำมันในสารตัวเติมผสมชนิดต่างๆ โดยในสารตัวเติมผสมของเถ้าปาล์มกับเขม่าดำนั้นการเพิ่มสัดส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันทำให้ความแข็งตึง (stiffness) ลดลงซึ่งสัมพันธ์กับค่ามอดูลัส จึงทำให้โมเลกุลสามารถยืดออกได้มากขึ้น ส่วนสารตัวเติมผสมของเถ้าปาล์มน้ำมันกับซิลิกาและเถ้าปาล์มน้ำมันกับแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าลดลง เนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันช่วยเพิ่มความแข็งตึงซึ่งสอดคล้องกับค่ามอดูลัสที่สูงขึ้น (รูปที่ 5.27) ทำให้ความยืดหยุ่นลดลง ดังนั้นค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดจึงลดลง



รูปที่ 5.30 ความแข็งของยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติมผสมของเถ้าปาล์มน้ำมันกับซิลิกา เถ้าปาล์มน้ำมันกับ เขม่าดำ และเถ้าปาล์มน้ำมันกับแคลเซียมคาร์บอเนตที่สัดส่วนต่างๆ

ความแข็งยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติมผสมระหว่างเถ้าปาล์มน้ำมันกับซิลิกา เถ้าปาล์มน้ำมันกับเขม่าดำ และเถ้าปาล์มน้ำมันกับแคลเซียมคาร์บอเนตที่สัดส่วนต่างๆแสดงในรูปที่ 5.30 พบว่า การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันร่วมกับสารตัวเติมซิลิกาและการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันร่วมกับเขม่าดำ โดยเพิ่มสัดส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันทำให้ค่าความแข็งของยางมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยแต่ไม่แตกต่างจากแต่ละสัดส่วนมากนัก เนื่องจากซิลิกาและเขม่าดำนั้นมีขนาดอนุภาคเล็กและยังสามารถรวมเป็นกลุ่มก้อนเป็นแอ็กโกลเมอเรตหรือโครงข่ายของสารตัวเติม (filler network) จากการเกิด

อันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมกับสารตัวเติมมีผลให้ความแข็งแรงสูงขึ้นด้วย ดังนั้นเมื่อสัดส่วนซิลิกาและเขม่าดำลดลง หรือสัดส่วนเถ้าปลัสมัน้ำมันเพิ่มขึ้นทำให้ยางมีความแข็งแรงลดลง สำหรับการใส่สารตัวเติมผสมของเถ้าปลัสมันน้ำมันกับ แคลเซียมคาร์บอเนต พบว่า เมื่อสัดส่วนของเถ้าปลัสมันน้ำมันเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากเถ้าปลัสมันน้ำมันมีขนาดอนุภาคเล็กและพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต สามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติมหรือสารตัวเติมกับสารตัวเติมได้มากกว่าส่งผลให้ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

5.5.3 อิทธิพลของสารตัวเติมผสมของเถ้าปลัสมันน้ำมันกับสารตัวเติมทางการค้าต่อสมบัติเชิงความร้อน

ตารางที่ 5.6 อุณหภูมิสลายตัวที่ตำแหน่ง Onset และ Midpoint ของธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติมผสมระหว่างเถ้าปลัสมันน้ำมันกับซิลิกา เถ้าปลัสมันน้ำมันกับเขม่าดำ และเถ้าปลัสมันน้ำมันกับแคลเซียมคาร์บอเนตที่สัดส่วนต่างๆ

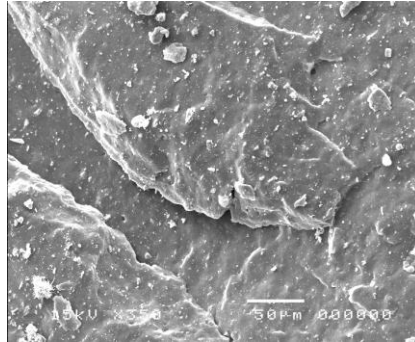
Type of samples	Temperature (°C)	
	Onset (T_{onset})	Mid-point ($T_{\text{mid-point}}$)
POFA:Silica = 0:30	347.7	389.5
POFA:Silica = 5:25	365.7	399.2
POFA:Silica = 15:15	367.0	404.5
POFA:Silica = 25:5	364.1	396.4
POFA:Silica = 30:0	352.1	393.2
POFA:Carbon black = 0:30	340.3	382.0
POFA:Carbon black = 5:25	344.8	386.1
POFA:Carbon black = 15:15	350.5	390.7
POFA:Carbon black = 25:5	352.0	391.5
POFA:Carbon black = 30:0	352.1	393.2

ตารางที่ 5.6 (ต่อ) อุณหภูมิการสลายตัวของยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติมผสมระหว่างเถ้าปาล์ม น้ำมันกับซิลิกา เถ้าปาล์มน้ำมันกับเขม่าดำ และเถ้าปาล์มน้ำมันกับแคลเซียมคาร์บอเนตที่สัดส่วนต่างๆ

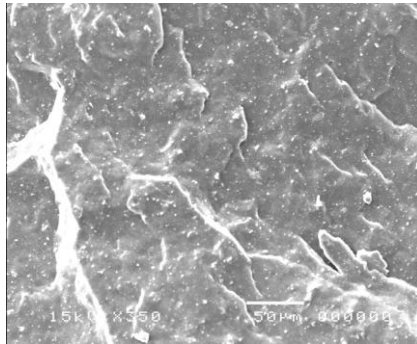
Type of samples	Temperature (°C)	
	Onset (T_{onset})	Mid-point ($T_{\text{mid-point}}$)
POFA:Calcium carbonate = 0:30	345.8	387.0
POFA:Calcium carbonate = 5:25	349.2	390.1
POFA:Calcium carbonate = 15:15	353.6	393.8
POFA:Calcium carbonate = 25:5	358.1	395.6
POFA:Calcium carbonate = 30:0	352.1	393.2

อุณหภูมิการสลายตัวของยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติมผสมของเถ้าปาล์มน้ำมันกับซิลิกา เถ้าปาล์มน้ำมันกับเขม่าดำ และเถ้าปาล์มน้ำมันกับแคลเซียมคาร์บอเนตที่สัดส่วนต่างๆ แสดงในตารางที่ 5.6 พบว่า การใช้สารตัวเติมผสมของเถ้าปาล์มน้ำมันกับซิลิกา เถ้าปาล์มน้ำมันกับเขม่าดำและเถ้าปาล์มน้ำมันกับแคลเซียมคาร์บอเนตส่งผลให้อุณหภูมิเริ่มการสลายตัวและอัตราการสลายตัวสูงสุดมีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสูงกว่าการใช้สารตัวเติมเพียงตัวเดียวเป็นผลมาจากการใส่เถ้าปาล์มน้ำมันร่วมกับซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนตช่วยเพิ่มการกระจายตัวและการยึดติดระหว่างอนุภาคสารตัวเติมกับยางดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงขึ้นจึงต้องใช้ความร้อนสูงขึ้นในการสลายตัว ส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัวของยางเพิ่มขึ้นหรือมีความเสถียรทางความร้อนเพิ่มขึ้นนั่นเอง ส่วนการเพิ่มสัดส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันในสารตัวเติมผสมของเถ้าปาล์มน้ำมันกับเขม่าดำ ทำให้อุณหภูมิการสลายตัวสูงขึ้นเช่นกัน ถึงแม้การใส่เถ้าปาล์มน้ำมันจะเข้ากันได้กับยางน้อยกว่าซึ่งส่งผลต่อการกระจายตัวและการเกิดอันตรกิริยาของสารตัวเติมกับยาง ซึ่งสอดคล้องกับฐานวิทยาศาสตร์ (รูปที่ 5.30) แต่การใส่เถ้าปาล์มน้ำซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกามีค่าการนำความร้อนต่ำกว่าเขม่าดำ (Wypych, 1999) ทำให้การส่งผ่านของความร้อนไปยังเมทริกซ์ของยางต่ำกว่า ดังนั้นจึงทำให้การเสื่อมสลายทางความร้อนของยางที่ใช้สารตัวเติมผสมของเถ้าปาล์มน้ำมันกับเขม่าดำเกิดช้าลง

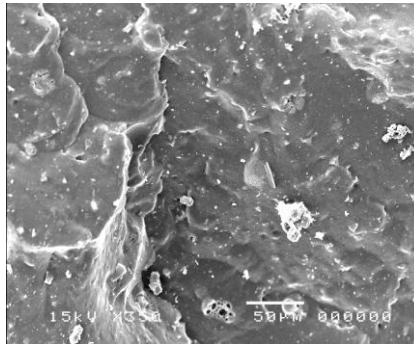
5.5.4 อิทธิพลของสารตัวเติมผสมระหว่างเฉี้าปล้น้ำมันกับสารตัวเติมทางการค้าต่อสัณฐานวิทยา



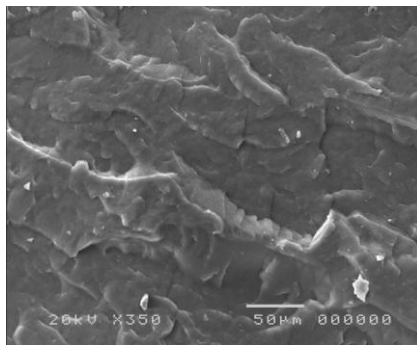
POFA



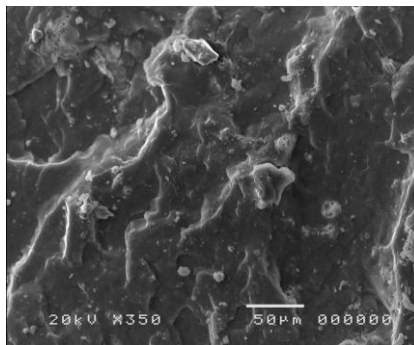
Silica



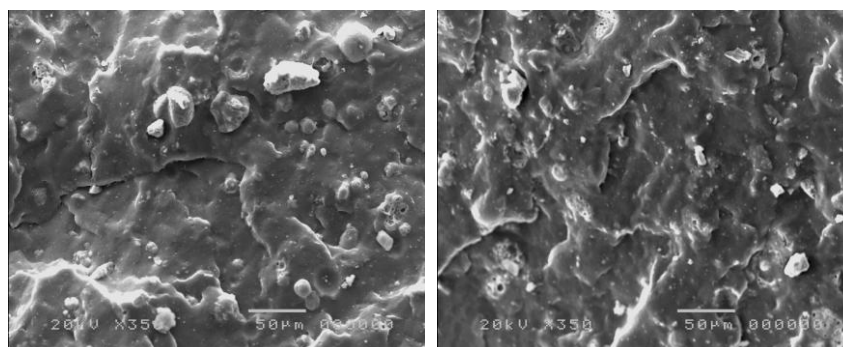
POFA:Silica = 15:15



Carbon black



POFA:Carbon black = 15:15



Calcium carbonate

POFA:Calcium carbonate = 15:15

รูปที่ 5.31 สัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติมผสมของเถ้าปาล์มน้ำมันกับซิลิกา เถ้าปาล์มน้ำมันกับเขม่าดำ และเถ้าปาล์มน้ำมันกับแคลเซียมคาร์บอเนตที่สัดส่วนเท่ากับ 15:15

สัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติมผสมของเถ้าปาล์มน้ำมันกับซิลิกา เถ้าปาล์มน้ำมันกับเขม่าดำ และเถ้าปาล์มน้ำมันกับแคลเซียมคาร์บอเนต แสดงในรูปที่ 5.31 พบว่า ยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติมจากเถ้าปาล์มน้ำมัน ซิลิกา และเขม่าดำ มีการกระจายตัวสม่ำเสมอ และมีการยึดเกาะระหว่างเฟสยางธรรมชาติกับสารตัวเติมที่ดีเนื่องจากมีขนาดอนุภาคเล็ก ส่วนแคลเซียมคาร์บอเนตมีการยึดเกาะระหว่างเฟสยางธรรมชาติกับอนุภาคไม่ดีเหมือนกับสารตัวเติมอื่นๆ ซึ่งทำให้มีพื้นที่ผิวยึดเกาะกับเนื้อยางและความต่อเนื่องของเฟสยางน้อยกว่า เมื่อใช้สารตัวเติมผสมระหว่างเถ้าปาล์มน้ำมันกับเขม่าดำ พบว่า ปัจจัยของขนาดอนุภาคสารตัวเติมและพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าปาล์มน้ำมันอาจส่งผลต่อการเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติมโดยรวมลดลง ซึ่งเห็นได้ว่าความเข้ากันหรือมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันระหว่างยางกับสารตัวเติมน้อยกว่าการใช้เขม่าดำเพียงอย่างเดียว ส่วนการใช้สารตัวเติมผสมระหว่างเถ้าปาล์มน้ำมันกับซิลิกาและเถ้าปาล์มน้ำมันกับแคลเซียมคาร์บอเนตพบว่า การกระจายตัวยังคงดีสม่ำเสมอ ซึ่งจากลักษณะสัณฐานวิทยาดังกล่าวสอดคล้องกับสมบัติเชิงกลที่ได้ (รูปที่ 5.27-5.30)

6. สรุปผลการทดลอง

เถ้าปาล์มน้ำมันประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญได้แก่ หมู่ไฮดรอกซิลที่เกิดพันธะไฮโดรเจนและของไฮลันอล ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3623 และ 3400.56 cm^{-1} หมู่ซิลอกเซนของพันธะ Si-O-Si ที่เลขคลื่น 1271.56 cm^{-1} และ 979.02 cm^{-1} เป็นต้น เมื่อวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในเถ้าปาล์มน้ำมัน พบว่า องค์ประกอบหลักคือ ซิลิกอนไดออกไซด์หรือซิลิกา 46.8 % รองลงมาคือ แคลเซียมออกไซด์ 23.2 % โพแทสเซียมออกไซด์ 10.8 % ไคฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ 7.150 และแมกนีเซียมออกไซด์ 3.259 ส่วนที่เหลือจะเป็นสารอื่นๆที่มีปริมาณน้อยลงไป สำหรับพื้นที่ผิวจำเพาะ พบว่า เมื่อเถ้าปาล์มมีขนาดอนุภาคเล็กส่งผลให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงขึ้น นอกจากนี้เถ้าปาล์มน้ำมันยังมีรูปร่างอนุภาคที่แตกต่างกัน ซึ่งมีทั้งที่เป็นรูปร่างทรงกลมตัน

และเป็นแท่งที่มีความพรุนสูง

ยางธรรมชาติที่เติมเถ้าปาล์มน้ำมันที่ปริมาณต่างๆ ตั้งแต่ 20, 30, 40, 50, 60 และ 70 phr ที่ขนาดอนุภาค 325 เมช พบว่า การเพิ่มปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันในยางธรรมชาติจนถึง 40 phr ส่งผลให้เวลาการสกออกและเวลาการวัลคาไนซ์ลดลง และหลังจากนั้น ส่งผลให้เวลาการสกออกและเวลาการวัลคาไนซ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ผลต่างแรงบิดซึ่งสัมพันธ์กับความหนาแน่นพันธะเชื่อมโยงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมัน เนื่องจากสารประกอบอนินทรีย์ โดยเฉพาะโลหะออกไซด์ที่มีผลในการช่วยเร่งปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์และทำให้ได้ปริมาณพันธะเชื่อมโยงสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่ามอดูลัส ณ การยืดตัว 100 เปอร์เซนต์และความแข็งที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ส่วนความทนต่อแรงดึงและความทนต่อการฉีกขาดมีค่าสูงสุดที่ปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมัน 30 phr หลังจากนั้นค่าความทนต่อแรงดึงและความทนต่อการฉีกขาดมีแนวโน้มลดลง อุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้น (onset temperature, T_{onset}) และอุณหภูมิที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักมากที่สุด (midpoint temperature, $T_{mid-point}$) ของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันที่เพิ่มขึ้นทำให้อนุภาคอยู่ใกล้กันและเกิดการรวมกลุ่มได้

อิทธิพลของขนาดอนุภาคเถ้าปาล์มน้ำมันต่อสมบัติการวัลคาไนซ์ พบว่า ยางธรรมชาติที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด คือ 120 เมช ให้ค่าเวลาสกออกและเวลาวัลคาไนซ์ของยางสั้นที่สุด รองลงมาคือ ยางที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่ขนาดอนุภาค 200 และ 325 เมช ตามลำดับ ส่วนค่าผลต่างแรงบิดของยางธรรมชาติที่เติมเถ้าปาล์มน้ำมันขนาดอนุภาค 325 เมช สูงกว่าการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่ 200 และ 120 เมช ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเติมเถ้าปาล์มน้ำมันขนาดอนุภาคเล็กมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับอนุภาคสารตัวเติมได้มาก จึงส่งผลให้ผลต่างแรงบิดสูง สมบัติเชิงกล (เช่น ค่ามอดูลัส ณ การยืดตัว 100 เปอร์เซนต์ ความทนต่อแรงดึง ความทนต่อการฉีกขาด เปอร์เซนต์การยืดตัว ณ จุดขาด และความแข็ง) และความเสถียรทางความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคเถ้าปาล์มน้ำมันเล็กลง ลักษณะวิทยาของยางที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่ขนาดอนุภาคต่างๆ พบว่า เถ้าปาล์มน้ำมันที่มีขนาดอนุภาค 325 เมช มีการกระจายตัวในยางธรรมชาติที่ดี และมีการยึดเกาะระหว่างเฟส (interfacial adhesion) ของยางกับอนุภาคเถ้าปาล์มน้ำมันที่ขนาด 325 เมช ดีกว่าที่ขนาด 200 และ 120 เมช ตามลำดับ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง

อิทธิพลของชนิดของสารตัวเติมทางการค้าเปรียบเทียบกับเถ้าปาล์มน้ำมันต่อสมบัติด้านต่างๆ ของยาง พบว่า ยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติมเถ้าปาล์มน้ำมันมีเวลาสกออกและเวลาวัลคาไนซ์น้อยกว่ายางธรรมชาติที่ไม่ใส่สารตัวเติมและใส่สารตัวเติมซิลิกา ตามลำดับ ส่วนผลต่างแรงบิดของยางที่ใส่เถ้าปาล์มน้ำมันสูงกว่าสารตัวเติมอื่นๆ ยกเว้นยางที่ใส่เขม่าดำ อาจเนื่องมาจากความเข้ากันได้ระหว่างยางกับสารตัวเติมเขม่าดำที่สูงกว่า สำหรับสมบัติเชิงกล ได้แก่ มอดูลัส ณ การยืดตัว 100 เปอร์เซนต์ ความทนต่อแรงดึง ความทนต่อการฉีกขาด เปอร์เซนต์การยืด ณ จุดขาด และความแข็ง ของยางที่ใส่เถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าใกล้เคียงกับซิลิกา แต่ยางที่ใส่เถ้าปาล์มน้ำมันมีความเสถียรต่อความร้อนสูงที่สุด จากลักษณะวิทยา พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมัน ซิลิกา และเขม่าดำมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ และมีการยึดเกาะระหว่างเฟสยางธรรมชาติกับสารตัวเติมดีกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต

อิทธิพลของชนิดของสารตัวเติมผสมของถั่วปาล์มน้ำมันกับสารตัวเติมทางการค้า (ซิลิกา เชม่าดำ และแคลเซียมคาร์บอเนต) ต่อสมบัติการคงรูป พบว่าเมื่อสัดส่วนของถั่วปาล์มน้ำมันในสารตัวเติมผสมทุกชนิดเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาสก๊อชและเวลาในการวัลคาไนซ์ลดลง ส่วนค่าผลต่างแรงบิดของยางที่ใช้สารตัวเติมผสม พบว่าการเพิ่มสัดส่วนถั่วปาล์มน้ำมันในสารตัวเติมผสมของถั่วปาล์มน้ำมันกับซิลิกาและถั่วปาล์มน้ำมันกับแคลเซียมคาร์บอเนต ทำให้มีค่าผลต่างแรงบิดสูงขึ้น ในขณะที่ยางที่ใช้ถั่วปาล์มน้ำมันร่วมกับเชม่าดำมีค่าลดลง สำหรับสมบัติเชิงกล ค่ามอดูลัส ณ การยืดตัว 100 เปอร์เซ็นต์ ความทนต่อแรงดึงและความทนต่อการฉีกขาดของยางธรรมชาติที่สารตัวเติมผสมของถั่วปาล์มน้ำมันร่วมกับสารตัวเติมชนิดต่างๆ พบว่าการเพิ่มสัดส่วนถั่วปาล์มน้ำมันในสารตัวเติมผสมของถั่วปาล์มน้ำมันกับซิลิกาและถั่วปาล์มน้ำมันกับแคลเซียมคาร์บอเนต ทำให้มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความสามารถในการยืดของยาง ณ จุดขาดมีค่าลดลงเล็กน้อย สำหรับการใส่สารตัวเติมผสมของถั่วปาล์มน้ำมันกับเชม่าดำกลับมีค่าความทนต่อแรงดึงและความทนต่อการฉีกขาดลดลง ส่วนความสามารถในการยืดของยาง ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ความแข็งของยางที่ใช้ถั่วปาล์มน้ำมันร่วมกับสารตัวเติมซิลิกาและเชม่าดำนั้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนถั่วปาล์มน้ำมันทำให้ค่าความแข็งของยางมีแนวโน้มลดลงแต่ไม่แตกต่างจากแต่ละสัดส่วนมากนัก ในขณะที่การใส่สารตัวเติมผสมของถั่วปาล์มน้ำมันกับแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าเพิ่มขึ้น ความเสถียรทางความร้อนของยางที่ใช้สารตัวเติมผสมของถั่วปาล์มน้ำมันกับซิลิกา ถั่วปาล์มน้ำมันกับเชม่าดำและถั่วปาล์มน้ำมันกับแคลเซียมคาร์บอเนตสูงกว่าการใส่สารตัวเติมเพียงตัวเดียว จากฐานฐานวิทยาของยางที่ใช้สารตัวเติมผสมระหว่างถั่วปาล์มน้ำมันกับเชม่าดำ พบว่าความเข้ากันหรือมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันระหว่างยางกับสารตัวเติมน้อยกว่าการใช้เชม่าดำเพียงอย่างเดียว ส่วนการใส่สารตัวเติมผสมระหว่างถั่วปาล์มน้ำมันกับซิลิกาและถั่วปาล์มน้ำมันกับแคลเซียมคาร์บอเนตมีการกระจายตัวดีสม่ำเสมอ

จากการศึกษาสมบัติทั้งหมดข้างต้น พบว่า สามารถนำถั่วปาล์มน้ำมันมาใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงในยางธรรมชาติได้และยังให้สมบัติที่เหนือกว่าการใช้ซิลิกาทางการค้าในด้านสมบัติการวัลคาไนซ์ ได้แก่ ระยะเวลาสก๊อชและเวลาวัลคาไนซ์ที่น้อยกว่า ซึ่งเป็นสิ่งที่มีประโยชน์ต่อกระบวนการขึ้นรูปยางโดยจะช่วยลดเวลาในการผลิตได้ และยังให้ค่าผลต่างแรงบิดที่สูงกว่าซึ่งบ่งบอกถึงมีความหนาแน่นพันธะเชื่อมโยงมากกว่า นอกจากนี้การใช้ถั่วปาล์มน้ำมันในปริมาณ 30 phr ซึ่งให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด (ได้แก่ มอดูลัส ความทนต่อแรงดึง ความทนต่อการฉีกขาด เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดและความแข็ง) และมีค่าใกล้เคียงกับการใช้ซิลิกา นอกจากนี้การใช้ถั่วปาล์มน้ำมันเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติยังช่วยเพิ่มความเสถียรทางความร้อนได้ดีกว่าการใช้ซิลิกาและสารตัวเติมอื่นๆ

เมื่อเปรียบเทียบถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของสารตัวเติมจากถั่วปาล์มน้ำมัน ทั้งขั้นตอนการรวบรวมถั่วปาล์ม ซึ่งสามารถเก็บรวบรวมได้โดยตรงจากอุตสาหกรรมปาล์ม เนื่องจากโรงงานจะทำการแยกกองถั่วปาล์มไว้อยู่แล้ว จึงไม่ยุ่งยากในการเก็บ ส่วนประสิทธิภาพของสารตัวเติมจากถั่วปาล์มน้ำมันเปรียบเทียบกับ

สารตัวเติมทางการค้า (ขมิ้นดำ และซิลิกา) ในปริมาณการใช้เดียวกันก็ให้ประสิทธิที่ใกล้เคียงกับสารตัวเติมเสริมแรงทางการค้า เช่น ซิลิกา ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าสารเติมแต่งจากถ้ำปาล์มน้ำมันความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการเพิ่มมูลค่าของของเสียที่เกิดขึ้นจากการผลิต ช่วยลดการนำเข้าของสารเติมแต่ง และช่วยลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม รวมทั้งลดพื้นที่จัดเก็บและพื้นที่สำหรับกำจัดถ้ำปาล์ม

7. คำขอบคุณ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้การสนับสนุนการศึกษาวิจัยอย่างดียิ่งตลอดโครงการ

8. ข้อเสนอแนะ

- ควรมีการศึกษาการใช้สารคู่ควบเพื่อพัฒนาการเสริมแรงของถ้ำปาล์มน้ำมัน

เอกสารอ้างอิง

- ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. ถ้ำปลาลมน้ำมัน: วัสดุพอลิโพรพิลีนในอนาคตสำหรับคอนกรีต. วารสารคอนกรีต, ฉบับที่ 9, ประจำเดือนเมษายน 2553
- พงษ์ธร แซ่ฮุย. ยาง ชนิด สมบัติ และการใช้งาน. พิมพ์ครั้งที่ 2. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะวัสดุแห่งชาติ. 2548
- ศูนย์สารสนเทศการเกษตร, สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2545, สถิติการเกษตรแห่งประเทศไทย ปีเพาะปลูก 2544/2545, เล่มที่ 43, หน้า 121.
- สุรพันธ์ สุคันธปริย์, ชรินทร์ นมรักษ์ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. การใช้กากแกลเลียมคาร์ไบด์และถ้ำปลาลมน้ำมันในงานคอนกรีต. การประชุมใหญ่ทางวิศวกรรม ประจำปี 2545, 20-23 มิถุนายน, กรุงเทพฯ, หน้า 191-199.
- อรสา ภัทรไพบุญชัย, ปัทมา อารีศิริสุข และ มาณวิกา แซ่จัน. ศึกษาการใช้ผงปลาลมน้ำมันเพื่อเป็นสารตัวเติมในยวกรรมชาติ. 2549. บทสรุปและการสังเคราะห์โครงการวิจัยขนาดเล็กเรื่องยางพารา ปี 2546-2549, เล่มที่ 1, หน้า 9
- เอกชัย วิมลมาลา, ชีระศักดิ์ หมากรผิน และ ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ. การศึกษาวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางเอสปีอาร์ที่มีถ้ำลอมเป็นสารเติมแต่งโดยใช้สารคู่ควบไซเลนชนิด Si69 สำหรับปรับปรุงผิวถ้ำลอม. 2549. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร, 29 (3), หน้า 353-373.
- Chin, L.H., Hameed, B.H. and Ahmad, A.L. Process optimization for biodiesel production from waste cooking palm oil (*Elaeis guineensis*) using response surface methodology. *Energy Fuels.*, 2009, 1–6.
- Chindaprasirt, P., Rukzon, S. and Sirivivatnanon, V. Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash and fly ash, *Constr. Build. Mater.*, 2008, 22, 932–938.
- Da Costa, H.M., Visconte, L.L.Y., Nunes, R.C.R. and Furtado, C.R.G. Mechanical and dynamic mechanical properties of rice husk ash-filled natural rubber compounds. *J. Apply. Polym. Sci.*, 2002, 83, 2331-2346.
- Foo, K.Y. and Hameed, B.H. Value-added utilization of oil palm ash: A superior recycling of the industrial. *J. Hazard. Mater.*, 2009, 172, 523–531.
- Kroehong, W. , Sinsiri, T., Jaturapitakkul, C. and Chindaprasirt, P. Effect of palm oil fuel ash fineness on the microstructure of blended cement paste. *Cons. Build. Mt.*, 2011, 25, 4095–4104.

- Ismail, H. and Haw, F.S. Effects of palm ash loading and maleated natural rubber as a coupling agent on the properties of palm-ash-filled natural rubber composites. *J. Apply. Polym. Sci.*, 2008, 110, 2867–2876.
- Ismail, H., Rosnah, N. and Rozman, H. D. Curing characteristics and mechanical properties of short oil palm fibre reinforced rubber composites. *Polymer.*, 1998, 38, 4059–4064.
- Ismail, H., Rosnah, N. and Rozman, H. D. The effects of partial replacement of oil palm wood flour by silica and silane coupling agent on properties of natural rubber compounds. *J. Polym. Test.*, 2001, 33–41.
- Ismail, H. and Shaari, S.M. Curing characteristics, tensile properties and morphology of palm ash/halloysite nanotubes/ethylene-propylene-diene monomer (EPDM) hybrid composite. *J. Polym. Test.*, 2010, 29, 872–878.
- Tangchirapat, W., Saeting, T., Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K. and Siripanichgorn, A. Use of waste ash from palm oil industry in concrete. *Waste Management.*, 2007, 27, 81–88.
- Tonnayopas, D., Nilrat, F., Putto, K. and Tantiwitayawanich, J. Effect of Oil Palm Fiber Fuel Ash on Compressive Strength of Hardening Concrete. The Fourth Thailand Materials Science and Technology Conference. March 31- April 1, 2006.
- Wypych, G. Handbook of fillers. Chem Tec, Toronto, 1999, 289-290.

ภาคผนวก

บทความสำหรับการเผยแพร่ -กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการนำผลจากโครงการไปใช้ประโยชน์ -ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์กิจกรรมที่วางแผนไว้ กิจกรรมที่ดำเนินการมาและผลที่ได้รับตลอดโครงการ

กิจกรรม (ตามแผน)	วัตถุประสงค์	ผลการดำเนินงาน	ผลที่ได้รับ
1. ศึกษาการเตรียมเต้าปาล์มให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการใช้เป็นสารตัวเติม โดยการร่อนผ่านตะแกรง sieve เพื่อแยกสิ่งปนเปื้อนออกและจำแนกขนาดอนุภาคของผงเต้าปาล์ม	เพื่อทราบการเตรียมเต้าปาล์มน้ำมันเพื่อนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ	นำเต้าปาล์มน้ำมันมีลักษณะเป็นผงอยู่แล้วแต่มีลักษณะที่เป็นผงหยาบและละเอียดปนกัน ดังนั้นจึงทำการเตรียมผงเต้าปาล์มให้เป็นผงที่มีความละเอียดและสม่ำเสมอโดยนำมาร่อนผ่านตะแกรงคัดแยกขนาดที่ 120, 200 และ 325 เมช เพื่อแยกสิ่งปนเปื้อนออกและจำแนกขนาดอนุภาคของผงเต้าปาล์ม	ได้ผงเต้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดและสม่ำเสมอตามขนาดอนุภาคที่คัดแยกไว้
2. ศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเต้าปาล์มน้ำมัน ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ขนาดอนุภาค พื้นที่ผิวจำเพาะ ความเป็นกรด-ด่าง และองค์ประกอบทางเคมี เป็นต้น	เพื่อทราบลักษณะพื้นฐานและองค์ประกอบของเต้าปาล์มน้ำมันสำหรับใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ	ได้นำเต้าปาล์มน้ำมันไปวิเคราะห์โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปีและเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ ตามลำดับ ศึกษาสัณฐานวิทยาของอนุภาคเต้าปาล์มน้ำมันที่เตรียมได้ก่อนและหลังผ่านตะแกรงคัดแยกขนาดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รวมถึงวัดพีเอช (ASTM D1512) และความถ่วงจำเพาะด้วยวิธีพิคโนมิเตอร์ (glass pyknometer) เพื่อทราบสมบัติเอกลักษณ์พื้นฐานของเต้าปาล์มน้ำมันเพื่อนำไปสู่การใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติและเปรียบเทียบกับสารตัวเติมชนิดอื่นๆในทางการค้า เช่น ซิลิกา เหมดำ และแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น	ทราบสมบัติพื้นฐานของเต้าปาล์มน้ำมันพบว่าเต้าปาล์มน้ำมันมีองค์ประกอบหลักทางเคมี คือ ซิลิกอนไดออกไซด์หรือซิลิกา 46.8 % และพบหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญคือหมู่ไฮดรอกซิลของโซลานอลและหมู่ไฮลอกเซน นอกจากนี้เต้าปาล์มน้ำมันยังมีรูปร่างอนุภาคที่แตกต่างกัน ซึ่งมีทั้งที่เป็นรูปร่างทรงกลมตันและเป็นแท่งที่มีความพรุนสูง มีค่าพีเอชเท่ากับ 9.8 ส่วนความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วง 1.97-2.14

กิจกรรม (ตามแผน)	วัตถุประสงค์	ผลการดำเนินงาน	ผลที่ได้รับ
3.ศึกษาอิทธิพลของปริมาณและขนาดอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อสมบัติของยางธรรมชาติคอมปาวด์และยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ ได้แก่ สมบัติการไหล สมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อน สมบัติทนต่อตัวทำละลาย สันฐานวิทยา และความแข็ง เป็นต้น	เพื่อทราบอิทธิพลของการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นสารตัวเติมเมื่อแปรปริมาณและขนาดอนุภาคต่อสมบัติต่างๆของยาง	นำเถ้าปาล์มน้ำมันที่เตรียมได้ไปใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติโดยศึกษาอิทธิพลของปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันเมื่อกำหนดใช้ขนาดเถ้าปาล์มน้ำมัน 325 เมช และขนาดอนุภาค ได้แก่ 120, 200 และ 325 เมช ที่ปริมาณ 30 phr ที่มีต่อสมบัติการวัลคาไนซ์ สมบัติเชิงกล ความเสถียรทางความร้อน และสันฐานวิทยาของยางธรรมชาติ	ทราบผลของการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันในยางธรรมชาติ เมื่อแปรปริมาณและขนาดอนุภาคพบว่า การใช้เถ้าปาล์มที่ปริมาณ 30 phr ที่ขนาดอนุภาค 325 เมช ให้สมบัติเชิงกล (ความทนต่อแรงดึงและความทนต่อการฉีกขาด)ดีที่สุด ส่วนความเสถียรทางความร้อนของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าปาล์มน้ำและขนาดอนุภาคที่ลดลง สำหรับพฤติกรรมการวัลคาไนซ์ ได้แก่ เวลาสกอชและเวลาวัลคาไนซ์ลดลงตามปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันในขณะขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น จึงเห็นได้ว่าเถ้าปาล์มน้ำมันสามารถนำมาใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงได้ โดยช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อน และลักษณะการวัลคาไนซ์ นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันที่เพิ่มขึ้นทำให้อนุภาคอยู่ใกล้กันและเกิดการรวมกลุ่มได้ โดยเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีขนาดอนุภาคเล็ก (325 เมช) มีการกระจายตัวในยางธรรมชาติ และมีการยึดเกาะระหว่างเฟสดีกว่าขนาดใหญ่ (200 และ 120 เมช ตามลำดับ)

กิจกรรม (ตามแผน)	วัตถุประสงค์	ผลการดำเนินงาน	ผลที่ได้รับ
4.ศึกษานิคมของสารตัวเดิมโดยใช้ผงเถ้าปาล์ม เปรียบเทียบผงเถ้าปาล์ม น้ำมัน กับ ซิลิกา เหมาดำ และแคลเซียม-คาร์บอเนต ต่อ สมบัติของยางธรรมชาติคอมปาวด์และยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ ได้แก่ สมบัติการไหล สมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อน สมบัติทนต่อตัวทำละลาย สันฐานวิทยา และความแข็ง เป็นต้น	เพื่อทราบอิทธิพลของการใช้เถ้าปาล์มน้ำมัน เป็น สารตัวเดิมเมื่อแปรปริมาณและขนาดอนุภาค ต่อ สมบัติต่างๆของยาง	นำเถ้าปาล์มน้ำมันที่สภาวะที่ดีที่สุดจากข้างต้นคือการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่ปริมาณ 30 phr ที่ขนาดอนุภาค 325 เมช ไปใช้เป็นสารตัวเดิมในยางธรรมชาติเปรียบเทียบกับสารตัวเดิมต่างๆในทางการค้า ได้แก่ ซิลิกา เหมาดำ และแคลเซียมคาร์บอเนต ที่มีต่อสมบัติการวัลคาไนซ์ สมบัติเชิงกล ความเสถียรทางความร้อน และสันฐานวิทยาของยางธรรมชาติ	เมื่อเปรียบเทียบชนิดของเถ้าปาล์มน้ำมันกับสารตัวเดิมทางการค้า พบว่า ยางธรรมชาติที่ได้สารตัวเดิมเถ้าปาล์มน้ำมันมีเวลาสกอชและเวลาวัลคาไนซ์น้อยกว่าซิลิกาแต่มากกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตและเหมาดำเล็กน้อย สำหรับสมบัติเชิงกลของยางที่ได้เถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าใกล้เคียงกับซิลิกา แต่เถ้าปาล์มน้ำมันทำให้ยางมีความเสถียรต่อความร้อนสูงกว่าสารตัวเดิมอื่นๆ
5.ศึกษาประสิทธิภาพของการใช้สารตัวเดิมร่วมระหว่างผงเถ้าปาล์ม น้ำมันกับซิลิกา ผงเถ้าปาล์ม น้ำมันกับเหมาดำ และผงเถ้าปาล์ม น้ำมันกับแคลเซียมคาร์บอเนต ต่อ สมบัติของยางธรรมชาติ ได้แก่ สมบัติการไหล สมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อน สมบัติทนต่อตัวทำละลาย สันฐานวิทยา และความแข็ง เป็นต้น	เพื่อทราบอิทธิพลของการใช้เถ้าปาล์มน้ำมัน เป็น สารตัวเดิมเมื่อแปรปริมาณและขนาดอนุภาค ต่อ สมบัติต่างๆของยาง	นำเถ้าปาล์มน้ำมันไปใช้เป็นสารตัวเดิมผสมร่วมกับสารตัวเดิมทางการค้าชนิดต่างๆ ได้แก่ ซิลิกา เหมาดำ และแคลเซียมคาร์บอเนต ที่สัดส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันต่อสารตัวเดิมทางการค้า เท่ากับ 0:30, 5:25, 15:15, 25:5 และ30:0 ที่มีต่อสมบัติการวัลคาไนซ์ สมบัติเชิงกล ความเสถียรทางความร้อน และสันฐานวิทยาของยางธรรมชาติ	การใช้สารตัวเดิมผสมของเถ้าปาล์มน้ำมันกับสารตัวเดิมทางการค้า พบว่า เมื่อสัดส่วนของเถ้าปาล์มน้ำมันในสารตัวเดิมผสมทุกชนิดเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เวลาสกอชและเวลาวัลคาไนซ์ลดลง สำหรับสมบัติเชิงกล พบว่าการเพิ่มสัดส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันในสารตัวเดิมผสมของเถ้าปาล์มน้ำมันกับซิลิกาและเถ้าปาล์ม น้ำมันกับแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าเพิ่มขึ้น แต่การใช้สารตัวเดิมผสมของเถ้าปาล์มน้ำมันกับเหมาดำมีค่าลดลงเล็กน้อย ส่วนความสามารถในการยืดจนขาดของยางให้ค่าตรงข้าม ความเสถียรทางความร้อนของยางที่ใช้สารตัวเดิมผสมสูงกว่าการใช้สารตัวเดิมเพียงตัวเดียว

สรุปข้อคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิ

ข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ	ชี้แจงโดยนักวิจัย
ความเห็นด้านวิชาการ 1. ให้อธิบายการได้ POFA มาด้วย เพราะสมบัติขึ้นอยู่กับ boiler feed บางขณะที่ส่งการผลิตจะใส่กะลา ซึ่งมีผลต่อ composition ของ POFA การทดลองนี้เอา POFA มา lot เดียวเท่านั้นใช่หรือไม่ ทุกการทดลองใช้ POFA ที่เชื่อว่ามีองค์ประกอบตามตารางที่ 5.1 ขอให้เขียนให้ชัดเจน 2. ปกติถ้าจะมีการหลอมตัว และเป็นไปได้หรือไม่ที่ผ่านตะแกรง mesh ต่างกัน จะมีองค์ประกอบต่างกัน ควรวิเคราะห์ในประเด็นนี้ด้วย หรือเอาไปไว้ในตอนเขียนเปเปอร์ก็ได้ 3. ควรระมัดระวังการระบุปริมาณสารตัวเดิมที่ทดลองให้ถูกต้อง ไม่ควรรายงาน 0-? เช่น 0-70 phr (หน้า iv), 0-40 phr (ii) เพราะนักวิจัยแปรปริมาณเป็นช่วงๆเท่านั้น จึงควรระบุปริมาณที่ทดลองจริง	ได้ปรับเพิ่มรายละเอียดเพื่อให้ชัดเจนตามข้อแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิในหน้าที่ 5 และ 13 ลักษณะความแตกต่างของอนุภาคเถ้าปาล์มน้ำมันที่ถูกร้อนผ่านตะแกรง mesh ต่างกัน นั้นไม่ส่งผลต่อความแตกต่างขององค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน เนื่องจากเศษวัสดุปาล์มน้ำมันที่เหลือประเภท เส้นใยปาล์ม, ทะลายปาล์ม และกะลาปาล์ม ซึ่งถูกใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงสำหรับ boiler จะถูกเผาภายใต้สภาวะการเผาไหม้เดียวกัน (800-1200°C) เพื่อผลิตไอน้ำ ดังนั้นลักษณะขององค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มที่ได้จึงไม่มีลักษณะแตกต่างกัน โดยการดำเนินการคัดแยกอนุภาคของเถ้าปาล์มในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อคัดขนาดของอนุภาคของเถ้าปาล์มที่มีขนาดเดียวกันใช้ในเป็นสารเติมแต่ง ได้ปรับแก้การรายงานค่าในหน้าที่ ii, iv และ v ตามข้อแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ

4. ควรรายงานชนิดยางธรรมชาติที่ใช้ว่าเป็นชนิดยางแท่ง หรือยางแผ่นรมควัน หรือยางอะไร 5. การรายงานรายละเอียดตารางสารต่างๆที่ใช้ เช่น ตารางที่ 4.3 นั้น สามารถที่จะสรุปให้สั้นๆ ไม่ยืดเยื้อได้ เนื่องจากมีสารที่เป็นพื้นฐานที่ใช้เหมือนกันทุกๆการทดลอง คือ ยาง, stearic acid, zinc oxide, wingstay L, TMTM, sulphur ที่สามารถรายงานครั้งเดียว ส่วนสารตัวเดิมทั้ง 4 ชนิดมีการแปรปริมาณก็รายงานว่าแต่ละชนิดแปรอย่างไร และมีการผสมอย่างไร ก็จะช่วยให้รายงานกระชับขึ้นได้ 6. กราฟที่แสดงเกี่ยวกับ scorch/cure time ต้องระบุอุณหภูมิของการ cure ไว้ด้วย 7. ค่า tensile strength ไม่น่าถูกต้อง/ไม่น่าเชื่อถือ โดยเฉพาะค่าที่ได้จากการใช้ silica หรือ เหมดำที่ปริมาณ 30 phr นั้น ต่ำเกินความเป็นจริงโดยทั่วไป และค่าที่ไม่ใช้สารตัวเดิมซึ่งถือเป็น pure gum strength ของ NR ก็ต่ำมากเกินไปเกินจริง 8. ต้องตรวจสอบความถูกต้องและรายละเอียดของแผ่นสุดท้ายที่เป็นร่างโปสเตอร์ เนื่องจากยังไม่เหมาะสม มีความบกพร่องหลายแห่ง ทำให้ผู้อ่านไม่สามารถเข้าใจได้	ได้ระบุชนิดยางธรรมชาติในหน้าที่ 4 ได้ปรับแก้การรายงานในตารางที่ 4.3 ให้มีความกระชับตามข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ ได้ระบุอุณหภูมิของกราฟในการรายงาน scorch/cure time ตามข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ ได้ทดลองซ้ำและตรวจสอบความถูกต้องของค่าที่ได้ ได้ตรวจสอบความถูกต้องและรายละเอียดของร่างโปสเตอร์ให้เหมาะสมตามข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ
---	--

9. การเตรียม POFA อบ 110°C เวลา 24 ชั่วโมง แล้วร้อนผ่านตะแกรงขนาดที่ต้องการ เป็นการเตรียมจำนวนน้อยๆ พอในการทดลองเท่านั้น ถ้าผู้วิจัยเพิ่มองค์ความรู้ที่จะดำเนินการนำ POFA ไปใช้ในปริมาณมากๆ ในการผลิตเชิงอุตสาหกรรมและพร้อมใช้งาน เป็นต้น ก็จะทำให้คุณค่าของงานวิจัยสูงขึ้น	ในการดำเนินการนำเถ้าปาล์มน้ำมันไปใช้ในปริมาณมากๆ ในเชิงพาณิชย์หรืออุตสาหกรรม สามารถดำเนินการได้โดยการนำเถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้ไปอบด้วยเตาอบที่สภาวะดังกล่าวเพื่อไล่ความชื้นที่อยู่ในเถ้าปาล์ม น้ำมันออกไปก่อนนำไปใช้งาน อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการประหยัดพลังงานที่ใช้ในการอบเถ้าปาล์ม สามารถดำเนินการได้โดยการนำพลังงานความร้อนจาก stream ที่เหลืออยู่มาผ่านขั้นตอนการกำจัดไอน้ำออกก่อนที่จะนำความร้อนที่ได้ไปผ่านเถ้าปาล์มน้ำมันเพื่อไล่ความชื้นในเถ้าปาล์มน้ำมัน แล้วร้อนผ่าน Auto sieve ในการคัดแยกขนาดอนุภาคต่อไป
10. วิธีการที่จะรวบรวม หรือแหล่งที่นำ POFA มาใช้ในเชิงพาณิชย์ ทำได้ อย่างไร ก็จะเป็นการเพิ่มคุณค่าการนำงานวิจัยไปต่อยอดได้ สู่อุตสาหกรรม POFA เชิงพาณิชย์ต่อไป	เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นของเสียที่ไม่อันตรายที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรของปาล์มน้ำมัน ซึ่งสามารถเก็บรวบรวมได้ทางภาคใต้ของประเทศไทยซึ่งเป็นแหล่งปลูกปาล์มน้ำมันที่สำคัญ อย่างไรก็ตามองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้จากแต่ละแหล่งย่อมมีลักษณะที่แตกต่างกันอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ อย่างไรก็ตามในการนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาประยุกต์ใช้เป็นสารตัวเติม ซึ่งลักษณะขององค์ประกอบที่ต่างกันจะถูกวิเคราะห์ถึงปริมาณองค์ประกอบอื่นๆ ที่จำเป็นจะต้องปรับเติมเพื่อให้เถ้าปาล์มมีคุณสมบัติเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งาน เมื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเติมทางการค้า
11. เมื่อกล่าวถึงเรื่องการรวบรวมเถ้าปาล์มน้ำมัน ในเชิงพาณิชย์ ก็ควรจะศึกษาเรื่อง ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ด้วย	หากเปรียบเทียบถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของสารเติมแต่งจากเถ้าปาล์มน้ำมัน ทั้งการรวบรวมเถ้าปาล์มที่สามารถเก็บรวบรวมได้โดยตรงจากอุตสาหกรรมปาล์ม ไม่ยุ่งยากซับซ้อน เนื่องจากในอุตสาหกรรมปาล์มจะทำการแยกกองเถ้าปาล์มไว้อยู่แล้ว และประสิทธิภาพของสารตัวเติมจากเถ้าปาล์มน้ำมันเปรียบเทียบกับสารเติมแต่งทางการค้า (เขม่าดำ และซิลิกา) ในปริมาณสัดส่วนการนำไปประยุกต์ใช้เดียวกัน ถ้าให้ประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกันกับสารตัวเติมทางการค้า ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าสารเติมแต่งจากเถ้าปาล์มน้ำมันความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ในการเพิ่มมูลค่าของของเสียที่เกิดขึ้นจากการผลิต ช่วยลดการนำเข้าของสารเติมแต่ง และช่วยลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมในการกำจัดเถ้าปาล์ม ซึ่งได้เขียนเพิ่มเติมไว้ในข้อสรุป