สัญญาเลขที่ RDG5150046

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ ยางผสมระหว่างยางฟลูออโรคาร์บอนและยางธรรมชาติกราฟต์สำหรับเครื่องยนต์แก๊โซฮอล

คณะผู้วิจัย	สังกัด
1. ผศ.ดร.นพิดา หิญชีระนันทน์	ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. นายรัชภูมิ เจริญไทยพานิช	ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
3. นายชาญณรงค์ ศรสุวรรณวุฒิ	ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปย่อรายงานสำหรับผู้บริหาร

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) ยางผสมระหว่างยางฟลูออโรคาร์บอนและยางธรรมชาติกราฟต์สำหรับเครื่องยนต์แกโซฮอล

(ภาษาอังกฤษ) Rubber Blends Consisting of Fluorocarbon Rubber and Grafted Natural Rubber for Gasohol Engine

ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานสังกัด และที่อยู่

ชื่อ-สกุล ผศ.ดร. นพิดา หิญชีระนันทน์

หน่วยงาน ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ที่อยู่ ถ.พญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพ ฯ 10330

โทรศัพท์ 02-218-7523, 02-218-7677, 089-927-4242 **โทรสาร** 02-255-5831

E-mail address Napida.H@chula.ac.th, napida_h@yahoo.com

นักศึกษา/ผู้ร่วมวิจัย นายรัชภูมิ เจริญไทยพานิช นายชาญณรงค์ ศรสุวรรณวุฒิ

ปัญหาที่ทำวิจัยและความสำคัญ

เนื่องจากในปัจจุบันทั่วโลกประสบปัญหาการขาดแคลนแหล่งพลังงาน ดังนั้นประเทศต่าง ๆ จึงหันมาสนใจการใช้พลังงานทดแทน สำหรับประเทศไทยแหล่งพลังงานทดแทนที่น่าสนใจได้มาจากพลังงานชีวมวล (Biomass) รวมทั้งการใช้แอลกอฮอล์ เช่น น้ำมันแกโซฮอล (Gasohol) อย่างไรก็ตามแอลกอฮอล์ในน้ำมันแกโซฮอลทำให้ชิ้นส่วนที่ทำจากยางไนไทรล์ในเครื่องยนต์เสื่อมสภาพ ดังนั้นจึงหันมาใช้ยางฟลูออโรคาร์บอน (Fluorocarbon rubber) ซึ่งมีเสถียรภาพต่อสารเคมีต่าง ๆ ได้ดี แต่ยางฟลูออโรคาร์บอนมีราคาสูงมาก ดังนั้นจึงมีแนวคิดลดต้นทุนการผลิตโดยนำยางฟลูออโรคาร์บอนมาผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่มีราคาถูกกว่า และเพื่อเป็นการเพิ่มคุณค่าและมูลค่าให้กับยางธรรมชาติ จึงมีแนวคิดในการพัฒนาโครงสร้างของยางธรรมชาติซึ่งไม่มีขั้วให้สามารถนำมาผสมกับยางฟลูออโรคาร์บอนซึ่งเป็นสารที่มีขั้วได้ โดยในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิคการกราฟต์โคพอลิเมอร์ไรเซชันของพอลิเมทิลเมทาคริเลตบนยางธรรมชาติ ทำให้ยางธรรมชาติมีหมู่อะคริเลตและมีสภาพขั้วเพิ่มขึ้น เพื่อให้สามารถผสมเข้ากันได้กับยางฟลูออโรคาร์บอน

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาวิธีการและเทคนิคของการกราฟต์โคพอลิเมอไรเซชันเมทิลเมทาคริเลตบนยางธรรมชาติแบบอิมัลชัน (Emulsion graft copolymerization)
2. เพื่อเตรียมยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกราฟต์ด้วยเมทิลเมทาคริเลตกับยางฟลูออโรคาร์บอนให้มีความต้านทานต่อความร้อนและน้ำมันแกโซฮอล

ผลการดำเนินงาน

1. ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

1.1 การสังเคราะห์ยางธรรมชาติกราฟต์เมทิลเมทาคริเลต

สังเคราะห์ยางธรรมชาติกราฟต์ด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตในระบบอิมัลชันกราฟต์โคพอลิเมอไรเซชันโดยใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยา Cumene hydroperoxide (CHPO) และ Tetraethylene pentamine (TEPA) อัตราส่วนโดยน้ำหนักของยางธรรมชาติต่อมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลตที่ศึกษา ได้แก่ 1:0.3 1:0.5 1:0.75 และ 1:1.0 ทำปฏิกิริยาที่ 60°ซ เป็นเวลา 6 ชม. เมื่อเสร็จสิ้นปฏิกิริยาตกตะกอนผลิตภัณฑ์ด้วยเอทานอลแล้วจึงนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 40°ซ

1.2 การผสมยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติกราฟต์กับยางฟลูออโรคาร์บอน

นำยางธรรมชาติ (STR-5L) หรือยางธรรมชาติกราฟต์ และยางฟลูออโรคาร์บอน (Viton GF600S) มานวดและผสมกันโดยใช้เครื่อง Two-roll mill ที่อุณหภูมิห้องที่อัตราส่วน 100/0 70/30 50/50 30/70 และ 0/100 สารวัลคาไนซ์ที่ใช้ในระบบ คือ 2,5-dimethyl-2,5-di(t-butyl peroxy) hexane (PO) 1 phr และ Triallyl isocyanulate (TAIC) 2 phr ขึ้นรูปยางผสมด้วยเครื่อง Two-plate hydraulic press ที่ 170 °ซ ความดัน 150 กก./ตร.ซม. ใช้ระยะเวลาในการขึ้นรูปตามข้อมูลที่ได้จากเครื่อง Oscillating Disk Rheometer (ODR) ที่ 170°ซ เช่นกัน

2. การวิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์กราฟต์ที่ได้

2.1 การหาสมบัติการกราฟต์ของยางธรรมชาติกราฟต์

ผลิตภัณฑ์กราฟต์ที่ได้นำมาสกัดร้อน (Soxhlet extraction) ด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์และอะซีโตนเพื่อหาปริมาณยางธรรมชาติกราฟต์เมทิลเมทาคริเลต (Grafted natural rubber, GNR) ยางธรรมชาติที่ไม่เกิดปฏิกิริยากราฟต์ (Free natural rubber, Free NR) และเมทิลเมทาคริเลตที่เหลือจากการกราฟต์ (Free methacrylate, Free MMA) คำนวณหาร้อยละของการเปลี่ยนแปลงมอนอเมอร์ (%Conversion) และร้อยละของประสิทธิภาพการกราฟต์ (%Grafting efficiency, %GE) จากปริมาณผลิตภัณฑ์กราฟต์ทั้งหมดที่ผลิตได้

2.2 การตรวจสอบโครงสร้างของยางธรรมชาติกราฟต์เมทิลเมทาคริเลต

โครงสร้างของยางธรรมชาติกราฟต์ด้วยพอลิแมทิลเมทาคริเลตถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคป (Fourier Transform Infrared Spectroscope, FT-IR) โดยละลายยางกราฟต์ที่ได้ภายหลังการสกัดร้อน 1 กรัมในคลอโรฟอร์ม 2 มิลลิลิตร แล้วนำไปหยดลงบนแผ่นโซเดียมคลอไรด์ รอให้แห้งแล้วจึงนำไปทดสอบ

3. การทดสอบสมบัติเชิงกลและการบวมตัวในน้ำมันของยางผสม

3.1 การทดสอบสมบัติเชิงกลของยางผสมก่อนและหลังบ่มเร่งด้วยความร้อน

ภายหลังจากการขึ้นรูปชิ้นงานแล้ว นำชิ้นงานทดสอบสมบัติด้านการต้านทานแรงดึง ระยะยืด ณ จุดขาด และความแข็ง โดยตัดให้เป็นรูปดัมเบลล์ตามมาตรฐาน ASTM D638 นำมาทดสอบแรงดึงด้วยเครื่อง Universal Testing Machine เพื่อหาความต้านทานแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด ทดสอบความแข็งของยางผสม (Hardness) โดยตัดชิ้นงานให้มีความหนา 6 มม. ตามมาตรฐาน ASTM D2240 จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างมาทดสอบด้วยเครื่อง Durometer Shore A ในการทดสอบเสถียรภาพเชิงความร้อนของยางผสม ทำได้โดยนำชิ้นงานที่ตัดเป็นรูปดัมเบลล์แล้วมาอบในตู้อบที่ 100°ซ เป็นเวลา 24 ± 2 ชม. แล้วนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลต่าง ๆ

3.2 การทดสอบการบวมตัวในน้ำมันของยางผสม (Oil resistance)

เตรียมตัวอย่างชิ้นงานจากยางคงรูปโดยตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2 x 2 x 0.2 ซม. ชั่งน้ำหนักยางก่อนแช่ในน้ำมัน E10 E20 E50 E85 และแอลกอฮอล์บริสุทธิ์ 95% ที่อุณหภูมิ 50°ซเป็นเวลา 24 ชม. แล้วนำมาคำนวณเพื่อหาร้อยละการบวมตัวในน้ำมัน (%Volume change)

สรุปผลการวิจัย

1. กราฟต์โคพอลิเมอไรเซชันของเมทิลเมทาคริเลตบนยางธรรมชาติ

เมื่อทำปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอไรเซชันของเมทิลเมทาคริเลตบนยางธรรมชาติที่ 60°ซ เป็นเวลา 6 ชม. พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเมทิลเมทาคริเลตจาก 30 เป็น 50 ส่วน ทำให้ร้อยละยางธรรมชาติกราฟต์ และร้อยละประสิทธิภาพการกราฟต์เพิ่มขึ้น แต่สมบัติการกราฟต์มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเมทิลเมทาคริเลตสูงกว่า 50 ส่วน เนื่องจากการใช้เมทิลเมทาคริเลตมากเกินไปอาจเกิดเป็นโฮโมพอลิเมอร์ ดังนั้นที่อัตราส่วนของเมทิลเมทาคริเลตเท่ากับ 50 ส่วนต่อยางธรรมชาติ 100 ส่วน จึงเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการกราฟต์โคพอลิเมอไรเซชันซึ่งให้ร้อยละยางธรรมชาติกราฟต์และร้อยละของประสิทธิภาพการกราฟต์สูงที่สุด เท่ากับ77.6% และ 70.4% ตามลำดับ

2. ลักษณะการวัลคาไนเซชันของยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติกราฟต์ผสมยางฟลูออโรคาร์บอน

วิเคราะห์ลักษณะการวัลคาไนเซชันของยางผสมด้วยเครื่อง Oscillating Disc Rheometer (ODR) ที่อุณหภูมิ 170° ซ พบว่าเวลาที่ยางเกิดการคงรูปก่อนกำหนด (Ts2) และเวลาที่เหมาะสมในการวัลคาไนเซชัน (Tc90) ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติกราฟต์ผสมยางฟลูออโรคาร์บอนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยางฟลูออโรคาร์บอนลดลง แสดงว่าการเติมยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติกราฟต์ยับยั้งการเชื่อมขวางขณะเกิดวัลคาไนเซชันด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าระบบเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการวัลคาไนเซชันว่องไวกับยางฟลูออโรคาร์บอนมากกว่ายางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติกราฟต์ และเมื่อพิจารณาค่าความทนทานต่อแรงบิด (Torque) ซึ่งเป็นตัวแทนของปริมาณความหนาแน่นของการเชื่อมขวางซึ่งได้จากการวัลคาไนเซชัน พบว่ายางผสมทั้ง 2 ประเภทมีค่าความทนทานต่อแรงบิดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยางฟลูออโรคาร์บอนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยางธรรมชาติกราฟต์ที่ได้จากการใช้ปริมาณยางธรรมชาติต่อเมทิลเมทาคริเลตที่ 1:0.3 ผสมกับยางฟลูออโรคาร์บอนที่อัตราส่วน 30/70 ร้อยละโดยน้ำหนักให้ค่าการทนต่อแรงบิดมากที่สุดเท่ากับ 35.9 ปอนด์-นิ้ว ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับยางฟลูออโรคาร์บอน (36.7 ปอนด์-นิ้ว)

3. สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติกราฟต์ผสมยางฟลูออโรคาร์บอน

การใช้ยางธรรมชาติผสมยางฟลูออโรคาร์บอนที่อัตราส่วน 30/70 มีความทนทานต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดสูงกว่ายางฟลูออโรคาร์บอนทั้งนี้เป็นอิทธิพลจากยางธรรมชาติที่มีค่าความทนทานต่อแรงดึงและมีความยืดหยุ่นสูง แต่การเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติในยางผสมทำให้ความทนทานต่อแรงดึงและค่าความแข็งมีค่าลดลง ขณะที่ระยะยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นอย่างมาก แสดงให้เห็นว่ายางผสมที่ได้มีความเชื่อมขวาง (crosslink) ลดลง แต่สำหรับยางธรรมชาติกราฟต์ผสมยางฟลูออโรคาร์บอนพบว่าชิ้นงานที่ได้มีค่าความทนทานต่อแรงดึงและค่าความแข็งสูงกว่ายางฟลูออโรคาร์บอน การใช้ยางธรรมชาติกราฟต์ที่ได้มาจากการใช้มอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลตมากขึ้นและการเพิ่มขึ้นของปริมาณยางธรรมชาติกราฟต์ในยางผสมช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีความสามารถในการรองรับแรงดึงได้สูงขึ้นด้วย แต่การเพิ่มขึ้นของปริมาณมอนอเมอร์ขณะเตรียมยางธรรมชาติกราฟต์และปริมาณยางธรรมชาติกราฟต์ในยางผสมกลับทำให้ระยะยืด ณ จุดขาดของชิ้นงานมีค่าลดลง เพราะพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่อยู่ในยางธรรมชาติกราฟต์มีลักษณะแข็งจึงทำให้ชิ้นงานขาดความยืดหยุ่น เมื่อบ่มเร่งชิ้นงานด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100°ซ เป็นเวลา 24 ชม. พบว่ายางธรรมชาติผสมยางฟลูออโรคาร์บอนที่อัตราส่วนมากกว่าร้อยละ 30/70 โดยน้ำหนักเกิดการละลายภายหลังการบ่มเร่ง และไม่สามารถคงรูปชิ้นงานได้ที่อุณหภูมิสูง ขณะที่ยางผสมยางธรรมชาติกราฟต์และยางฟลูออโรคาร์บอนยังสามารถรักษาสมบัติเชิงกลภายหลังการบ่มเร่งได้ดี

4. ความต้านทานการบวมตัวในน้ำมันของยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติกราฟต์ผสมยางฟลูออโรคาร์บอน

เมื่อบ่มตัวอย่างในน้ำมันแกโซฮอลประเภทต่าง ๆ ได้แก่ E10 E20 E50 E85 และแอลกอฮอล์บริสุทธิ์ 95% ที่ 50°ซ เป็นเวลา 24 ชม. พบว่ายางธรรมชาติกราฟต์ที่ได้จากการใช้เมทิลเมทาคริเลต 30 ส่วนในยางธรรมชาติ 100 ส่วนผสมกับยางฟลูออโรคาร์บอนที่อัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนัก 30/70 มีค่าการบวมตัวในน้ำมันแกโซฮอลชนิดต่าง ๆ และเอทานอล บริสุทธิ์สูงกว่าการบวมตัวของยางธรรมชาติผสมยางฟลูออโรคาร์บอนเล็กน้อย และการบวมตัวของยางผสมลดลงเมื่อปริมาณเอทานอลในน้ำมันแกโซฮอลเพิ่มขึ้น

5. ราคาของยางธรรมชาติกราฟต์ และยางธรรมชาติกราฟต์ผสมยางฟลูออโรคาร์บอน

ยางธรรมชาติกราฟต์ที่สังเคราะห์จากการใช้มอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลตปริมาณมากกว่ามีราคาถูกกว่าเนื่องจากได้ผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติกราฟต์หลังอบมากกว่า และพบว่าการนำยางธรรมชาติกราฟต์เข้าไปทดแทนการใช้ยางฟลูออโรคาร์บอนสามารถลดราคายางผสมได้ในช่วง 10.8 – 40.5% ขึ้นกับเกรดของยางธรรมชาติกราฟต์และอัตราส่วนของยางผสม

ข้อเสนอแนะที่คาดว่าควรวิจัยเพิ่มเติมและวิธีการที่ควรพัฒนาต่อยอดสู่การปฏิบัติการจริง

1. สำหรับการผลิตเชิงอุตสาหกรรม ควรมีการพัฒนากระบวนการในการผลิตยางธรรมชาติกราฟต์เพื่อให้ใช้ระยะเวลาที่น้อยลง ซึ่งจะเป็นการประหยัดเวลา แรงงาน และต้นทุนทางด้านพลังงาน เช่น การนำเทคโนโลยีไมโครเวฟมาช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดความว่องไวมากยิ่งขึ้น เป็นต้น

2. ควรมีการศึกษาการพัฒนายางธรรมชาติให้มีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถรองรับการผสมกับยางสังเคราะห์ที่ต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศ นอกจากจะเป็นการช่วยลดปริมาณการนำเข้ายางจากต่างประเทศแล้ว ยังเป็นวิธีส่งเสริมให้ยางพารามีมูลค่าและคุณค่าเพิ่มขึ้นกว่าการส่งออกในรูปวัตถุดิบยาง หรือการแปรรูปเป็นสินค้าในระดับอุตสาหกรรมขั้นพื้นฐาน

ผลงานทางวิชาการที่เกิดขึ้น

1. นำเสนอในการประชุมวิชาการ "The Science Forum 2009" ครั้งที่ 17 ประจำปี 2552 ระหว่างวันที่ 12 – 13 มีนาคม 2552 ณ. อาคารมหามกุฎ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. ได้รางวัลรองชนะเลิศ อันดับ 1 ในการประกวดรางวัลนวัตกรรมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืน ครั้งที่ 2 (2nd Sci & Tech Innovation and Sustainability Awards (STISA): Innovative Chemical Processes and Products) จัดโดยสมาคมวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุต์แห่งประเทศไทย (สวคท.) ร่วมกับบริษัท ดาว เคมิเคอล ประเทศไทย จำกัด บริษัท เอสซีจี เคมิคอลส์ จำกัด สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และสำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (สนช.) ประจำปี 2552

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการกราฟต์โคพอลิเมอไรเซชัน (Graft copolymerization) ของพอลิเมทิลเมทาคริเลต (Polymethylmethacrylate, PMMA) บนยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) เพื่อให้ยางธรรมชาติมีสภาพขั้วเพิ่มขึ้น จากการทดลองพบว่าการเพิ่มปริมาณเมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์ทำให้ยางธรรมชาติกราฟต์ (Graft natural rubber, GNR) มีความแข็งมากขึ้น เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของยางธรรมชาติกราฟต์ด้วยการสกัดร้อน (Soxhlet extraction) พบว่าอัตราส่วนโดยน้ำหนักของยางธรรมชาติต่อมอนอเมอร์ที่ 1:0.5 มีร้อยละของการกราฟต์ (%Graft natural rubber) มากที่สุด คือ 77.6% จากการศึกษาลักษณะการวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางฟลูออโรคาร์บอน (Fluorocarbon rubber, FKM) และยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกราฟต์และยางฟลูออโรคาร์บอนที่อัตราส่วนต่าง ๆ กัน พบว่ายางธรรมชาติกราฟต์ด้วยเมทิลเมทาคริเลตที่อัตราส่วนโดยน้ำหนัก1:0.3 ผสมกับยางฟลูออโรคาร์บอนด้วยระบบวัลคาไนเซชันแบบเปอร์ออกไซด์ที่อัตราส่วน 30/70 (ร้อยละโดยน้ำหนัก) มีค่าการทนต่อแรงบิด (Torque) สูงสุดเท่ากับ 35.9 ปอนด์-นิ้ว และมีค่าใกล้เคียงกับยางฟลูออโรคาร์บอนซึ่งมีค่าเท่ากับ 36.7 ปอนด์-นิ้ว นำยางผสมที่ได้มาวิเคราะห์พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเมทิลเมทาคริเลตในขั้นตอนการสังเคราะห์ยางธรรมชาติกราฟต์ ทำให้ค่าการทนต่อแรงดึง (Tensile strength) ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางฟลูออโรคาร์บอนมีค่าเพิ่มขึ้นที่อัตราส่วนการผสมเดียวกัน และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติกราฟต์ เมื่อนำยางผสมมาผ่านกระบวนการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่ 100 องศาเซลเซียส พบว่ายางผสมที่มียางธรรมชาติกราฟต์ด้วยเมทิลเมทาคริเลตที่อัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อเมทิลเมทาคริเลตเท่ากับ 1:0.3 และ 1:0.5 มีค่าการทนต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยางธรรมชาติกราฟต์ที่ได้จากอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและเมทิลเมทาคริเลตเท่ากับ 1:0.3 ผสมกับยางฟลูออโรคาร์บอนที่อัตราส่วน 50/50 (ร้อยละโดยน้ำหนัก) มีค่าการทนต่อแรงดึงและความแข็งสูงกว่ายางฟลูออโรคาร์บอน 174% และ 18.5% ตามลำดับ ขณะที่มีระยะยืด ณ จุดขาดเท่ากับ 465% ซึ่งใกล้เคียงกับของยางฟลูออโรคาร์บอน นอกจากนี้ค่าการบวมตัวของยางผสมในน้ำมันแกโซฮอลที่มีปริมาณแอลกอฮอล์ต่าง ๆ ลดลง เมื่อปริมาณของยางฟลูออโรคาร์บอนหรือปริมาณเมทิลเมทาคริเลตในยางธรรมชาติกราฟต์เพิ่มขึ้น และอัตราส่วนของยางธรรมชาติกราฟต์ผสมกับยางฟลูออโรคาร์บอนที่ 30/70 (ร้อยละโดยน้ำหนัก) มีค่าการบวมตัวในน้ำมันแกโซฮอล E85 และในเอทานอลบริสุทธิ์ (ความบริสุทธิ์ 95%) ต่ำที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 11.6% และ 8.74% ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการนำยางธรรมชาติกราฟต์ไปผสมกับยางฟลูออโรคาร์บอนเพื่อใช้ในการผลิตชิ้นส่วนยางต่าง ๆ ในเครื่องยนต์ที่ใช้แกโซฮอลที่มีปริมาณแอลกอฮอล์สูง ๆ ได้ในอนาคต

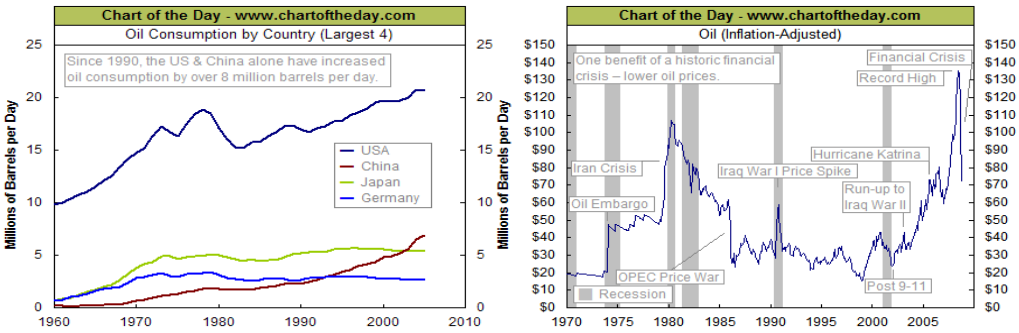
ABSTRACT

This research studied graft copolymerization of poly(methyl methacrylate) (PMMA) to natural rubber (NR) for increasing the polarity of NR. It was found that the increase in the methyl methacrylate (MMA) content caused the enhancement of the hardness of graft natural rubber (GNR). From soxhlet extraction, the weight ratio of NR to MMA at 1:0.5 had the highest percentage of grafted natural rubber (%GNR) as 77.6%. From the vulcanization characteristics of NR/fluorocarbon rubber (FKM) blends and GNR/FKM blends at various blend ratios, the GNR obtained from NR/MMA at 1:0.3 blended with FKM at 30/70 wt% using peroxide vulcanization exhibited the highest value of maximum torque as 35.9 lb-in which was close to that of FKM (36.7 lb-in). When MMA content was increased during grafting step, tensile strength (TS) of GNR/FKM vulcanizates increased at the same blend ratios. This value also increased when the blends contained the higher GNR contents. After ageing at 100 ºC, the blend containing GNR obtained from NR/MMA at 1:0.3 and 1:0.5 had the higher TS and elongation at break. Moreover, GNR prepared by using NR/MMA at 1:0.3 blended with FKM at 50/50 wt% showed the higher TS and and hardness than FKM as 174% and 18.5%, respectively, while, the elongation at break of the GNR/FKM vulcanizate was 465% which was similar to FKM vulcanizate. In addition, %oil swell of the blends in the presence of gasohol with various alcoholic contents decreased with increasing contents of FKM or MMA in the graft NR. The GNR/FKM vulcanizates at 30/70 wt% had the lowest %oil swell in gasohol-E85 and pure ethanol (purity 95%) as 11.6% and 8.74%, respectively. The experimental results showed that the GNR blended with FKM had possibility to produce rubber parts used in the engine using high content of alcohol in the future.

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

เนื่องจากการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของภาคอุตสาหกรรมในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ทำให้มีการใช้น้ำมันฟอสซิลเป็นเชื้อเพลิงจำนวนมาก ส่งผลให้ปริมาณน้ำมันดิบสำรองของโลกลดลงอย่างรวดเร็ว และราคาน้ำมันเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในแต่ละปี [1] ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ดังนั้นเพื่อให้กิจกรรมต่าง ๆ ในภาคอุตสาหกรรมดำเนินการต่อไปได้อย่างยั่งยืน ทุกประเทศจึงหันมาสนใจการใช้พลังงานทดแทนหรือพลังงานทางเลือกแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล สำหรับประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศเกษตรกรรม แหล่งพลังงานทดแทนที่น่าสนใจได้มาจากชีวมวล (Biomass) ซึ่งหมายถึงผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ผลิตภัณฑ์พลอยได้หรือผลิตภัณฑ์เหลือใช้ทางการเกษตร ซึ่งอาจนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงหรืออาจนำไปแปรรูปเป็นเอทานอลที่สามารถนำไปผสมสมกับน้ำมันเบนซินเพื่อลดปริมาณการนำเข้าน้ำมันดิบตลอดจนเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้ น้ำมันเบนซินที่ผสมเอทานอลหรือเมทานอลรู้จักกันดีในนามว่า “น้ำมันแกโซฮอล (Gasohol)” อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยในอดีตพบว่าแอลกอฮอล์ในน้ำมันแกโซฮอลทำลายยางที่ใช้ในเครื่องยนต์ได้มากกว่าการใช้น้ำมันเบนซินหรือแอลกอฮอล์บริสุทธ์ [2] โดยทั่วไปแล้วซีลยางหรือท่อยางในเครื่องยนต์จะทำด้วยยางไนไทรล์ (Nitrile rubber, NBR) ซึ่งเป็นยางที่มีขั้วจึงสามารถทนทาน และจะน้ำมันซึ่งไม่มีขั้วได้ดี แต่การผสมแอลกอฮอล์ซึ่งเป็นสารที่มีขั้วลงไปในน้ำมันเบนซินในการผลิตน้ำมันแกโซฮอล จะทำให้ยางไนไทรล์เกิดการบวมตัวได้ ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหาการบวมตัวของยางนี้ในการนำไปใช้งานกับเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันแกโซฮอลจึงเปลี่ยนมาใช้ยางฟลูออโรคาร์บอน (Fluorocarbon rubber, FKM) เนื่องจากยางฟลูออโรคาร์บอนสามารถต้านทานการบวมตัวที่เกิดจากแอลกอฮอล์ได้ดี [2] อย่างไรก็ตามการใช้ยางฟลูออโรคาร์บอนมีข้อเสีย คือ มีราคาสูงมาก ตั้งแต่กิโลกรัมละ 800 บาทขึ้นไปตามเกรดของยาง การขึ้นรูปซับซ้อน และยากต่อการผลิตจึงมีข้อจำกัดในการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ [3] ดังนั้นจึงมีแนวคิดลดต้นทุนการผลิตชิ้นส่วนที่ใช้ยางฟลูออโรคาร์บอนโดยนำมาผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่มีราคาถูกกว่า ในงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ายางฟลูออโรคาร์บอนสามารถผสมเข้ากันได้ดีกับยางอะคริเลต (Acrylate rubber) ซึ่งมีราคาถูกกว่ายางฟลูออโรคาร์บอนและมีความต้านทานต่อน้ำมันที่อุณหภูมิสูงได้ดี [3-5]



(ก) ปริมาณการใช้น้ำมัน (ข) ราคาน้ำมันดิบ

รูปที่ 1.1 (ก) อัตราการใช้น้ำมันของประเทศต่าง ๆ และราคาน้ำมันดิบของแต่ละปี [1]

สำหรับในประเทศไทยมีการประชาสัมพันธ์รณรงค์ให้ใช้น้ำมันแกโซฮอลกันอย่างแพร่หลายมากขึ้น ดังจะเห็นได้ว่ารถยนต์รุ่นใหม่ที่ผลิตขึ้นมาในปี 2008 จะต้องรองรับการใช้น้ำมันแกโซฮอลได้ ซึ่งในปัจจุบันน้ำมันแกโซฮอลมีปริมาณแอลกอฮอล์สูงสุด 20% (E20) และในอนาคตจะมีการใช้น้ำมันแกโซฮอลที่มีปริมาณแอลกอฮอล์สูงสุด 85% (E85) ดังนั้นชิ้นส่วนยางต่าง ๆ ในรถยนต์จะต้องมีความสามารถในการทนทานต่อการกัดกร่อนจากน้ำมันแกโซฮอลได้มากขึ้นเช่นกัน ถึงแม้ว่ายางฟลูออโรคาร์บอนจะมีสมบัติที่ดีในด้านการมีเสถียรภาพต่อสารเคมีต่าง ๆ แต่การนำยางฟลูออโรคาร์บอนมาใช้เป็นชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันแกโซฮอลมีราคาแพงเพราะต้องนำเข้ายางฟลูออโรคาร์บอนมาจากต่างประเทศทำให้ประเทศขาดดุลการค้า ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการประยุกต์ใช้ยางธรรมชาติหรือยางพาราซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจหลักของประเทศมาแปรรูปโดยผ่านกระบวนการดัดแปรโครงสร้างทางเคมีเพื่อให้มีความสามารถผสมเข้ากันได้กับยางฟลูออโรคาร์บอน จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการใช้ยางอะคริเลตซึ่งเป็นยางสังเคราะห์สามารถเข้ากันได้ดีกับยางฟลูออโรคาร์บอน หากแปรรูปโครงสร้างของยางธรรมชาติให้มีหมู่อะคริเลตโดยผ่านกระบวนการกราฟต์โคพอลิเมอร์ไรเซชันของเมทิลเมทาคริเลตจะทำให้โครงสร้างของยางธรรมชาติมีหมู่อะคริเลตซึ่งจะช่วยให้ยางธรรมชาติมีขั้วเพิ่มขึ้นและทำให้เกิดการผสมเข้ากันได้ดีขึ้นระหว่างยางฟลูออโรคาร์บอนและยางธรรมชาติ ซึ่งวิธีนี้จะเป็นการช่วยลดต้นทุนการผลิตซีลยางหรือชิ้นส่วนต่าง ๆ จากยางฟลูออโรคาร์บอนเพื่อรองรับการใช้เครื่องยนต์แกโซฮอลในอนาคต และส่งเสริมให้ยางธรรมชาติซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ส่งออกหลักของประเทศมีคุณค่าและมีมูลค่าเพิ่มขึ้นจากการส่งออกในรูปของวัตถุดิบยางเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ยังเป็นการกระตุ้นให้ใช้ผลิตภัณฑ์ที่มาจากธรรมชาติเพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ดังนั้นจึงนับเป็นนวัตกรรมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีด้านกระบวนการและผลิตภัณฑ์ยางของประเทศที่จะช่วยภาคอุตสาหกรรมในการลดต้นทุนการผลิตท่อส่งน้ำมัน ซีลยางหรือชิ้นส่วนยางต่าง ๆ ในเครื่องยนต์ที่ทำจากยางฟลูออโรคาร์บอนเพื่อรองรับปริมาณการใช้น้ำมันแกโซฮอลที่กำลังขยายตัวอย่างมากในประเทศ

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาวิธีการและเทคนิคของการกราฟต์โคพอลิเมอไรเซชันเมทิลเมทาคริเลตบนยางธรรมชาติแบบอิมัลชัน (Emulsion graft copolymerization)
2. เพื่อเตรียมยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกราฟต์ด้วยเมทิลเมทาคริเลตกับยางฟลูออโรคาร์บอนให้มีความต้านทานต่อความร้อนและน้ำมันแกโซฮอล

1.3 ทฤษฎี แนวคิดในการวิจัย และผลงานที่เกี่ยวข้อง

1.3.1 น้ำมันแกโซฮอล และข้อเสียของน้ำมันแกโซฮอล

น้ำมันแกโซฮอลเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงที่ได้จากการผสมระหว่างเอทานอลความบริสุทธิ์ 99.5 % โดยปริมาตรผสมกับน้ำมันเบนซินไร้สารตะกั่วออกเทน 91 ในอัตราส่วนเบนซิน 9 ส่วน เอทานอล 1 ส่วน จึงได้เป็นน้ำมันแกโซฮอลออกเทน 95 การใช้เอทานอลเป็นสารเพิ่มปริมาณออกซิเจนในแกโซฮอลไม่ส่งผลกระทบกับสิ่งแวดล้อม ในทางตรงกันข้ามจะลดปริมาณสารที่ก่อให้เกิดมลพิษต่าง ๆ เช่น สารประเภทไฮโดรคาร์บอน และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ เนื่องจากออกซิเจนในเอทานอลที่ผสมอยู่ในแกโซฮอลช่วยให้การเผาไหม้ของเครื่องยนต์สมบูรณ์ขึ้น และส่งผลทำให้คาร์บอนมอนอกไซด์จากท่อไอเสียลดลงได้ถึง 40%[6] แต่จากรายงานของ Orbital Engine Company ประเทศออสเตรเลียได้กล่าวถึงข้อเสียของน้ำมันแกโซฮอล E20 ว่าไม่เหมาะกับอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการขนส่งน้ำมันเชื้อเพลิง โดยเฉพาะอย่างยิ่งชิ้นส่วนโลหะที่

ประกอบด้วยสารปรอท เช่น แบริ่งและซีลของเพลาข้อเหวี่ยง (crankshaft bearings) cylinder liner แหวนและตัวกระบอกสูบ คาร์บิวเรเตอร์ และชิ้นส่วนพอลิเมอร์ ได้แก่ ท่อส่งน้ำมัน และยางเคลือบบนผิวของชิ้นส่วนต่าง ๆ เป็นต้น โดยชิ้นส่วนเหล่านี้จะเกิดการบิดเบี้ยว เสียรูปทรง และถูกกัดกร่อนได้เมื่อนำไปแช่ในน้ำมันแกโซฮอลที่อุณหภูมิ 45 – 55 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2000 ชั่วโมง [6, 7]

1.3.2 ยางฟลูออโรคาร์บอน (Fluorocarbon Rubber, FPM or FKM) [8]

ยางฟลูออโรคาร์บอนเป็นยางสังเคราะห์ชนิดหนึ่งที่มีฟลูออรีนเป็นองค์ประกอบอยู่ในโมเลกุล ทำให้ยางมีความเป็นขั้วและมีความเสถียรสูงมาก ทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากสภาพอากาศ ความร้อน ปฏิกิริยาออกซิเดชั่น เปลวไฟ และสารเคมีต่าง ๆ ได้ดีเยี่ยม ยางฟลูออโรคาร์บอนมีหลายเกรดแตกต่างกันตามโครงสร้างทางเคมีและปริมาณของฟลูออรีนในยาง การใช้งานค่อนข้างจำกัดเนื่องจากยางชนิดนี้มีราคาสูงมาก มักนำไปผลิตปลอกหุ้มสายไฟหรือสายเคเบิล โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องการความทนทานต่อความร้อน โอโซน สารเคมี และเปลวไฟสูงเป็นพิเศษ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปผลิตผลิตภัณฑ์อื่นๆ โดยเฉพาะชิ้นส่วนยานยนต์ เครื่องบิน จรวด เช่น ท่อน้ำมันเชื้อเพลิง ยางโอริง ปะเก็น ยางซีล เป็นต้นยางชนิดนี้เป็นที่รู้จักกันดีในชื่อทางการค้าว่า Viton ซึ่งมีหลายเกรดแตกต่างกันตามโครงสร้างทางเคมี

ยางฟลูออโรคาร์บอนมีระบบการคงรูปที่แตกต่างจากยางชนิดอื่น ๆ โดยสารคงรูปที่นิยมใช้ในอดีต ได้แก่ สารประกอบของไดเอมีน (Diamine) เช่น Hexamethylenediamine carbamate ร่วมกับตัวจับกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการคงรูป เช่น แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) หรือ ตะกั่วออกไซด์ (PbO) เป็นต้น แม้ว่าระบบการคงรูปด้วยไดเอมีนจะทำให้ยางสามารถยึดติดกับโลหะได้ดี แต่ระบบการคงรูปดังกล่าวทำยางคงรูปก่อนเวลาได้ง่ายและสมบัติของยางคงรูปที่ได้ต่ำ ปัจจุบันจึงนิยมนำระบบการคงรูปด้วย Bisphenol AF ร่วมกับตัวจับกรด MgO กับ $Ca(OH)_2$ แทน เพราะลดโอกาสของการเกิดยางที่คงรูปก่อนเวลา ยางคงรูปที่ได้มีค่า Compression set ต่ำ และมีสมบัติเชิงกลที่ดีอีกด้วย เนื่องจากในระบบการคงรูปด้วยเปอร์ออกไซด์ พันธะการเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นไม่ได้เป็นพันธะระหว่าง C-C เหมือนกรณีที่เกิดขึ้นในยางชนิดอื่น ๆ แต่การเชื่อมโยงจะเกิดผ่านสารกระตุ้นร่วมที่ใช้ ดังนั้นในพันธะเชื่อมโยง (Bridge) จึงมีไฮโดรเจนอยู่ทำให้การคงรูปด้วยระบบนี้มีความเสถียรต่อความร้อนและต่อการเกิดออกซิเดชันต่ำกว่าระบบการคงรูปด้วย Bisphenol A หรือ Bisphenol AF ด้วยเหตุนี้การเลือกใช้สารกระตุ้นร่วมก็เป็นสิ่งที่ต้องพิจารณาเช่นกัน เช่น การใช้ Triallyl isocyanulate (TAIC) ทำให้ยางคงรูปที่ได้มีค่า Compression set ต่ำกว่าการใช้ Triallyl cyanulate (TAC) สำหรับตัวจับกรด โดยทั่วไปหากต้องการยางที่ทนต่ออากาศร้อนได้ดีก็สามารถใช้ MgO และ CaO ได้ แต่ถ้าหากยางคงรูปต้องสัมผัสกับกรดร้อนก็ควรใช้ PbO เป็นตัวจับกรดแทน สำหรับในกรณีที่ยางคงรูปต้องสัมผัสกับน้ำร้อนหรือไอน้ำก็ควรใช้ Dibasic Pb-phosphite ร่วมกับ ZnO ภายหลังการคงรูป การทำการบ่มเร่งภายหลังการคงรูป (Post-curing) ก็เป็นสิ่งที่จำเป็นกับยางชนิดนี้ โดยทั่วไปจะนำยางคงรูปที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิประมาณ 200-300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อทำให้ยางเกิดการคงรูปได้อย่างสมบูรณ์และมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้ยางคงรูปที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดีและมีค่า Compression set ต่ำ

1.3.3 กราฟต์โคพอลิเมอไรเซชัน (Graft copolymerization) [9]

กราฟต์โคพอลิเมอร์เกิดจากการนำมอนอเมอร์ชนิดหนึ่งมาพอลิเมอไรซ์กับสายโซ่ของมอนอเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ซึ่งมอนอเมอร์ชนิดที่สองจะต่อกันเป็นสายโซ่และเป็นกิ่งของสายโซ่มอนอเมอร์ ชนิดแรก การสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์ต้องทำให้เกิดจุดที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาบนโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ทำ

ปฏิกิริยากับมอนอเมอร์จึงจะสามารถเกิดพอลิเมอไรซ์ได้ กราฟต์โคพอลิเมอไรเซชันเกิดแบบเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) หรือไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) ขึ้นกับว่าพอลิเมอร์ที่ถูกกราฟต์ละลายในมอนอเมอร์หรือไม่ พอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่นหรือแบบแรดิเคิลทำให้เกิดพอลิเมอร์กิ่งมี เช่น กิ่งของพอลิสไตรีนบนสายโซ่หลักพอลิสไตรีน

เทคนิคการสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอไรเซชันมี 2 แบบ คือ

1. แรดิเคิลกราฟต์โคพอลิเมอไรเซชัน (Radical graft copolymerization) เทคนิคนี้เป็นวิธีที่ใช้กันมากที่สุด เตรียมง่าย และมีประสิทธิภาพสูง แบ่งออกเป็น 4 วิธี คือ
    - Chain Transfer และ Copolymerization เป็นการพอลิเมอไรเซชันแบบแรดิเคิล โดยอาศัยตัวริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) เช่น เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoylperoxide) ซึ่งทำให้เกิดแรดิเคิลอิสระบนสายโซ่หลักจากแรดิเคิลอิสระของมอนอเมอร์ที่กำลังโต ลักษณะของมอนอเมอร์ที่ใช้ในปฏิกิริยาต้องมีว่องไวกับแรดิเคิลที่ได้จากสายโซ่พอลิเมอร์หลัก เนื่องจากในปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบพอลิเมอไรเซชันต่ำอยู่ในช่วง 1-5% พอลิเมอร์ที่ไม่อิ่มตัวมีตำแหน่งสำหรับเกิดกราฟต์ 2 ตำแหน่ง คือ ที่แอลฟาคาร์บอนอะตอมกับพันธะคู่ จะว่องไวและมีแนวโน้มว่าจะสามารถเกิดปฏิกิริยาโดยแรดิเคิลอิสระได้ง่าย นอกจากนี้พันธะคู่ยังสามารถโคพอลิเมอไรซ์กับไวนิลมอนอเมอร์ และมีตำแหน่งสำหรับเกิดกราฟต์ด้วย
    - Ultraviolet และ ionizing radiation เป็นกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบแรดิเคิลอีกวิธีหนึ่ง การเกิดเป็นแรดิเคิลต้องฉายแสงอัลตราหรือรังสีที่ไอออไนซ์ได้ลงไปในระบบของพอลิเมอร์-มอนอเมอร์ เช่น เกิดปฏิกิริยาของแสงต่อระบบของโคพอลิเมอไรเซชันของเอทิลีน-สไตรีน โดยการฉายแสงทำให้เกิดแรดิเคิลบนพอลิเอทิลีนซึ่งจะไปกระตุ้นสไตรีนเพื่อให้เกิดพอลิ(เอทิลีน-กราฟต์-สไตรีน) (Poly(ethylene-g-styrene))
    - ตัวริเริ่มรีดอกซ์ เป็นวิธีการสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดกับพอลิเมอร์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล เช่น พอลิไวนิลด์แอลกอฮอล์เซลลูโลส ในการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์โดยใช้ซิริกไอออน (Ciric ion) หรือออกซิไดซิงเอเจนต์ (Oxidizing agents) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้พอลิเมอร์เกิดแรดิเคิล
    - ระบบการกราฟต์แบบอื่น ๆ เช่น การสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์โดยการเปลี่ยนพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันให้เป็นตำแหน่งที่สามารถเกิดการกราฟต์ได้ เช่น หมู่เอโซ (Azo group) ถูกเปลี่ยนให้เป็นตำแหน่งที่สามารถเกิดการกราฟต์ได้ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันระหว่างสไตรีนกับ 2-(4-vinylpheylazo)-2-methylmalonitrile
2. ไอออนิกกราฟต์โคพอลิเมอไรเซชัน (Ionic graft copolymerization) การสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์โดยมากนิยมใช้วิธีนี้มากกว่าวิธีใช้แรดิเคิลเป็นตัวริเริ่มเนื่องจากมอนอเมอร์ที่สามารถเกิดได้ด้วยวิธีนี้มีมากกว่า แต่การเกิดพอลิเมอไรเซชันแบบแคตไอออนหรือแอนไอออนเพื่อให้เป็นตัวริเริ่มกราฟต์โคพอลิเมอร์ทำได้ยากกว่าแบบแรดิเคิล ตัวริเริ่มปฏิกิริยามี 2 ประเภท ได้แก่ ตัวริเริ่มแอนไอออน (Anionic initiation) และตัวริเริ่มแคตไอออน (Cationic initiation)

1.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Nakason และคณะ [10] ศึกษาการเตรียมการกราฟต์โคพอลิเมอไรเซชัน (Graft copolymerization) ของเมทิลเมทาคริเลต (Methyl Methacrylate, MMA) บนยางธรรมชาติที่ผ่านการกำจัดโปรตีนออก (Deprotenized natural rubber, DPNR) และบนยางธรรมชาติที่มีปริมาณแอมโมเนียสูง (High ammonia concentrated natural rubber) พบว่าเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 3 ชม.และ 50 องศาเซลเซียสตามลำดับ เมื่อพิจารณาร้อยละของการเปลี่ยนแปลง (%Conversion) และร้อยละของประสิทธิภาพการกราฟต์ (%Grafting efficiency) พบว่ายางธรรมชาติที่ผ่านการกำจัดโปรตีนออกมีร้อยละของการเปลี่ยนแปลงและร้อยละของประสิทธิภาพการกราฟต์มากกว่ายางธรรมชาติที่มีปริมาณแอมโมเนียสูง และร้อยละของประสิทธิภาพการกราฟต์มีค่าลดลง เมื่อปริมาณเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้น

Charmondusit และคณะ [11] ศึกษาการกราฟต์โคพอลิเมอไรเซชันของเมทิลเมทาคริเลต (Methyl Methacrylate, MMA) และสไตรีน (Styrene) บนยางธรรมชาติด้วยระบบอิมัลชัน พบว่าปริมาณเมทิลเมทาคริเลตและสไตรีน ปริมาณสารลดแรงตึงผิว (Emulsifier) ปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) และอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 100 ส่วนโดยน้ำหนักของมอนอเมอร์ต่อ 100 ส่วนโดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ 1.5 ส่วนโดยน้ำหนักของสารลดแรงตึงผิว 1.5 ส่วนโดยน้ำหนักของตัวริเริ่มปฏิกิริยา และที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชม. เป็นสภาวะที่ดีที่สุดในการเกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอไรเซชัน

Thiraphattaraphun และคณะ [12] ศึกษายางผสมระหว่างยางธรรมชาติกราฟต์เมทิลเมทาคริเลต (Natural rubber-*g*-methyl methacrylate, NR-*g*-MMA) กับพอลิเมทิลเมทาคริเลต (Poly(methylmethacrylate), PMMA) พบว่าเมื่อปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้นทำให้ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ความทนทานต่อแรงฉีก (Tear strength) และความแข็ง (Hardness) เพิ่มขึ้น เนื่องจากยางธรรมชาติกราฟต์ด้วยเมทิลเมทาคริเลตทำหน้าที่เป็นสารเสริมความเข้ากันได้ระหว่างวัฏภาคยางและพลาสติก

Kader และคณะ [4] ศึกษาผลของสารที่ทำให้เกิดการคงรูปและสารตัวเติมต่อการวัลคาไนเซชัน สมบัติเชิงกล การบ่มเร่ง และสมบัติการบวมตัวของยางผสมระหว่างยางอะคริลิค (Acrylic rubber, ACM) และยางฟลูออโรคาร์บอน (Fluorocarbon, FKM) พบว่าระบบวัลคาไนเซชันที่ดีที่สุด คือ ระบบการวัลคาไนเซชันผสมของ 1.5 phr ของเฮกซะเมทิลลีนไดเอมีนคาร์บาเมต (hexamethylenediamine carbamate, Diak#1) และ 2.5 phr ของแอมโมเนียมเบนโซเอต (ammonium benzoate) ยาง ACM-FKM ที่อัตราส่วนการผสม 50/50 ร้อยละโดยน้ำหนัก แสดงสมบัติเชิงกลได้ดีที่สุด การบ่มเร่งด้วยความร้อนไม่ทำให้สมบัติของยางเปลี่ยนแปลงมากนักและยิ่งมีผลน้อยสำหรับยาง FKM หรือยางผสมที่มี FKM อยู่ในปริมาณมาก นอกจากนี้การบวมตัวของยางผสมจะลดลงเมื่อใส่สารตัวเติม (filler) ลงไป และค่าการสะสมความร้อนในยางผสมจะเพิ่มขึ้นเมื่อใส่สารตัวเติมลงไป นอกจากนี้ยังศึกษาถึงยางผสมระหว่างพอลิฟังก์ชันอะคริเลต (Polyfunctional acrylate) ยางอะคริลิก และยางฟลูออโรคาร์บอน [3] พบว่าจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy, TEM) แสดงให้เห็นว่ายางอะคริเลตผสมยางฟลูออโรคาร์บอน และยางอะคริเลตผสมกับพอลิฟังก์ชันอะคริเลตสามารถผสมเข้ากันได้ แต่การเพิ่มปริมาณยางฟลูออโรคาร์บอนจะมีผลทำให้เกิดการแยกชั้นกันในยางผสม 3 ชนิดของยางอะคริเลต ยางฟลูออโรคาร์บอน และพอลิฟังก์ชันอะคริเลต ขณะที่ยางผสมระหว่างยางฟลูออโรคาร์บอนและพอลิฟังก์ชันอะคริเลตแสดงการแยกวัฏภาคอย่างชัดเจน

บทที่ 2
สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

2.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. น้ำยางข้นรักษาสภาพด้วยแอมโมเนียความเข้มข้นสูง (60% DRC)
2. ยางธรรมชาติ STR-5L
2. น้ำดีไอออไนเซชัน
3. โซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต (Sodium dodecylsulfate, SDS) : Fisher Scientific
4. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide, KOH) : Fisher Scientific
5. ไอโซโพรพานอล : QReC
6. เมทิลเมทาคริเลต (Methyl methacrylate, MMA) : ACQOS
7. คิวมีนไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Cumene hydroperoxide, CHPO) : Fluka
8. เตตระเอทิลลีนเพนทามีน (Tetraethylene pentamine, TEPA) : Fluka
9. 2,5-ไดเมทิล-2,5-ไดเทอเทียรี่บิวทิลเปอร์ออกไซด์เฮกเซน (2,5-dimethyl-2,5-di(t-butyl peroxy) hexane, PO) : บริษัท พี ไอ อินดัสทรี จำกัด
10. ไตรอัลลิวไอโซไซยานูเลต (Triallyl isocyanulate, TAIC) : บริษัท พี ไอ อินดัสทรี จำกัด
11. เอทานอล (Commercial grade) : S.R. Lab
12. ยางฟลูออโรคาร์บอน (VITON GF600S) : DuPont Performance Elastomers
13. แก๊สไนโตรเจน (99.99%) : Thai Industrial Gas (TIG)

2.2 การดำเนินงานวิจัย

2.2.1 การสังเคราะห์ยางธรรมชาติกราฟต์เมทิลเมทาคริเลต

ส่วนผสมในการกราฟต์โคพอลิเมอไรเซชันแสดงดังตารางที่ 2.1 นำน้ำยางธรรมชาติ 200 กรัม เทน้ำ DI 600 มิลลิลิตรผสมกับน้ำยางธรรมชาติ นำ SDS ปริมาณ 1.2 กรัม มาละลายในน้ำ DI 20 มิลลิลิตร และนำ KOH ปริมาณ 0.3 กรัม มาละลายในน้ำ DI 20 มิลลิลิตร ส่วนไอโซโพรพานอลปริมาณ 12 กรัมนำมาผสมกับน้ำ DI 20 มิลลิลิตร ปิดบีกเกอร์ด้วยฟอยล์อะลูมิเนียม จากนั้นนำน้ำยางธรรมชาติที่เตรียมไว้มาเทลงในเครื่องปฏิกรณ์แล้วป้อนแก๊สไนโตรเจน (N_2) เพื่อไล่อากาศออกจากระบบ เติม SDS KOH และไอโซโพรพานอลที่เตรียมไว้แล้วตามลำดับ โดยใช้หลอดหยด (dropper) เติม MMA และ CHPO ช้า ๆ ตามลำดับ โดยใช้ Separating funnel อัตราส่วนโดยน้ำหนักของยางธรรมชาติต่อเมทิลเมทาคริเลตที่ศึกษา ได้แก่ 1:0.3 1:0.5 1:0.75 และ 1:1.0 ตั้งอุณหภูมิของอ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) ให้มีอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นำ TEPA ปริมาณ 1.2 กรัม มาละลายในน้ำ DI 10 มิลลิลิตร แล้วเติม TEPA ช้าๆ ลงไปในเครื่องปฏิกรณ์โดยใช้ Volumetric funnel จากนั้นปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา 6 ชม. เมื่อเสร็จสิ้นปฏิกิริยาตกตะกอนผลิตภัณฑ์ด้วยเอทานอล จากนั้นกรองยางออกจากเอทานอลด้วยตะแกรงแล้วนำไปอบต่อที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 2.1 ปริมาณและสารเคมีที่ใช้ในการกราฟต์โคพอลิเมอไรเซชัน

สารเคมี	ปริมาณ
น้ำยางธรรมชาติ (มล.)*	200
KOH (phr)**	0.25
SDS (phr)	1
MMA (phr)	30 50 75 และ 100
CHPO (phr)	1
TEPA (phr)	1
น้ำ DI (ml)	600

* น้ำยางธรรมชาติ 100 มิลลิลิตร มีเนื้อยางธรรมชาติ 60 กรัม

** 1 phr = 1/100 กรัมของเนื้อยางธรรมชาติ

2.2.2 การผสมยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติกราฟต์กับยางฟลูออโรคาร์บอน

นำยางธรรมชาติและยางฟลูออโรคาร์บอนแต่ละก้อนมานวดและกรีดที่เครื่อง Two-roll mill ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อลดความหนืดให้ใกล้เคียงกัน จากนั้นจึงนำยางทั้ง 2 ชนิด นวดและกรีดผสมกันที่เครื่อง two-roll mill อีกครั้งหนึ่งเป็นเวลา 5 นาที เติม 2,5-dimethyl-2,5-di(t-butyl peroxy) hexane (PO) ปริมาณ 1.2 กรัม ลงในยางผสม เป็นเวลา 2 นาที กรีดยางต่อเป็นเวลา 3 นาที เติม Triallyl isocyanulate (TAIC) ปริมาณ 2.4 กรัม ลงในยางผสม เป็นเวลา 2 นาที กรีดยางต่อเป็นเวลา 3 นาที แล้วไล่ฟองอากาศออก และทำให้เป็นแผ่นหนาประมาณ 3-4 มิลลิเมตร แล้วทำการขึ้นรูปด้วยเครื่อง Two-plate hydraulic press ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียสที่ความดัน 150 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้ระยะเวลาในการขึ้นรูปจากข้อมูลที่ได้จากเครื่อง Oscillating Disk Rheometer (ODR) ส่วนผสมของยางและเคมีในแต่ละสูตรที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 2.2 ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียสเช่นกัน

ตารางที่ 2.2 ปริมาณและสารเคมีที่ใช้ในการผสมยางระหว่างยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติกราฟต์กับยางฟลูออโรคาร์บอน

ตัวอย่าง	1	2	3	4	5
ยางฟลูออโรคาร์บอน	100	70	50	30	0
ยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติกราฟต์	0	30	50	70	100
2,5-dimethyl-2,5-di(t-butyl peroxy) hexane (PO)	1	1	1	1	1
Triallyl isocyanulate (TAIC)	2	2	2	2	2

สูตรการขึ้นรูปยางอ้างอิงจาก Hirano และคณะ (2005) [13]

2.3 การวิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์กราฟต์ที่ได้

2.3.1 การหาค่าร้อยละของการเปลี่ยนแปลง (%Conversion) ร้อยละของประสิทธิภาพการกราฟต์ (%Grafting efficiency) ร้อยละยางธรรมชาติกราฟต์ (%GNR) ร้อยละยางธรรมชาติที่ไม่เกิดการกราฟต์ (%Free NR) และร้อยละของเมทิลเมทาคริเลตที่เหลือจากการกราฟต์ (%Free monomer)

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกราฟต์โคพอลิเมอไรเซชันประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ยางธรรมชาติกราฟต์เมทิลเมทา-คริเลต (Grafted natural rubber, GNR) ยางธรรมชาติที่ไม่เกิดปฏิกิริยากราฟต์ (Free natural rubber, Free NR) และเมทิลเมทาคริเลตที่เหลือจากการกราฟต์ (Free methacrylate, Free MMA) โดยยางธรรมชาติที่ไม่เกิดปฏิกิริยากราฟต์สามารถสกัดแยกออกมาได้โดยใช้การสกัดร้อน(Soxhlet extraction) ด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์เบา และโคพอลิเมอร์ของเมทิลเมทาคริเลตสามารถสกัดแยกออกมาได้โดยใช้อะซิโตน สำหรับสูตรที่ใช้ในการคำนวณหาร้อยละของการเปลี่ยนแปลง (%Conversion) ร้อยละของประสิทธิภาพการกราฟต์ (%Grafting efficiency) ร้อยละยางธรรมชาติกราฟต์ (%GNR) ร้อยละยางธรรมชาติที่ไม่เกิดการกราฟต์ (%Free NR) และร้อยละของเมทิลเมทาคริเลตที่เหลือจากการกราฟต์ (%Free monomer) แสดงดังสมการที่ 2.1 – 2.5 โดยกำหนดให้

A = น้ำหนักยางแห้ง
B = น้ำหนักยางกราฟต์ทั้งหมดที่ได้หลังอบ
C = น้ำหนักยางกราฟต์ที่นำไปสกัดร้อน
D = น้ำหนักยางกราฟต์หลังสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์
E = น้ำหนักยางกราฟต์หลังสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์และอะซิโตน
F = น้ำหนักมอนอเมอร์ที่ป้อนเข้า

ร้อยละของการเปลี่ยนแปลง (%Conversion) = ((B – A) / F) x 100 (2.1)

ร้อยละยางธรรมชาติกราฟต์ (%GNR) = E / C x 100 (2.2)

ร้อยละยางธรรมชาติที่ไม่เกิดการกราฟต์ (%Free NR) = ((C – D) / C) x 100 (2.3)

ร้อยละของ MMA ที่เหลือจากการกราฟต์ (%Free monomer) = ((D – E) / C) x 100 (2.4)

ร้อยละของประสิทธิภาพการกราฟต์ (%Grafting efficiency) = ((%GNR x B) / F) x 100 (2.5)

2.3.2 การตรวจสอบโครงสร้างของยางธรรมชาติกราฟต์เมทิลเมทาคริเลต

ตรวจสอบโครงสร้างของยางธรรมชาติกราฟต์เมทิลเมทาคริเลตที่ได้ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR) ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคป Thermo รุ่น 470 เตรียมตัวอย่างที่จะทำการวัดโดยละลายยางกราฟต์ที่ได้ภายหลังการสกัดร้อน 1 กรัมในคลอโรฟอร์ม 2 มิลลิลิตร นำไปหยดลงบนแผ่นโซเดียมคลอไรด์ รอให้ตัวทำละลายระเหยจนหมดแล้วจึงนำไปทดสอบ

2.4 การทดสอบสมบัติเชิงกลและการบวมตัวในน้ำมันของยางผสม

2.4.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile strength) และระยะยืด ณ จุดขาด (%Elongation)

ภายหลังจากการขึ้นรูปชิ้นงานแล้ว นำชิ้นงานทดสอบสมบัติด้านการต้านทานแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด โดยตัดให้เป็นรูปดัมเบลล์ตามมาตรฐาน ASTM D638 นำมาทดสอบแรงดึงด้วยเครื่อง Universal Testing Machine รุ่น LLOYD LR 10k วัดความหนาชิ้นงานด้วยไมโครมิเตอร์ที่อ่านละเอียด 0.01 มิลลิเมตร ทำการวัด 3 แห่ง คือ ตรงกลาง ตรงปลาย และ ณ จุดที่เลยขีดความยาว 2 แห่ง ใช้ค่าเฉลี่ยเลขคณิตสำหรับคำนวณค่า

2.4.2 การทดสอบความแข็งของยางผสม (Hardness)

ทดสอบสมบัติเชิงกลด้านความแข็งของยางผสมโดยเตรียมตัวอย่างชิ้นงานจากยางคงรูป อัดเป็นแผ่นให้มีความหนาสม่ำเสมอด้วยเครื่องอัด (Compression Molding) ตัดชิ้นงานให้มีความหนา 6 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM D2240 จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างมาทดสอบด้วยเครื่อง Durometer shore A REX 2000

2.4.3 การทดสอบการบวมตัวในน้ำมันของยางผสม (Oil resistance)

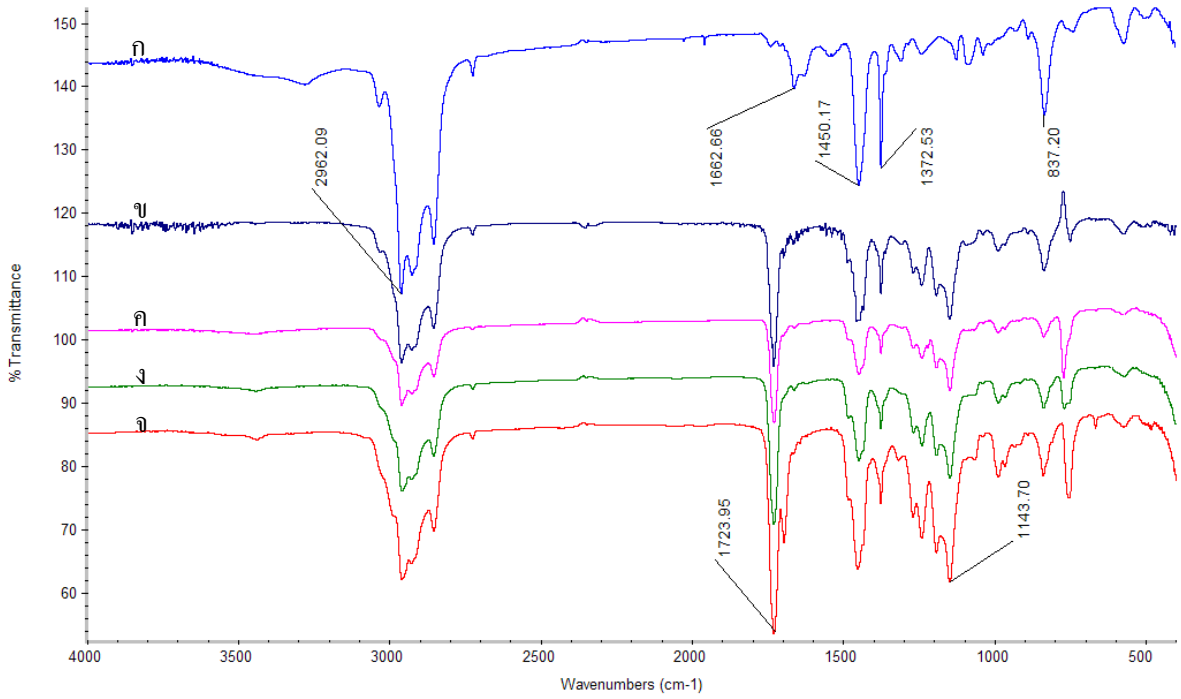
ทดสอบสมบัติเชิงกลด้านความแข็งของยางผสม โดยเตรียมตัวอย่างชิ้นงานจากยางคงรูป อัดเป็นแผ่นให้มีความหนาสม่ำเสมอด้วยเครื่องอัด (Compression Molding) ตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2 x 2 x 0.2 เซนติเมตร ชั่งน้ำหนักยางก่อนแช่ในน้ำมัน และคำนวณหาร้อยละของการบวมตัวในน้ำมัน (%Volume change) โดยใช้สูตรการคำนวณดังแสดงในสมการที่ 2.6

ร้อยละของการบวมตัว = (((น้ำหนักยางหลังทดสอบในอากาศ – น้ำหนักยางหลังทดสอบในน้ำ) - (น้ำหนักยางก่อนทดสอบในอากาศ – น้ำหนักยางก่อนทดสอบในน้ำ)) / (น้ำหนักยางก่อนทดสอบในอากาศ – น้ำหนักยางก่อนทดสอบในน้ำ)) x 100 (2.6)

บทที่ 3
ผลการวิจัย

3.1 โครงสร้างของยางธรรมชาติกราฟต์

จากการตรวจสอบโครงสร้างของยางธรรมชาติกราฟต์เมทิลเมทาคริเลตด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) เทียบกับโครงสร้างของยางธรรมชาติ ดังรูปที่ 3.1



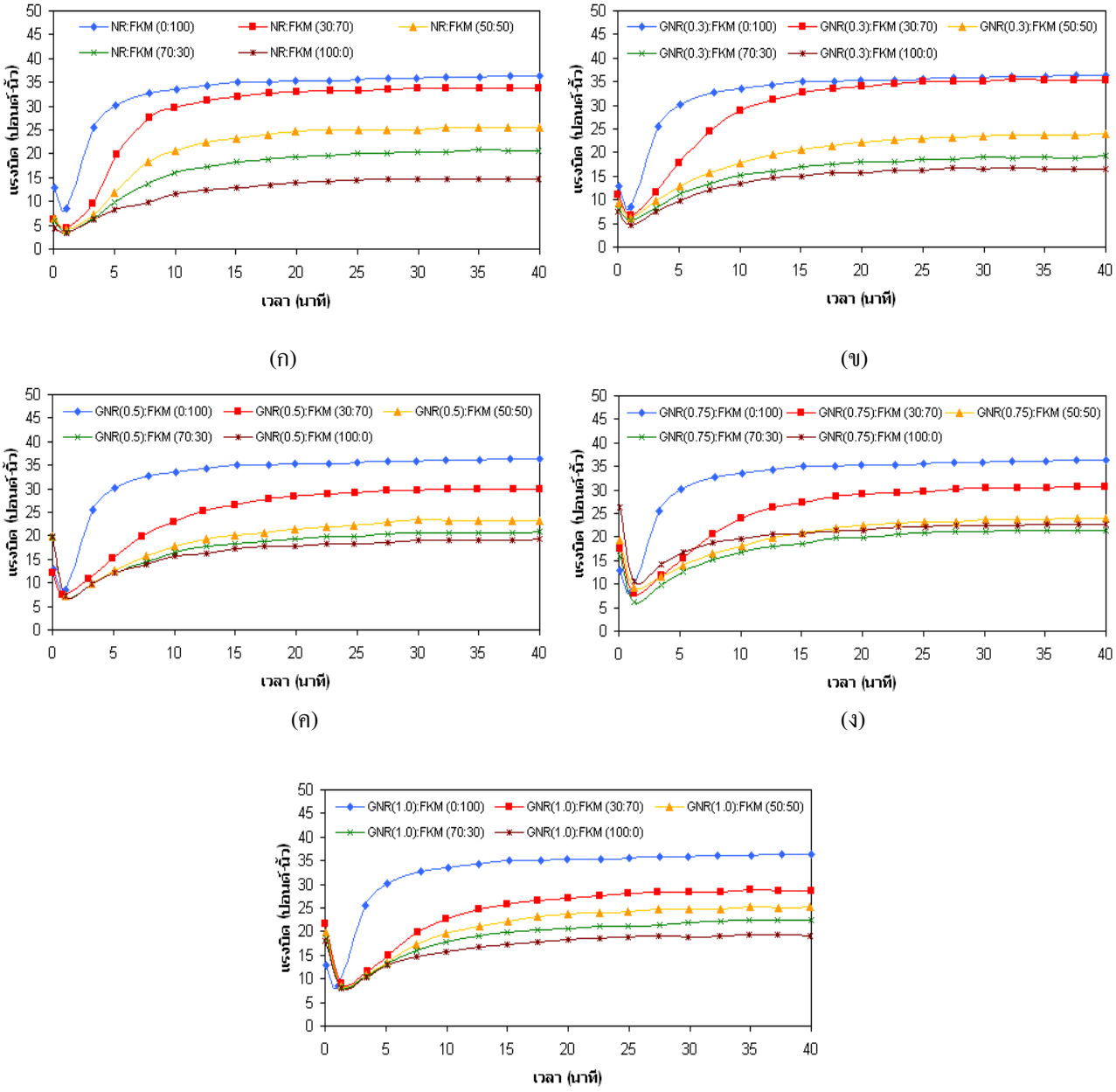
รูปที่ 3.1 สเปกตรัมอินฟราเรด (FTIR spectra) ของ (ก) ยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติกราฟต์ที่ได้จากอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลตต่าง ๆ กัน ได้แก่ (ข) GNR(0.3) (ค) GNR(0.5) (ง) GNR(0.75) และ (จ) GNR(1.0)

3.2 ผลของปริมาณเมทิลเมทาคริเลตต่อร้อยละของการกราฟต์

ตาราง 3.1 ผลการทดลองกราฟต์โคพอลิเมอไรเซชันของเมทิลเมทาคริเลตบนยางธรรมชาติ

ปริมาณมอนอเมอร์ (ส่วน/ยาง 100 ส่วน	น้ำหนักยางแห้ง (กรัม)	น้ำหนักมอนอเมอร์ที่ใช้ (กรัม)	น้ำหนักยางที่ได้หลังอบ (กรัม)	น้ำหนักยางที่นำมาสกัดร้อน (S, กรัม)	น้ำหนักยางหลังสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ (A, กรัม)	น้ำหนักยางหลังสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์และอะซิโตน (B, กรัม)	ร้อยละของการเปลี่ยนแปลง (%Conversion)	ร้อยละยางธรรมชาติกราฟต์ (%GNR)	ร้อยละยางธรรมชาติที่ไม่เกิดการกราฟต์ (%Free NR)	ร้อยละของเมทิลเมทาคริเลตที่เหลือจากการกราฟต์ (%Free monomer)	ร้อยละของประสิทธิภาพการกราฟต์ (%Grafting efficiency)
30	120	36.11	141.56	2.04	1.63	1.46	59.71	71.66	19.96	8.37	26.88
50	120	60.00	176.23	2.00	1.71	1.55	93.72	77.58	14.49	7.93	70.43
75	120	90.03	209.99	2.09	1.76	1.46	99.96	69.78	15.68	14.54	66.04
100	120	120.08	149.50	2.07	1.60	1.35	24.57	65.12	22.54	12.34	9.20

3.3 ลักษณะการวัลคาไนเซชันของยางธรรมชาติ ยางฟลูออโรคาร์บอน ยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางฟลูออโรคาร์บอน และยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกราฟต์และยางฟลูออโรคาร์บอน ด้วยเครื่อง Oscillating disc rheometer (ODR) ที่ 170°ซ



รูปที่ 3.2 ลักษณะการวัลคาไนเซชันของ (ก) ยางธรรมชาติผสมกับยางฟลูออโรคาร์บอน (ข) ยางธรรมชาติกราฟต์ 0.3 ผสมกับยางฟลูออโรคาร์บอน (ค) ยางธรรมชาติกราฟต์ 0.5 ผสมยางฟลูออโรคาร์บอน (ง) ยางธรรมชาติกราฟต์ 0.75 ผสมกับยางฟลูออโรคาร์บอน (จ) ยางธรรมชาติกราฟต์ 1.0 ผสมกับยางฟลูออโรคาร์บอนโดยแสดงอัตราส่วนการผสมยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติกราฟต์ต่อยางฟลูออโรคาร์บอน

3.4 สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติผสมยางฟลูออโรคาร์บอน และยางธรรมชาติกราฟต์และยางฟลูออโรคาร์บอน ก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่ 100 °ซ เป็นเวลา 24 ชม.

ตาราง 3.2 ความทนทานต่อแรงดึงของยางธรรมชาติผสมยางฟลูออโรคาร์บอน และยางธรรมชาติกราฟต์และยางฟลูออโรคาร์บอนก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชม.

ชนิดของยาง	อัตราส่วนการผสม	ความทนทานต่อแรงดึงก่อนการบ่มเร่ง (หลังการบ่มเร่ง) (เมกกะพาสคาล)				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	S.D.
NR	0:100	4.28 (9.83)	5.58 (14.3)	4.03 (10.1)	4.63 (11.4)	0.83 (2.51)
	30:70	11.1 (1.56)	9.29 (2.16)	10.1 (2.16)	10.2 (1.96)	0.88 (0.35)
	50:50	7.50 (Melt)	8.83 (Melt)	7.92 (Melt)	8.08 (Melt)	0.68 (Melt)
	70:30	4.05 (Melt)	3.87 (Melt)	3.31 (Melt)	3.74 (Melt)	0.38 (Melt)
	100:0	3.07 (Melt)	2.81 (Melt)	2.56 (Melt)	2.81 (Melt)	0.26 (Melt)
GNR(0.3)	30:70	11.3 (14.2)	13.6 (15.3)	13.2 (15.5)	12.7 (15.0)	1.22 (0.74)
	50:50	9.55 (10.5)	9.30 (10.1)	9.17 (9.43)	9.34 (10.0)	0.19 (0.52)
	70:30	10.1 (11.0)	6.99 (7.32)	10.7 (11.4)	9.26 (9.91)	1.98 (2.25)
	100:0	7.45 (8.80)	7.10 (10.6)	7.10 (2.75)	7.22 (9.70)	0.20 (1.27)
GNR(0.5)	30:70	13.1 (16.0)	9.94 (15.4)	14.3 (10.3)	12.4 (15.7)	2.25 (0.41)
	50:50	13.8 (11.5)	13.8 (12.2)	14.0 (12.3)	13.9 (12.0)	0.12 (0.41)
	70:30	13.0 (10.3)	12.5 (13.2)	8.88 (11.8)	11.5 (11.8)	2.26 (1.47)
	100:0	9.18 (12.4)	6.99 (11.3)	13.1 (11.7)	9.75 (11.8)	3.09 (0.60)
GNR(0.75)	30:70	11.3 (11.9)	13.1 (12.1)	13.2 (13.4)	12.5 (12.4)	1.05 (0.80)
	50:50	15.9 (11.3)	15.5 (11.6)	13.7 (11.8)	15.0 (11.5)	1.15 (0.26)
	70:30	12.7 (12.3)	11.6 (12.3)	13.5 (7.47*)	12.6 (12.3)	0.95 (0.03)
	100:0	15.3 (16.1)	15.8 (14.8)	17.3 (15.4)	16.1 (15.5)	1.03 (0.66)
GNR(1.0)	30:70	15.6 (13.8)	13.9 (14.6)	14.9 (13.8)	14.8 (14.1)	0.87 (0.46)
	50:50	14.6 (14.4)	15.0 (12.2)	15.0 (14.0)	14.9 (13.5)	0.19 (1.19)
	70:30	14.9 (15.1)	16.3 (15.0)	16.0 (15.9)	15.7 (15.3)	0.70 (0.51)
	100:0	15.6 (14.8)	14.4 (15.9)	15.2 (15.0)	15.0 (15.3)	0.59 (0.59)

ตาราง 3.3 ระยะยืด ณ จุดขาดของยางธรรมชาติผสมยางฟลูออโรคาร์บอน และยางธรรมชาติกราฟต์และยางฟลูออโรคาร์บอนก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชม.

ชนิดของยาง	อัตราส่วนการผสม	ระยะยืด ณ จุดขาดก่อนการบ่มเร่ง (หลังการบ่มเร่ง) (ร้อยละ)				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	S.D.
NR	0:100	442 (463)	424 (479)	430 (461)	432 (468)	9.01 (9.70)
	30:70	566 (256)	555 (296)	542 (311)	554 (288)	12.2 (28.6)
	50:50	697 (Melt)	624 (Melt)	631 (Melt)	650 (Melt)	40.6 (Melt)
	70:30	779 (Melt)	703 (Melt)	706 (Melt)	729 (Melt)	42.9 (Melt)
	100:0	669 (Melt)	880 (Melt)	894 (Melt)	815 (Melt)	126 (Melt)
GNR(0.3)	30:70	413 (560)	510 (590)	471 (525)	465 (558)	48.8 (32.5)
	50:50	499 (542)	501 (493)	436 (494)	479 (510)	37.0 (28.4)
	70:30	554 (473)	462 (381)	509.46	508 (427)	46.1 (65.7)
	100:0	404 (466)	452 (532)	444 (231)	433 (499)	25.6 (46.7)
GNR(0.5)	30:70	445 (546)	371 (599)	422 (398)	413 (572)	38.2 (37.2)
	50:50	466 (366)	448 (367)	423 (373)	446 (369)	21.8 (4.05)
	70:30	412 (340)	407 (470)	267 (361)	362 (390)	82.5 (69.9)
	100:0	365 (366)	285 (343)	348 (354)	332 (354)	41.9 (11.9)
GNR(0.75)	30:70	347 (440)	399 (363)	357 (424)	367 (409)	28.0 (40.6)
	50:50	428 (301)	395 (285)	354 (290)	392 (292)	37.1 (7.94)
	70:30	326 (293)	271 (295)	299 (147)	299 (294)	27.2 (0.89)
	100:0	328 (305)	320 (315)	344 (334)	331 (318)	11.9 (14.6)
GNR(1.0)	30:70	433 (357)	351 (382)	350 (388)	378 (376)	47.8 (16.8)
	50:50	353 (336)	317 (252)	272 (294)	314 (294)	41.0 (42.4)
	70:30	228 (263)	272 (262)	247 (328)	249 (284)	22.0 (37.9)
	100:0	231 (189)	222 (195)	191 (205)	215 (196)	21.2 (7.92)

ตาราง 3.4 ความแข็งของยางธรรมชาติผสมยางฟลูออโรคาร์บอน และยางธรรมชาติกราฟต์และยางฟลูออโรคาร์บอนก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่ 100 °ซ เป็นเวลา 24 ชม.

ชนิดของยาง	อัตราส่วนการผสม	ความแข็งก่อนการบ่มเร่ง (หลังการบ่มเร่ง)				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	S.D.
NR	0:100	48.0 (53.0)	47.5 (52.0)	50.5 (52.0)	48.7 (52.3)	1.61 (0.58)
	30:70	44.0 (48.0)	43.0 (48.0)	46.0 (47.0)	44.3 (47.7)	1.53 (0.58)
	50:50	35.0 (Melt)	35.0 (Melt)	38.0 (Melt)	36.0 (Melt)	1.73 (Melt)
	70:30	29.0 (Melt)	29.0 (Melt)	29.0 (Melt)	29.0 (Melt)	0.00 (Melt)
	100:0	23.0 (Melt)	23.0 (Melt)	23.0 (Melt)	23.0 (Melt)	0.00 (Melt)
GNR(0.3)	30:70	57.0 (57.0)	58.0 (61.0)	58.0 (62.0)	57.7 (60.0)	0.58 (2.65)
	50:50	61.0 (66.0)	60.0 (65.0)	62.0 (65.0)	61.0 (65.3)	1.00 (0.58)
	70:30	58.0 (64.0)	59.0 (64.0)	59.0 (64.0)	58.7 (64.0)	0.58 (0.00)
	100:0	45.0 (46.0)	45.0 (44.0)	44.0 (44.0)	44.7 (44.7)	0.58 (1.15)
GNR(0.5)	30:70	67.0 (69.0)	67.0 (69.5)	66.0 (69.5)	66.7 (69.3)	0.58 (0.29)
	50:50	71.0 (77.0)	72.0 (75.0)	72.0 (76.0)	71.7 (76.0)	0.58 (1.00)
	70:30	74.0 (83.0)	76.0 (81.0)	78.0 (82.0)	76.0 (82.0)	2.00 (1.00)
	100:0	73.0 (76.0)	75.0 (75.0)	74.0 (75.0)	74.0 (75.3)	1.00 (0.58)
GNR(0.75)	30:70	68.0 (71.0)	70.0 (71.0)	70.0 (69.0)	69.3 (70.3)	1.15 (1.15)
	50:50	78.0 (80.0)	79.0 (80.0)	79.0 (78.0)	78.7 (79.3)	0.58 (1.15)
	70:30	86.0 (89.5)	86.0 (90.5)	88.0 (90.5)	86.7 (90.2)	1.15 (0.58)
	100:0	90.0 (92.0)	88.0 (92.0)	91.0 (93.0)	89.7 (92.3)	1.53 (0.58)
GNR(1.0)	30:70	77.0 (77.0)	77.0 (78.0)	77.0 (78.0)	77.0 (77.7)	0.00 (0.58)
	50:50	82.0 (85.5)	85.0 (86.0)	85.0 (87.0)	84.0 (86.2)	1.73 (0.76)
	70:30	91.0 (90.0)	90.0 (92.0)	90.0 (94.0)	90.3 (92.0)	0.58 (2.00)
	100:0	97.0 (96.5)	96.0 (96.5)	97.0 (97.0)	96.7 (96.7)	0.58 (0.29)

3.5 สมบัติการบวมตัวยางธรรมชาติผสมยางฟลูออโรคาร์บอน และยางธรรมชาติกราฟต์และยางฟลูออโรคาร์บอนในน้ำมันแกโซฮอล

ตาราง 3.5 ร้อยละของการบวมตัวของยางธรรมชาติผสมยางฟลูออโรคาร์บอน และยางธรรมชาติกราฟต์และยางฟลูออโรคาร์บอนในน้ำมันแกโซฮอล E10

ชนิดของยาง	อัตราส่วนการผสม	การบวมตัว (ร้อยละ)				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	S.D.
NR	0:100	9.68	9.28	8.70	9.22	0.49
	30:70	69.2	65.6	61.6	65.5	3.80
	50:50	97.7	94.3	97.5	96.5	1.89
	70:30	168	139	165	158	15.7
	100:0	219	219	236	225	9.78
GNR(0.3)	30:70	70.5	67.4	68.1	68.7	1.61
	50:50	153	103	99.0	118	29.8
	70:30	131	119	121	124	6.40
	100:0	432	391	352	392	40.1
GNR(0.5)	30:70	78.8	76.0	97.22	83.99	11.5
	50:50	134	122	120	126	7.67
	70:30	199	174	185	186	12.3
	100:0	395	356	345	365	25.9
GNR(0.75)	30:70	78.2	80.0	76.4	78.2	1.80
	50:50	128	121	118	122	5.06
	70:30	178	171	177	175	3.91
	100:0	358	325	297	327	30.7
GNR(1.0)	30:70	75.3	71.9	76.5	74.6	2.37
	50:50	121	120	111	117	5.39
	70:30	229	214	206	216	11.8
	100:0	289	285	295	290	5.46
O-ring					15.3	

ตาราง 3.6 ร้อยละของการบวมตัวของยางธรรมชาติผสมยางฟลูออโรคาร์บอน และยางธรรมชาติกราฟต์และยางฟลูออโรคาร์บอนในน้ำมันแกโซฮอล E20

ชนิดของยาง	อัตราส่วนการผสม	การบวมตัว (ร้อยละ)				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	S.D.
NR	0:100	4.60	6.74	5.68	5.67	1.07
	30:70	56.3	64.8	67.4	62.8	5.85
	50:50	100	109	107	105	4.80
	70:30	177	153	159	163	12.0
	100:0	223	238	227	229	7.46
GNR(0.3)	30:70	62.7	55.4	58.7	58.9	3.63
	50:50	90.7	87.6	80.2	86.2	5.41
	70:30	110	101	92.4	101	8.65
	100:0	308	277	251	279	28.4
GNR(0.5)	30:70	79.5	77.0	67.9	74.8	6.11
	50:50	124	112	111	116	6.83
	70:30	175	155	164	165	10.2
	100:0	294	286	269	283	12.9
GNR(0.75)	30:70	70.8	73.1	72.1	72.0	1.13
	50:50	119	117	119	119	1.34
	70:30	206	199	174	193	16.7
	100:0	266	265	248	260	10.2
GNR(1.0)	30:70	79.7	75.3	70.5	75.2	4.66
	50:50	126	90.5	100	106	18.6
	70:30	188	181	170	180	8.87
	100:0	231	240	225	232	7.43
O-ring					15.9	

ตาราง 3.7 ร้อยละของการบวมตัวของยางธรรมชาติผสมยางฟลูออโรคาร์บอน และยางธรรมชาติกราฟต์และยางฟลูออโรคาร์บอนในน้ำมันแกโซฮอล E50

ชนิดของยาง	อัตราส่วนการผสม	การบวมตัว (ร้อยละ)				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	S.D.
NR	0:100	5.83	4.17	6.25	5.42	1.10
	30:70	34.8	38.1	36.8	36.6	1.65
	50:50	47.1	44.2	41.9	44.4	2.64
	70:30	57.1	55.4	57.0	56.5	0.95
	100:0	64.4	65.9	66.7	65.6	1.17
GNR(0.3)	30:70	38.8	40.0	38.4	39.0	0.85
	50:50	44.0	43.8	40.2	42.7	2.13
	70:30	49.5	35.4	46.9	44.0	7.51
	100:0	91.4	92.0	91.6	91.7	0.33
GNR(0.5)	30:70	54.2	46.4	45.5	48.7	4.81
	50:50	58.5	58.3	60.0	59.0	0.92
	70:30	71.0	71.6	69.0	70.5	1.35
	100:0	94.6	89.8	97.2	93.8	3.73
GNR(0.75)	30:70	47.5	46.3	44.6	46.1	1.48
	50:50	62.3	59.8	63.9	62.0	2.06
	70:30	77.0	78.7	94.2	83.3	9.48
	100:0	98.3	101	102	100	1.77
GNR(1.0)	30:70	45.1	47.6	48.1	46.9	1.62
	50:50	60.7	58.6	58.7	59.3	1.17
	70:30	83.8	86.5	86.3	85.5	1.47
	100:0	101	98.0	98.0	99.0	1.70
O-ring					14.3	

ตาราง 3.8 ร้อยละของการบวมตัวของยางธรรมชาติผสมยางฟลูออโรคาร์บอน และยางธรรมชาติกราฟต์และยางฟลูออโรคาร์บอนในน้ำมันแกโซฮอล E85

ชนิดของยาง	อัตราส่วนการผสม	การบวมตัว (ร้อยละ)				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	S.D.
NR	0:100	5.62	4.08	5.62	5.11	0.89
	30:70	10.2	11.4	10.9	10.8	0.57
	50:50	9.30	10.6	6.67	8.85	2.00
	70:30	12.5	8.65	7.41	9.52	2.65
	100:0	8.43	9.30	7.06	8.26	1.13
GNR(0.3)	30:70	12.2	11.1	11.6	11.6	0.53
	50:50	10.3	13.4	12.3	12.0	1.56
	70:30	12.9	13.4	16.1	14.1	1.74
	100:0	16.8	25.7	22.1	21.6	4.49
GNR(0.5)	30:70	17.7	16.9	11.4	15.3	3.43
	50:50	18.3	19.2	19.8	19.1	0.75
	70:30	20.8	16.7	21.00	19.5	2.45
	100:0	20.2	19.8	18.52	19.5	0.87
GNR(0.75)	30:70	13.4	11.5	12.1	12.4	0.96
	50:50	13.9	13.1	13.8	13.6	0.40
	70:30	20.2	14.4	18.6	17.7	2.98
	100:0	21.5	21.2	20.2	21.0	0.71
GNR(1.0)	30:70	11.7	10.6	14.6	12.3	2.09
	50:50	13.2	15.3	16.5	15.0	1.67
	70:30	18.8	23.2	21.9	21.3	2.30
	100:0	26.9	16.5	27.4	23.6	6.14
O-ring					5.71	

ตาราง 3.9 ร้อยละของการบวมตัวของยางธรรมชาติผสมยางฟลูออโรคาร์บอน และยางธรรมชาติกราฟต์และยางฟลูออโรคาร์บอนในเอทานอลบริสุทธิ์ (ความบริสุทธิ์ 95%)

ชนิดของยาง	อัตราส่วนการผสม	การบวมตัว (ร้อยละ)				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	S.D.
NR	0:100	0.00	1.10	0.00	0.37	0.64
	30:70	3.41	1.11	3.41	2.64	1.33
	50:50	5.88	2.25	2.33	3.49	2.07
	70:30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	100:0	0.00	1.16	1.14	0.77	0.66
GNR(0.3)	30:70	10.0	9.64	6.59	8.74	1.87
	50:50	7.29	7.14	7.83	7.42	0.36
	70:30	8.91	7.62	8.25	8.26	0.65
	100:0	18.6	8.49	19.8	15.6	6.22
GNR(0.5)	30:70	9.20	12.7	10.2	10.7	1.78
	50:50	11.3	15.8	11.3	12.8	2.57
	70:30	14.6	15.2	15.0	14.9	0.30
	100:0	18.9	19.6	14.3	17.6	2.87
GNR(0.75)	30:70	12.2	8.54	8.70	9.81	2.07
	50:50	10.8	13.5	13.5	12.6	1.54
	70:30	38.9	17.6	-	28.2	15.1
	100:0	23.7	21.7	24.2	23.2	1.29
GNR(1.0)	30:70	11.0	10.5	11.6	11.0	0.58
	50:50	14.9	18.6	17.4	17.0	1.85
	70:30	21.4	22.2	23.7	22.5	1.16
	100:0	24.5	25.0	26.4	25.3	0.95
O-ring					4.48	

3.6 ราคาของยางธรรมชาติกราฟต์ และยางธรรมชาติกราฟต์ผสมยางฟลูออโรคาร์บอน

ตารางที่ 3.10 ราคายางธรรมชาติกราฟต์

เกรด	ปริมาณมอนอเมอร์ (ส่วนต่อยาง 100 ส่วน)	ร้อยละยางธรรมชาติกราฟต์	น้ำหนักผลิตภัณฑ์กราฟต์ที่ได้ (กรัม)	ราคา บาท/ก.ก.
1	30	71.66	106.11	1,338.81
2	50	77.58	126.59	1,129.93
3	75	69.78	168.88	854.23
4	100	65.12	177.51	819.16

ตารางที่ 3.11 ราคายางผสมระหว่างยางธรรมชาติกราฟต์และยางฟลูออโรคาร์บอน

GNR/FKM	เกรดของยางธรรมชาติกราฟต์				
	FKM	1	2	3	4
0 / 100	2386.94	2386.94	2386.94	2386.94	2386.94
30 / 70	-	2128.58	2065.92	1983.21	1972.69
50 / 50	-	1956.34	1851.90	1714.05	1696.52
70 / 30	-	1784.11	1637.89	1444.90	1420.35
100 / 0	-	1525.75	1316.87	1041.17	1006.10

บทที่ 4
วิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการกราฟต์โคพอลิเมอไรเซชัน (Graft copolymerization) ของพอลิเมทิลเมทาคริเลต (Poly (methyl methacrylate, PMMA)) บนยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) เพื่อให้ยางธรรมชาติมีสภาพขั้วเพิ่มขึ้น และสามารถผสมกับยางฟลูออโรคาร์บอน (Fluorocarbon rubber, FKM) ได้ ยางผสมที่ได้นำมาขึ้นรูปด้วยเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการขึ้นรูป หลังจากนั้นนำยางผสมมาทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) ก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน และทดสอบค่าการบวมตัวในน้ำมันแกโซฮอลที่มีปริมาณแอลกอฮอล์แตกต่างกัน 5 ชนิด ได้แก่ E10 E20 E50 E85 และเอทานอลบริสุทธิ์ (ความบริสุทธิ์ 95%) หลังจากนั้นวิเคราะห์หาราคาของยางผสมเทียบกับราคาของยางฟลูออโรคาร์บอน

4.1 โครงสร้างของยางธรรมชาติกราฟต์

ยางธรรมชาติกราฟต์ด้วยเมทิลเมทาคริเลต (รูปที่ 4.1) ประกอบด้วยสายโซ่หลัก คือ ยางธรรมชาติและมีกิ่งสาขาของโคพอลิเมอร์ของเมทิลเมทาคริเลต โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของการใช้ปริมาณเมทิลเมทาคริเลต (Methyl methacrylate, MMA) ที่แตกต่างกันต่อยางธรรมชาติ 100 ส่วน ได้แก่ 30 (GNR0.3) 50 (GNR0.5) 75 (GNR0.75) และ 100 ส่วน (GNR1.0) จากการตรวจสอบโครงสร้างของยางธรรมชาติกราฟต์เมทิลเมทาคริเลตด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) เทียบกับโครงสร้างของยางธรรมชาติดังรูปที่ 3.1 พบว่ากราฟต์โคพอลิเมอไรเซชันของเมทิลเมทาคริเลตบนยางธรรมชาติปรากฏสเปกตรัมที่ความยาวคลื่น 1,724 ซม$^{-1}$ และที่ความยาวคลื่น 1,144 ซม$^{-1}$ ซึ่งแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิล (C=O stretching) และหมู่อะคริเลต (C-O-C stretching) [11] ตามลำดับ

รูปที่ 4.1 ยางธรรมชาติกราฟต์ด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต

4.2 กราฟต์โคพอลิเมอไรเซชันของเมทิลเมทาคริเลตบนยางธรรมชาติ

ศึกษาผลของปริมาณเมทิลเมทาคริเลตที่ใช้ในการกราฟต์บนยางธรรมชาติที่มีต่อร้อยละของการเปลี่ยนแปลง (%Conversion) ร้อยละของประสิทธิภาพการกราฟต์ (%Grafting efficiency) ร้อยละยางธรรมชาติกราฟต์ (%GNR) ร้อยละยางธรรมชาติที่ไม่เกิดการกราฟต์ (%Free NR) และร้อยละของเมทิลเมทาคริเลตที่เหลือจากการกราฟต์ (%Free monomer) โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชม. ใช้ปริมาณเมทิลเมทาคริเลตที่แตกต่างกันต่อยางธรรมชาติ 100 ส่วน ได้แก่ 30 (GNR0.3) 50 (GNR0.5) 75 (GNR0.75) และ 100 ส่วน (GNR1.0) ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเมทิลเมทาคริเลตจาก 30 เป็น 50 ส่วน ส่งผลให้ร้อยละยางธรรมชาติกราฟต์ และร้อยละประสิทธิภาพการกราฟต์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และสมบัติการกราฟต์มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเมทิลเมทาคริเลตสูงกว่า 50 ส่วน เช่นเดียวกับร้อยละของยางธรรมชาติที่ไม่เกิดการกราฟต์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของเมทิลเมทาคริเลตมากกว่า 50 ส่วนต่อยางธรรมชาติ 100 ส่วน สามารถสรุปได้ว่าการใช้เมทิลเมทาคริเลตที่มากเกินไปอาจเกิดเป็นโฮโมพอลิเมอร์มากจนทำให้ร้อยละยางธรรมชาติกราฟต์ลดลง สำหรับปริมาณเมทิลเมทาคริเลตที่ 75 ส่วน พบว่ามีร้อยละการเปลี่ยนแปลงมอนอเมอร์มากที่สุด แต่เมื่อพิจารณาถึงร้อยละยางธรรมชาติกราฟต์ เห็นได้ว่ามีค่าน้อยกว่าการใช้เมทิลเมทาคริเลตที่ 50 ส่วน ทั้งนี้เป็นเพราะปริมาณเมทิลเมทาคริเลตที่มากเกินไปอาจเกิดการจับตัวกันเองเป็นพอลิเมทิลเมทาคริเลต (Polymethylmethacrylate, PMMA) ดังนั้นที่อัตราส่วนของเมทิลเมทาคริเลตเท่ากับ 50 ส่วนต่อยางธรรมชาติ 100 ส่วน จึงเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการกราฟต์โคพอลิเมอไรเซชัน

4.3 ลักษณะการวัลคาไนเซชันของยางธรรมชาติผสมยางฟลูออโรคาร์บอนและยางธรรมชาติกราฟต์ผสมยางฟลูออโรคาร์บอน

เมื่อผสมยางธรรมชาติกับยางฟลูออโรคาร์บอน และยางธรรมชาติกราฟต์กับยางฟลูออโรคาร์บอนบนเครื่องผสมแบบเปิด 2 ลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้อัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติกราฟต์ต่อยางฟลูออโรคาร์บอน 5 อัตราส่วน ได้แก่ 0/100 30/70 50/50 70/30 และ 100/0 วิเคราะห์ลักษณะการวัลคาไนเซชันของยางผสมด้วยเครื่อง Oscillating Disc Rheometer (ODR) ที่อุณหภูมิ

ตารางที่ 4.1 ผลของปริมาณเมทิลเมทาคริเลตต่อสมบัติการกราฟต์ของกราฟต์โคพอลิเมอไรเซชันของเมทิลเมทาคริเลตบนยางธรรมชาติ

ปริมาณมอนอเมอร์ (ส่วนต่อยาง 100 ส่วน)	ร้อยละของการเปลี่ยนแปลง	ร้อยละของประสิทธิภาพการกราฟต์	ร้อยละยางธรรมชาติกราฟต์	ร้อยละยางธรรมชาติที่ไม่เกิดการกราฟต์	ร้อยละของเมทิลเมทาคริเลตที่เหลือจากกราฟต์
30	59.71	26.88	71.66	19.96	8.37
50	93.72	70.43	77.58	14.49	7.93
75	99.96	66.04	69.78	15.68	14.54
100	24.57	9.20	65.12	22.54	12.34

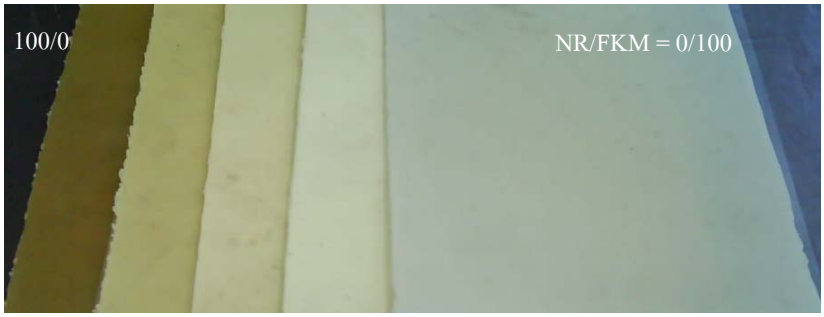
170 องศาเซลเซียสเพื่อหาเวลาที่ยางเกิดการคงรูปก่อนกำหนด (Scorch time, Ts_2) และเวลาที่เหมาะสมในการวัลคาไนเซชัน (Cure time, T_{c90}) ได้ผลแสดงในรูปที่ 3.3 และตารางที่ 4.2 พบว่าเวลาที่ยางเกิดการคงรูปก่อนกำหนดและเวลาที่เหมาะสมในการวัลคาไนเซชันของยางผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยางฟลูออโรคาร์บอนลดลง แสดงให้เห็นว่าการเติมยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติกราฟต์สามารถยับยั้งการเกิดการเชื่อมขวางขณะเกิดวัลคาไนเซชันด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ หรืออาจเป็นไปได้ว่าระบบเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการวัลคาไนเซชันว่องไวกับยางฟลูออโรคาร์บอนมากกว่ายางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติกราฟต์ และเมื่อพิจารณาค่าความทนทานต่อแรงบิด (Torque) ซึ่งเป็นตัวแทนของปริมาณความหนาแน่นของการเชื่อมขวางซึ่งได้จากการวัลคาไนเซชัน พบว่ายางผสมทั้ง 2 ประเภทมีค่าความทนทานต่อแรงบิดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยางฟลูออโรคาร์บอนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยางธรรมชาติกราฟต์ที่ได้จากการใช้ปริมาณยางธรรมชาติต่อเมทิลเมทาคริเลตที่ 1:0.3 ผสมกับยางฟลูออโรคาร์บอนที่อัตราส่วน 30/70 ร้อยละโดยน้ำหนักให้ค่าการทนต่อแรงบิดมากที่สุดเท่ากับ 35.9 ปอนด์-นิ้ว ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับยางฟลูออโรคาร์บอน (36.7 ปอนด์-นิ้ว)

ตารางที่ 4.2 ลักษณะการวัลคาไนเซชันของยางธรรมชาติผสมยางฟลูออโรคาร์บอน และยางธรรมชาติกราฟต์ผสมยางฟลูออโรคาร์บอนจากเครื่อง ODR ที่ 170 องศาเซลเซียส

ตัวอย่าง	อัตราส่วนการผสม (NR หรือ GNR/FKM)	แรงบิดต่ำสุด (ปอนด์-นิ้ว)	แรงบิดสูงสุด (ปอนด์-นิ้ว)	Ts_2(นาที)	Tc_{90}(นาที)
NR	0 / 100	8.40	36.7	1.46	10.5
	30 / 70	4.20	34.1	2.23	12.1
	50 / 50	4.00	26.0	2.41	16.4
	70 / 30	3.60	21.1	2.46	18.5
	100 / 0	3.70	15.0	2.42	18.4
GNR(0.3)	30 / 70	6.50	35.9	2.20	16.4
	50 / 50	5.70	24.4	2.17	21.1
	70 / 30	5.20	19.7	2.37	19.6
	100 / 0	6.30	17.3	3.17	19.6
GNR(0.5)	30 / 70	7.60	30.2	2.53	18.4
	50 / 50	7.50	24.1	3.07	23.1
	70 / 30	7.40	21.5	3.05	22.6
	100 / 0	7.40	19.7	2.90	20.2
GNR(0.75)	30 / 70	8.30	31.0	2.75	18.0
	50 / 50	9.20	24.3	2.98	21.0
	70 / 30	6.60	21.9	2.75	20.3
	100 / 0	10.60	22.7	2.52	15.7
GNR(1.0)	30 / 70	8.80	29.5	2.98	20.9
	50 / 50	8.10	25.7	2.93	22.0
	70 / 30	8.30	22.8	3.00	22.1
	100 / 0	8.70	19.8	3.22	23.9

4.4 สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติผสมยางฟลูออโรคาร์บอน และยางธรรมชาติกราฟต์ผสมยางฟลูออโรคาร์บอน

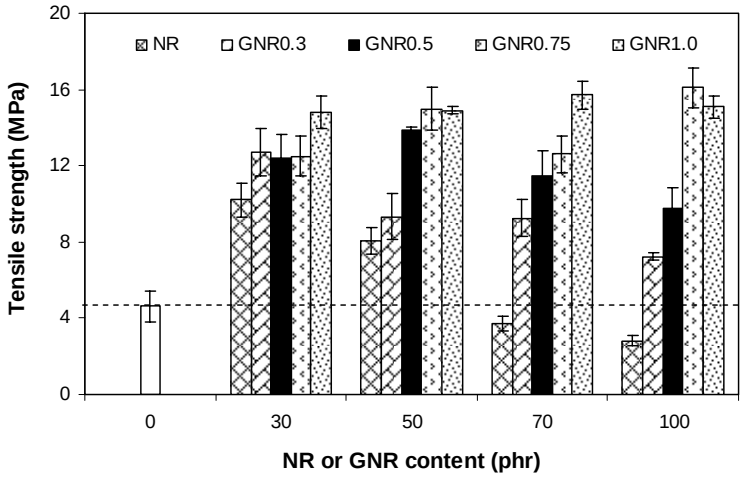
ภายหลังขึ้นรูปยางผสมด้วยเทคนิคกดอัด (Compression molding) ที่ 170 องศาเซลเซียส ความดัน 150 ก.ก./ตร.ซม. เมื่อพิจารณาจากลักษณะภายนอกของแผ่นยางผสมเมื่อการวัลคาไนเซชันแล้วพบว่ายางผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสีขาวขึ้นเมื่อมีปริมาณยางฟลูออโรคาร์บอนมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.2 จากนั้นทำการตรวจวัดสมบัติเชิงกลของยางผสมด้านการทนต่อแรงดึง (Tensile strength) ระยะยืด ณ จุดขาด (Ultimate elongation) และความแข็ง (Hardness) ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่าการใช้ยางธรรมชาติผสมยางฟลูออโรคาร์บอนที่อัตราส่วน 30/70 มีความทนทานต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดสูงกว่ายางฟลูออโรคาร์บอนทั้งนี้เป็นอิทธิพลจากยางธรรมชาติที่มีค่าความทนทานต่อแรงดึงและมีความยืดหยุ่นสูง อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติในยางผสมกลับพบว่าความทนทานต่อแรงดึงและค่าความแข็งมีค่าลดลง ขณะที่ระยะยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นอย่างมาก แสดงให้เห็นว่ายางผสมที่ได้มีความเชื่อมขวาง (crosslink) ลดลง ทั้งนี้อาจเป็นผลอันเนื่องมาจากการเกิดการเข้ากันไม่ได้ระหว่างยางธรรมชาติซึ่งเป็นยางที่ไม่มีขั้วกับยางฟลูออโรคาร์บอนซึ่งเป็นยางที่มีขั้วสูงจึงทำให้เกิดการแยกวัฏภาคยางส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางผสมด้อยลง นอกจากนี้เมื่อพิจารณายางธรรมชาติเพียงอย่างเดียว พบว่าความทนทานต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดต่ำมาก แสดงให้เห็นว่าระบบวัลคาไนเซชันที่ใช้ไม่เหมาะสมกับยางธรรมชาติ จึงเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ไม่สามารถนำยางธรรมชาติมาใช้ผสมกับยางฟลูออโรคาร์บอนได้โดยตรง สำหรับสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติกราฟต์ผสมยางฟลูออโรคาร์บอนแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานที่ได้มีค่าความทนทานต่อแรงดึงและค่าความแข็งสูงกว่ายางฟลูออโรคาร์บอน โดยพบว่าการใช้ยางธรรมชาติกราฟต์ที่ได้มาจากการใช้มอนอเมอร์ MMA มากขึ้นและการเพิ่มขึ้นของปริมาณยางธรรมชาติกราฟต์ในยางผสมช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีความสามารถในการรองรับแรงดึงได้สูงขึ้นด้วย แต่การเพิ่มขึ้นของปริมาณมอนอเมอร์ขณะเตรียมยางธรรมชาติกราฟต์และปริมาณยางธรรมชาติกราฟต์ในยางผสมกลับทำให้ระยะยืด ณ จุดขาดของชิ้นงานมีค่าลดลง ทั้งนี้เป็นผลอันเนื่องมาจาก PMMA ที่อยู่ในยางธรรมชาติกราฟต์มีลักษณะแข็งจึงทำให้ชิ้นงานขาดความยืดหยุ่น



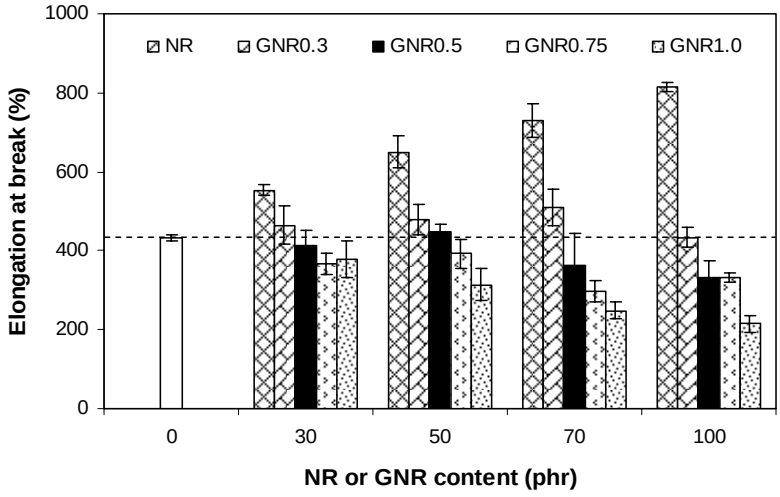
(ก)

(ข)

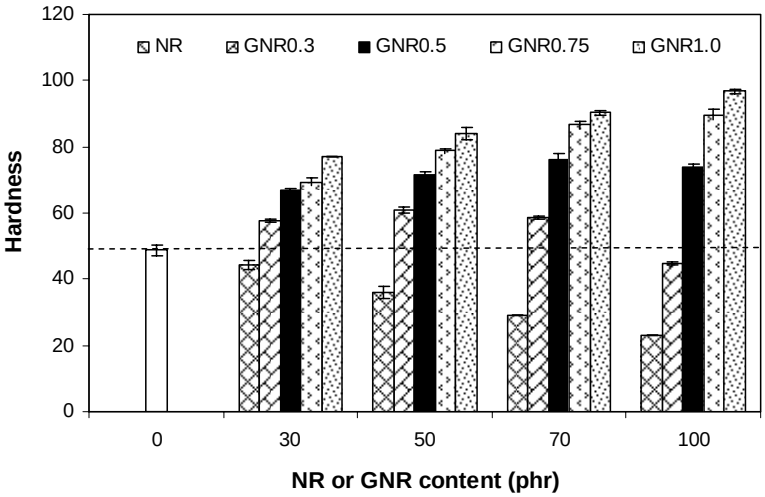
รูปที่ 4.2 ลักษณะของแผ่นยางที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วที่อัตราส่วนต่าง ๆ (ก) ยางธรรมชาติผสมยางฟลูออโรคาร์บอนและ (ข) ยางธรรมชาติกราฟต์ผสมยางฟลูออโรคาร์บอน



(ก)



(ข)

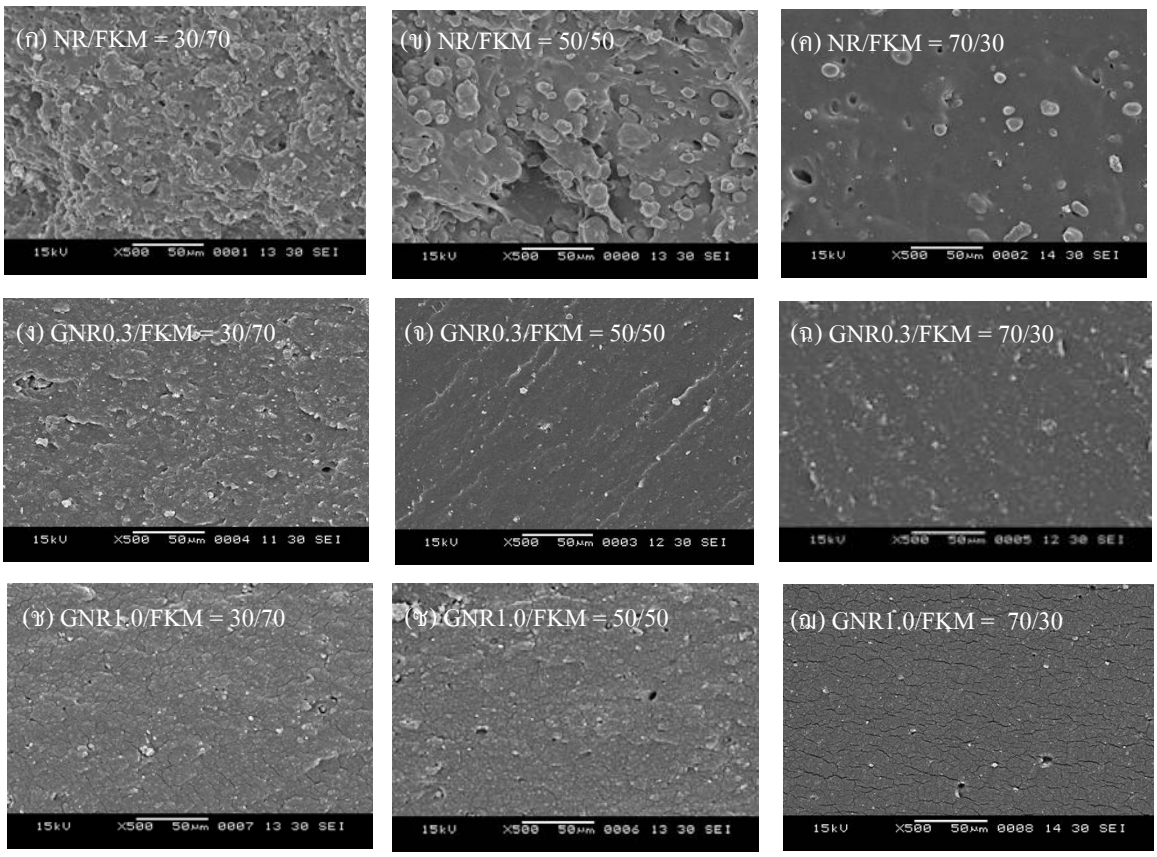


(ค)

รูปที่ 4.3 ผลของปริมาณมอนอเมอร์และอัตราส่วนการผสมต่อสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติกราฟต์ผสมยางฟลูออโรคาร์บอนเทียบกับยางฟลูออโรคาร์บอน และยางธรรมชาติผสมยางฟลูออโรคาร์บอน: (ก) ความต้านทานแรงดึง (ข) ระยะยืด ณ จุดขาด และ (ค) ความแข็ง

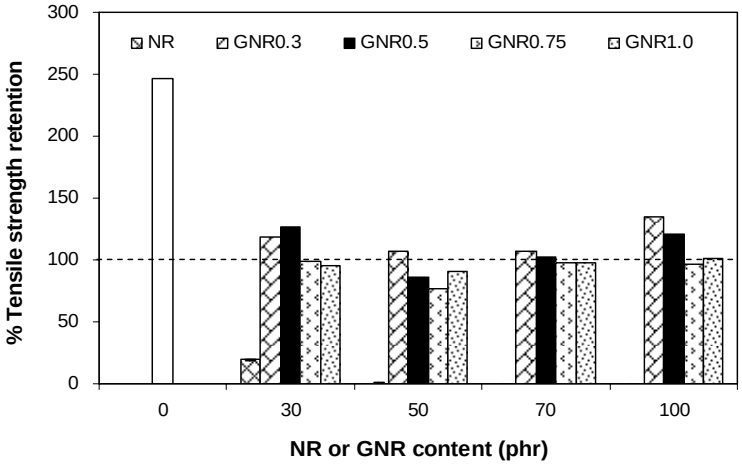
ดังนั้นเมื่อใช้เกณฑ์สมบัติเชิงกลที่ได้จากยางฟลูออโรคาร์บอนเพียงอย่างเดียวพบว่ายางธรรมชาติกราฟต์ที่ได้จากการเตรียมโดยใช้มอนอเมอร์ MMA ที่ 30 ส่วนในยางธรรมชาติ 100 ส่วน (GNR0.3) และอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกราฟต์และยางฟลูออโรคาร์บอนที่ร้อยละ 50/50 โดยน้ำหนักจะเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดเนื่องจากให้ค่าความความทนทานต่อแรงดึงสูง (12.7 เมกกะปาสคาล) ขณะที่ค่าความแข็งสูงกว่ายางฟลูออโรคาร์บอนประมาณ 18.5% แต่มีความระยะยืด ณ จุดขาดใกล้เคียงกับยางฟลูออโรคาร์บอน (465%)

เมื่อวิเคราะห์สัณฐานวิทยา (Morphology) ของพื้นผิวชิ้นงานที่ได้จากการดึงเพื่อวัดค่าความต้านแรงดึง (Tensile fracture surface) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 พบว่ายางผสมยางธรรมชาติและยางฟลูออโรคาร์บอนเกิดการแยกวัฏภาคกันเมื่อมีปริมาณยางธรรมชาติมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.4ก และ 4.4ข อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติไปถึง 70 ส่วน (รูปที่ 4.4ค) จะทำให้ยางธรรมชาติเป็นวัฏภาคหลักปกคลุมยางฟลูออโรคาร์บอนแต่ยังสังเกตหึ่นถึงอนุภาคยางฟลูออโรคาร์บอนที่กระจายตัวอยู่ในวัฏภาคของยางธรรมชาติ เมื่อวิเคราะห์ยางผสมยางธรรมชาติกราฟต์และยางฟลูออโรคาร์บอนเมื่อยางธรรมชาติกราฟต์สังเคราะห์มาจากการใช้มอนอเมอร์ MMA ที่ 30 ส่วน (GNR0.3) พบว่าพื้นผิวของชิ้นงานที่ได้มีลักษณะเรียบขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติกราฟต์เข้าไปในยางผสม (รูปที่ 4.4ง – 4.4ฉ) แต่การใช้ยางธรรมชาติกราฟต์ที่ได้จากการใช้มอนอเมอร์ MMA 100 ส่วน (GNR1.0) จะสังเกตเห็นรอยแตกขนาดเล็กกระจายทั่วไปบนพื้นผิวที่ได้จากการวัดค่าความต้านทานแรงดึง (รูปที่ 4.4ช – 4.4ฌ) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานขาดความยืดหยุ่นอันเป็นผลเนื่องมาจาก PMMA ที่อยู่ในยางธรรมชาติกราฟต์เป็นวัสดุที่มีความแข็งแต่เปราะ ซึ่งการเติมยางธรรมชาติกราฟต์ลงไปในยางผสมปริมาณมากจะส่งผลให้ชิ้นงานสามารถรับแรงดึงได้สูงขึ้นแต่ขาดความยืดหยุ่นที่ดี

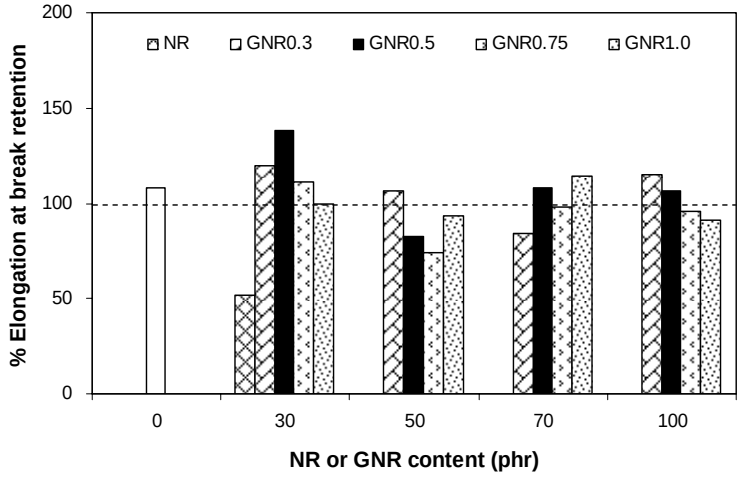


รูปที่ 4.4 ภาพพื้นผิวรอยขาดของชิ้นงาน (Tensile fracture surface) จากการวัดด้วยเครื่องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ที่กำลังขยาย 500 เท่า

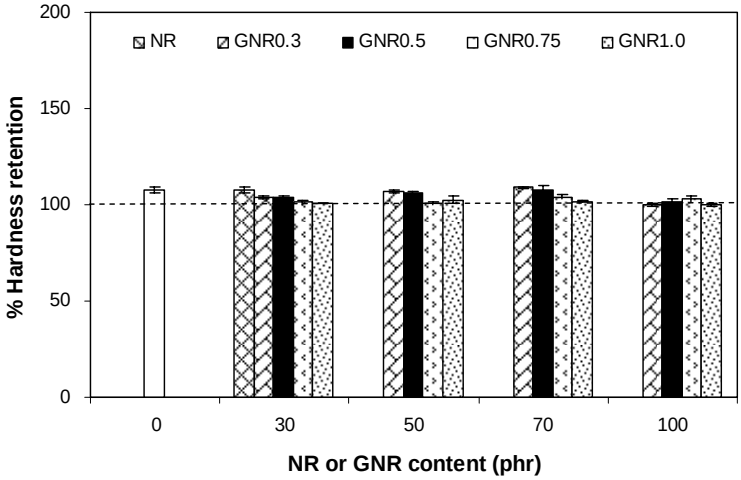
เมื่อบ่มเร่งชิ้นงานด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชม. ผลการทดลองแสดงในด้านความสามารถในการรักษาเสถียรภาพของสมบัติเชิงกล (Retention) ดังแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่ายางฟลูออโรคาร์บอนมีความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น (246%) ภายหลังการบ่มเร่ง ขณะที่ยังคงความยืดหยุ่นและค่าความแข็งไว้ได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานก่อนการบ่มเร่ง ดังนั้นชิ้นงานที่ผลิตจากยางฟลูออโรคาร์บอนจึงจำเป็นต้องมีการบ่มเร่งภายหลังจากขึ้นรูปชิ้นงานเรียบร้อยแล้วเพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรงดึง ขณะที่ยางธรรมชาติผสมยางฟลูออโรคาร์บอนที่อัตราส่วนมากกว่าร้อยละ 30/70 โดยน้ำหนักเกิดการละลายภายหลังการบ่มเร่ง และไม่สามารถคงรูปชิ้นงานได้ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นไปได้ว่าวัฏภาคของยางธรรมชาติในยางผสมอาจเกิดการเชื่อมขวางได้ไม่ดีเนื่องจากมีความแตกต่างกันมากในด้านสภาพขั้วระหว่างยางธรรมชาติและยางฟลูออโรคาร์บอน นอกจากนี้ระบบวัลคาไนเซชันที่ใช้ซึ่งเป็นระบบวัลคาไนเซชันของยางฟลูออโรคาร์บอนอาจไม่เหมาะสมกับยางธรรมชาติ สำหรับยางผสมยางธรรมชาติกราฟต์และยางฟลูออโรคาร์บอนพบว่าชิ้นงานส่วนใหญ่สามารถรักษาสมบัติเชิงกลภายหลังการบ่มเร่งได้ดี โดยจะพบว่ายางธรรมชาติกราฟต์ที่ได้จากการใช้มอนอเมอร์ MMA ปริมาณน้อยจะมีค่าความต้านทานแรงดึงภายหลังการบ่มเร่งสูงกว่ายางธรรมชาติกราฟต์ที่ได้จากการใช้มอนอเมอร์ MMA ปริมาณมาก ทั้งนี้อาจเกิดขึ้นเนื่องจากส่วนของยางธรรมชาติที่ยังเหลืออยู่ในยางธรรมชาติกราฟต์อาจเกิดการเชื่อมขวางกันเองซึ่งเป็นผลมาจากเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในกระบวนการวัลคาไนเซชันซึ่งสามารถแตกตัวได้ดีในที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงทำให้ยางธรรมชาติกราฟต์ที่ได้จากการใช้มอนอเมอร์ MMA ที่ 30 ส่วน (GNR0.3) มีความสามารถในการรักษาเสถียรภาพสมบัติเชิงกลภายหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนได้ดีในยางผสมยางธรรมชาติกราฟต์และยางฟลูออโรคาร์บอนที่อัตราส่วนร้อยละ 50/50 โดยน้ำหนัก



(ก)



(ข)



(ค)

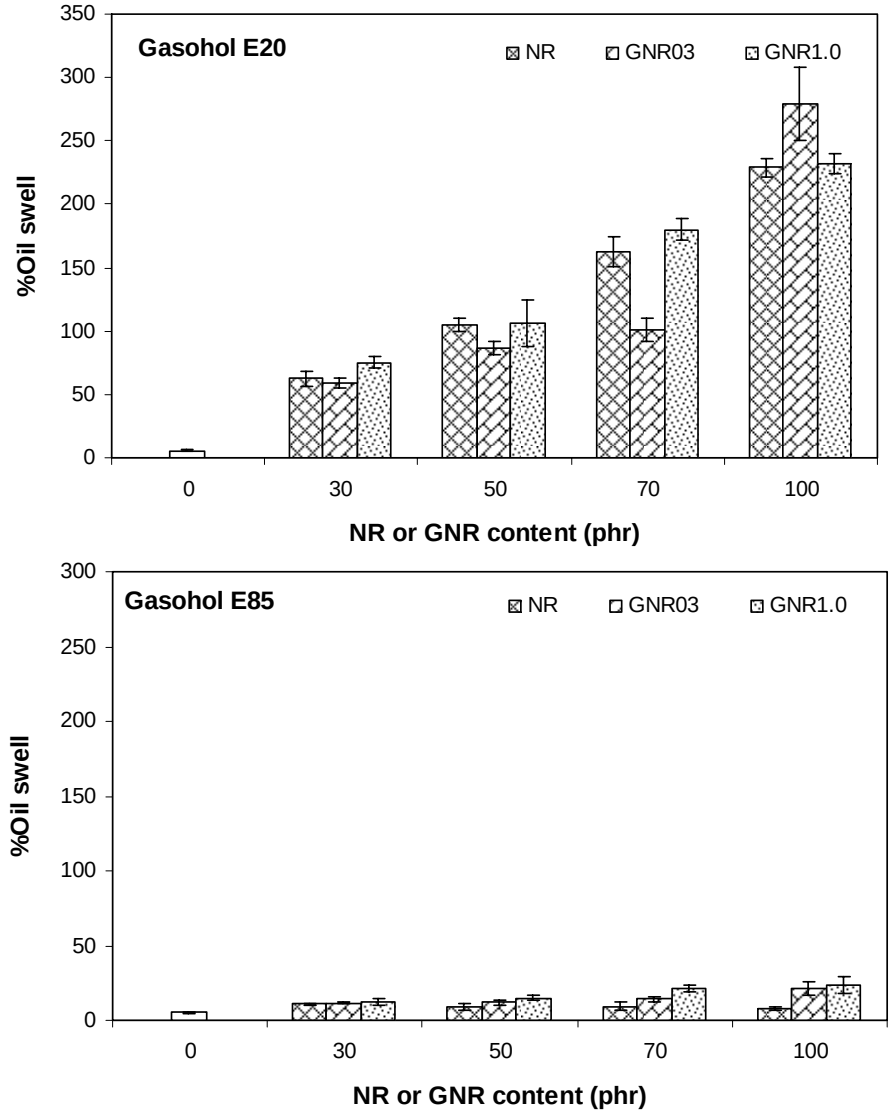
รูปที่ 4.5 ผลของปริมาณมอนอเมอร์และอัตราส่วนการผสมต่อการรักษาเสถียรภาพ (Retention) ของสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติกราฟต์ผสมยางฟลูออโรคาร์บอนภายหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชม. เทียบกับยางฟลูออโรคาร์บอน และยางธรรมชาติผสมยางฟลูออโรคาร์บอน: (ก) ความต้านทานแรงดึง (ข) ระยะยืด ณ จุดขาด และ (ค) ความแข็ง (%Retention = (สมบัติหลังการบ่มเร่ง / สมบัติก่อนการบ่มเร่ง) x 100)

4.5 ความต้านทานการบวมตัวในน้ำมันของยางธรรมชาติผสมยางฟลูออโรคาร์บอน และยางธรรมชาติกราฟต์ผสมยางฟลูออโรคาร์บอน

ผลการทดลองการบวมตัวในน้ำมันของยางธรรมชาติผสมยางฟลูออโรคาร์บอน และยางธรรมชาติกราฟต์ผสมยางฟลูออโรคาร์บอน โดยบ่มตัวอย่างในน้ำมันแกโซฮอลประเภทต่าง ๆ ได้แก่ E10 E20 E50 E85 และแอลกอฮอล์บริสุทธิ์ 95% ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.6 จากตารางที่ 4.3 พบว่ายางธรรมชาติกราฟต์ที่ได้จากการใช้เมทิลเมทาคริเลต 30 ส่วนในยางธรรมชาติ 100 ส่วน (GNR0.3) ผสมกับยางฟลูออโรคาร์บอนที่อัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนัก 30/70 มีค่าการบวมตัวในน้ำมันแกโซฮอลชนิดต่าง ๆ และเอทานอลบริสุทธิ์สูงกว่าการบวมตัวของยางธรรมชาติผสมยางฟลูออโรคาร์บอนเล็กน้อย เมื่อพิจารณาปริมาณเอทานอลในน้ำมันแกโซฮอล พบว่าการบวมตัวของยางผสมของยางผสมทั้ง 2 ชนิดลดลงเมื่อปริมาณเอทานอลในน้ำมันแกโซฮอลเพิ่มขึ้น เนื่องจากยางธรรมชาติไม่มีขั้วแต่ยางฟลูออโรคาร์บอนมีขั้วสูง ดังนั้นยางธรรมชาติจึงเกิดการบวมตัวในน้ำมันแกโซฮอลมากกว่ายางฟลูออโรคาร์บอน แต่เมื่อปริมาณเอทานอลในน้ำมันแกโซฮอลมากขึ้น ทำให้ความมีขั้วของน้ำมันสูงขึ้น ดังนั้นการบวมตัวของยางผสมมีค่าลดลง สำหรับยางธรรมชาติกราฟต์ผสมยางฟลูออโรคาร์บอนพบว่าการบวมตัวของยางผสมลดลงเมื่อปริมาณเอทานอลในน้ำมันแกโซฮอลเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับยางธรรมชาติผสมยางฟลูออโรคาร์บอน อย่างไรก็ตามยางธรรมชาติกราฟต์ผสมยางฟลูออโรคาร์บอนมีร้อยละของการบวมตัวมากกว่ายางธรรมชาติผสมยางฟลูออโรคาร์บอน เนื่องจากการกราฟต์เมทิลเมทาคริเลตบนยางธรรมชาติช่วยเพิ่มความมีขั้วให้กับยางธรรมชาติทำให้ความมีขั้วใกล้เคียงกับน้ำมันแกโซฮอล เป็นผลให้ยางธรรมชาติกราฟต์ผสมยางฟลูออโรคาร์บอนมีร้อยละของการบวมตัวมากกว่ายางธรรมชาติผสมยางฟลูออโรคาร์บอน จากรูปที่ 4.6 สังเกตเห็นว่ายางธรรมชาติกราฟต์มีความมีขั้วที่ใกล้เคียงกับน้ำมันแกโซฮอลมากกว่ายางฟลูออโรคาร์บอน ทำให้ยางธรรมชาติกราฟต์มีร้อยละของการบวมตัวมากกว่ายางฟลูออโรคาร์บอน แต่การนำยางผสมยางธรรมชาติกราฟต์กับยางฟลูออโรคาร์บอนจะให้ผลใกล้เคียงกับโอริงที่ผลิตจากยางฟลูออโรคาร์บอนก็ต่อเมื่อน้ำมันแกโซฮอลมีปริมาณแอลกอฮอล์ในน้ำมันอยู่สูงมาก ซึ่งเป็นไปได้ว่าการที่รัฐบาลจะผลักดันส่งเสริมการใช้น้ำมันแกโซฮอล E85 หรือการใช้แอลกอฮอล์บริสุทธิ์แทนการใช้น้ำมันฟอสซิลในอนาคตจะสามารถนำยางผสมยางธรรมชาติกราฟต์กับยางฟลูออโรคาร์บอนไปใช้ในเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันแกโซฮอลประเภทนี้แทนการใช้ยางฟลูออโรคาร์บอนที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศเพียงอย่างเดียว

ตารางที่ 4.3 การบวมตัวของยางธรรมชาติผสมยางฟลูออโรคาร์บอน และยางธรรมชาติกราฟต์ผสมยางฟลูออโรคาร์บอนที่อัตราส่วน 30/70 (ร้อยละโดยน้ำหนัก) ในน้ำมันแกโซฮอล E10 E20 E50 E85 และเอทานอลบริสุทธิ์ (95%) ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ชนิดของน้ำมัน	ร้อยละของการบวมตัว					
	โอริง	NR/FKM (30/70)	GNR(0.3)/FKM (30/70)	GNR(0.5)/FKM (30/70)	GNR(0.75)/FKM (30/70)	GNR(1.0)/FKM (30/70)
E10	15.3	65.5 ± 3.80	68.7 ± 1.61	84.0 ± 11.5	78.2 ± 1.80	74.6 ± 2.37
E20	15.9	62.8 ± 5.85	58.9 ± 3.63	74.8 ± 6.11	72.0 ± 1.13	75.2 ± 4.66
E50	14.3	36.6 ± 1.65	39.0 ± 0.85	48.7 ± 4.81	46.1 ± 1.48	46.9 ± 1.62
E85	5.71	10.8 ± 0.57	11.6 ± 0.53	15.3 ± 3.43	12.4 ± 0.96	12.3 ± 2.09
เอทานอลบริสุทธิ์	4.48	2.64 ± 1.33	8.74 ± 1.87	10.7 ± 1.78	9.81 ± 2.07	11.0 ± 0.58



รูปที่ 4.6 ร้อยละของการบวมตัวของยางธรรมชาติผสมยางฟลูออโรคาร์บอน และยางธรรมชาติกราฟต์ผสมยางฟลูออโรคาร์บอนในน้ำมันแกโซฮอล E20 และ E85 ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

4.6 ราคาของยางธรรมชาติกราฟต์ และยางธรรมชาติกราฟต์ผสมยางฟลูออโรคาร์บอน

การวิเคราะห์ราคาของยางธรรมชาติกราฟต์แสดงตัวอย่างการคำนวณในตารางที่ 4.4 และสรุปผลการคำนวณราคายางธรรมชาติกราฟต์สำหรับการใช้ปริมาณมอนอเมอร์ MMA ที่แตกต่างกันในตารางที่ 4.5 พบว่าราคาของยางธรรมชาติกราฟต์ต่ำลงเมื่อปริมาณมอนอเมอร์ MMA มากขึ้น เนื่องจากการใช้ปริมาณมอนอเมอร์มากทำให้ผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติกราฟต์หลังอบมีปริมาณมากขึ้น ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบราคายางธรรมชาติกราฟต์ต่อกิโลกรัมพบว่ายางธรรมชาติกราฟต์ที่สังเคราะห์จากการใช้มอนอเมอร์ MMA ปริมาณมากกว่ามีราคาถูกกว่า และหลังจากนำยางธรรมชาติกราฟต์มาผสมกับยางฟลูออโรคาร์บอนพบว่าเมื่อปริมาณยางฟลูออโรคาร์บอนมากขึ้นทำให้ราคาของยางผสมสูงขึ้น โดยราคาของยางผสมมีค่าอยู่ระหว่างราคาของยางธรรมชาติกราฟต์และราคาของยางฟลูออโรคาร์บอนดังแสดงในตารางที่ 4.6 และ 4.7 โดยพบว่าการนำยางธรรมชาติกราฟต์เข้าไปทดแทนการใช้ยางฟลูออโรคาร์บอนสามารถลดราคายางผสมได้ในช่วง 10.8 – 40.5% ขึ้นกับเกรดของยางธรรมชาติกราฟต์และอัตราส่วนของยางผสม ซึ่งหากมีการขยายผลในเชิงอุตสาหกรรมในการนำไปประยุกต์ใช้งานด้านซีล หรือท่อยางที่ใช้กับเครื่องยนต์แกโซฮอลจะเป็นหนทางในการลดการนำเข้ายางฟลูออโรคาร์บอนจากต่างประเทศ และเป็นการเพิ่มคุณค่าและมูลค่าของยางพาราซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยได้อีกทางหนึ่งด้วย

ตารางที่ 4.4 ตัวอย่างการคำนวณราคายางธรรมชาติกราฟต์ GNR0.3

GNR(0.3)_100:0						
Graft						
สารเคมี	ราคา	หน่วย	ปริมาณที่ใช้ต่อ 1 batch	หน่วย	ราคา (บาท)	
น้ำยางธรรมชาติ (60 phr) (NR)	42.5	บาท/กก.	200	กรัม	8.50	
เมทิลเมทาคริเลต (MMA, density= 0.936 กก./ลิตร)	42.78	บาท/ลิตร	36	กรัม	1.65	
โซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต (SDS)	1200	บาท/กก.	1.2	กรัม	1.44	
โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)	400	บาท/กก.	0.3	กรัม	0.12	
ไอโซโพรพานอล (Isopropanol, density= 0.781 กก./ลิตร)	180	บาท/ลิตร	12	กรัม	2.77	
คิวมีนไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (CHPO, density= 1.02 กก./ลิตร)	17000	บาท/ลิตร	1.2	กรัม	20.00	
เตตระเอทิลลีนเพนทามีน (TEPA, density= 0.99 กก./ลิตร)	6400	บาท/ลิตร	1.2	กรัม	7.76	
เอทานอล (Ethanol)	100	บาท/ลิตร	800	มิลลิลิตร	80.00	
เครื่องมือและอุปกรณ์	กำลัง	หน่วย	เวลาที่ใช้ต่อ 1 batch	หน่วย	ราคา (บาท)	
มอเตอร์ (Overhead stirrer)	70	W	9	ชม.	0.99	
อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water bath)	1800	W	6	ชม.	17.01	
ตู้อบ (Oven)	1600	W	12	ชม.	30.24	
ราคายางธรรมชาติกราฟต์ (GNR)					170.47	บาท/127.33กรัม
					1338.81	บาท/กก.

ตารางที่ 4.5 ราคายางธรรมชาติกราฟต์ที่สังเคราะห์ได้จากการใช้มอนอเมอร์ MMA ที่ปริมาณต่าง ๆ

เกรด	ปริมาณมอนอเมอร์ (ส่วนต่อยาง 100 ส่วน)	ร้อยละยางธรรมชาติกราฟต์	น้ำหนักผลิตภัณฑ์กราฟต์ที่ได้ (กรัม)	ราคา บาท/ก.ก.
1	30	71.7	127.3	1,339
2	50	77.6	151.9	1,130
3	75	69.8	202.7	854
4	100	65.1	213.0	819

ตารางที่ 4.6 ตัวอย่างการคำนวณราคายางธรรมชาติกราฟต์ GNR0.3 ผสมสารเคมีที่ใช้ในการวัลคาไนเซชัน

Blend						
สารเคมี	ราคา	หน่วย	ปริมาณที่ใช้ต่อ 1 batch	หน่วย	ราคา (บาท)	
ราคายางธรรมชาติกราฟต์	1338.81	บาท/กก.	120	กรัม	160.66	
2,5-ไดเมทิล-2,5-ไดเทอเทียรี่บิวทิลเปอร์ออกไซด์เฮกเซน (PO)	1700	บาท/กก.	2.4	กรัม	4.08	
ไตรแอลลิวไอโซไซยานูเลต (TAIC)	1250	บาท/กก.	1.2	กรัม	1.50	
ยางฟลูออโรคาร์บอน (FKM)	2200	บาท/กก.	0	กรัม	0.00	
เครื่องมือและอุปกรณ์	กำลัง	หน่วย	เวลาที่ใช้ต่อ 1 batch	หน่วย	ราคา (บาท)	
Two-roll mill	16400	W	15	นาที	6.46	
Two plate hydrulic press	15840	W	25	นาที	10.40	
ราคารวมทั้งหมด					183.09	บาท/120 กรัม
					1525.75	บาท/กก.
หมายเหตุ	0.045	$/kWh				

ตารางที่ 4.7 ราคายางผสมระหว่างยางธรรมชาติกราฟต์และยางฟลูออโรคาร์บอน

ตัวอย่าง	GNR/ยางฟลูออโรคาร์บอน (%ลดลงจากราคายางฟลูออโรคาร์บอน)				
	0/100	30/70	50/50	70/30	100/0
ยางฟลูออโรคาร์บอน	2387	-	-	-	-
GNR0.3	-	2120 (10.8%)	1956 (18.1%)	1784 (25.3%)	1526 (36.1%)
GNR0.5	-	2066 (13.5%)	1852 (22.4%)	1638 (31.4%)	1317 (44.8%)
GNR0.75	-	1983 (16.9%)	1714 (28.2%)	1445 (39.5%)	1041 (56.4%)
GNR1.0	-	1973 (17.3%)	1697 (28.9%)	1420 (40.5%)	1006 (57.9%)

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 โครงสร้างของยางธรรมชาติกราฟต์

ยางธรรมชาติกราฟต์เมทิลเมทาคริเลตถูกตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่องฟูเรียร์-ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier-transform Infrared spectroscopy, FT-IR) พบว่าเกิดกราฟต์โคพอลิเมอไรเซชันของเมทิลเมทาคริเลตบนยางธรรมชาติ โดยพบว่าความยาวคลื่นที่ 1,724 ซม.$^{-1}$ ซึ่งแสดงถึงหมู่คาร์บอนิล (C=O stretching) และความยาวคลื่นที่ 1,144 ซม$^{-1}$ ซึ่งแสดงถึงหมู่อะคริเลต (C-O-C stretching) ปรากฏบนยางธรรมชาติกราฟต์

5.1.2 กราฟต์โคพอลิเมอไรเซชันของเมทิลเมทาคริเลตบนยางธรรมชาติ

การศึกษาผลของปริมาณเมทิลเมทาคริเลตที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอไรเซชันของเมทิลเมทาคริเลตบนยางธรรมชาติ พบว่ายางธรรมชาติกราฟต์ที่อัตราส่วนเมทิลเมทาคริเลตเท่ากับ 50 ส่วนต่อยางธรรมชาติ 100 ส่วน มีร้อยละยางธรรมชาติกราฟต์และร้อยละของประสิทธิภาพการกราฟต์สูงที่สุด เท่ากับ77.6% และ 70.4% ตามลำดับ

5.1.3 ลักษณะการวัลคาไนเซชันของยางธรรมชาติผสมยางฟลูออโรคาร์บอนและยางธรรมชาติกราฟต์ผสมยางฟลูออโรคาร์บอน

เมื่อผสมยางธรรมชาติกับยางฟลูออโรคาร์บอน และยางธรรมชาติกราฟต์กับยางฟลูออโรคาร์บอน พบว่าเวลาที่ยางเกิดการคงรูปก่อนกำหนดและเวลาที่เหมาะสมในการวัลคาไนเซชันของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางฟลูออโรคาร์บอนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยางฟลูออโรคาร์บอนลดลง เมื่อพิจารณาค่าการทนต่อแรงบิด ยางธรรมชาติกราฟต์เมทิลเมทาคริเลตที่อัตราส่วนเมทิลเมทาคริเลต 30 ส่วนต่อยางธรรมชาติ 100 ส่วน ผสมกับยางฟลูออโรคาร์บอนที่อัตราส่วนการผสม 30/70 (ร้อยละโดยน้ำหนัก) มีค่าการทนต่อแรงบิดมากที่สุดเท่ากับ 35.9 ปอนด์-นิ้ว ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับยางฟลูออโรคาร์บอน (36.7 ปอนด์-นิ้ว)

5.1.4 สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติผสมยางฟลูออโรคาร์บอนและยางธรรมชาติกราฟต์ผสมยางฟลูออโรคาร์บอน

ความทนทานต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดของยางธรรมชาติกราฟต์ผสมยางฟลูออโรคาร์บอนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณมอนอเมอร์ MMA ที่ใช้ในการสังเคราะห์ยางธรรมชาติกราฟต์เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วนการผสมเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าการกราฟต์โคพอลิเมอไรเซชันทำให้สมบัติเชิงกลของยางดีขึ้น เมื่อนำยางผสมมาบ่มเร่งด้วยความร้อน พบว่ากราฟต์เมทิลเมทาคริเลตบนยางธรรมชาติที่อัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อเมทิลเมทาคริเลต 1:0.3 (GNR0.3) และ 1:0.5 (GNR0.5) มีความทนทานต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบว่ายางธรรมชาติกราฟต์เมทิลเมทาคริเลตที่อัตราส่วน 1:0.3 (GNR0.3) ผสมกับยางฟลูออโรคาร์บอนที่อัตราส่วนร้อยละ 50/50 โดยน้ำหนัก มีค่าการทนต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดที่เหมาะสมที่สุดโดยเทียบเคียงกับยางฟลูออโรคาร์บอนเท่ากับ 12.7 เมกกะพาสคาล และ 465% ตามลำดับ

5.1.5 การบวมตัวในน้ำมันแกโซฮอล

ค่าการบวมตัวในน้ำมันแกโซฮอลที่มีปริมาณแอลกอฮอล์ต่าง ๆ ลดลง เมื่อปริมาณของยางฟลูออโรคาร์บอนหรือปริมาณของเมทิลเมทาคริเลตในยางธรรมชาติกราฟต์เพิ่มขึ้น และอัตราส่วนของยางธรรมชาติกราฟต์ผสมกับยางฟลูออโรคาร์บอนที่ร้อยละ 30/70 โดยน้ำหนัก มีค่าการบวมตัวในน้ำมันแกโซฮอล E85 และในเอทานอลบริสุทธิ์ (ความบริสุทธิ์ 95%) ต่ำที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 11.6% และ 8.74% ตามลำดับ

5.1.6 การประเมินราคาของยางธรรมชาติกราฟต์และยางธรรมชาติกราฟต์ผสมยางฟลูออโรคาร์บอน

ยางธรรมชาติกราฟต์มีราคาถูกกว่ายางฟลูออโรคาร์บอนประมาณ 40 – 64% ขึ้นกับปริมาณมอนอเมอร์ MMA ที่ใช้ในขั้นตอนการสังเคราะห์ยางธรรมชาติกราฟต์ จึงทำให้เมื่อนำมาผสมกับยางฟลูออโรคาร์บอนจะทำให้ยางผสมมีราคาลดลงกว่าการใช้ยางฟลูออโรคาร์บอนเพียงอย่างเดียวประมาณ 11 – 41% ขึ้นกับอัตราส่วนของยางผสมและปริมาณมอนอเมอร์ MMA ที่ใช้ในขั้นตอนการสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอไรเซชันบนยางธรรมชาติ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. สำหรับการผลิตในเชิงอุตสาหกรรม ควรมีการพัฒนากระบวนการผลิตยางธรรมชาติกราฟต์เพื่อให้ใช้ระยะเวลาน้อยลง ซึ่งจะเป็นการประหยัดเวลา แรงงาน และต้นทุนทางด้านพลังงานเพื่อกระตุ้นให้เป็นที่สนใจแก่ภาคอุตสาหกรรม เช่น การนำเทคโนโลยีไมโครเวฟมาช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดความว่องไวมากยิ่งขึ้น เป็นต้น นอกจากนี้ควรมีการส่งเสริมให้ใช้ยางธรรมชาติกราฟต์สำหรับการประยุกต์ใช้ในงานด้านต่าง ๆ เช่น การเป็นสารเสริมความเข้ากันได้ (compatibilizer) ของวัสดุ 2 ชนิดที่มีความแตกต่างกันในด้านของสภาพขั้ว หรือการใช้เป็นสารเชื่อมประสาน (binder) เป็นต้น
2. ควรมีการศึกษาการพัฒนายางธรรมชาติให้มีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถรองรับการผสมกับยางสังเคราะห์ที่ต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศ นอกจากจะเป็นการช่วยลดปริมาณการนำเข้ายางจากต่างประเทศแล้ว ยังเป็นวิธีส่งเสริมให้ยางพารามีมูลค่าและคุณค่าเพิ่มขึ้นกว่าการส่งออกในรูปวัตถุดิบยาง หรือการแปรรูปเป็นสินค้าในระดับอุตสาหกรรมขั้นพื้นฐาน

เอกสารอ้างอิง

1. Peak Oil Crisis: The End of Cheap Price. [Online]. Available from : http://www.peak-oil-crisis.com/ [2009, Mar. 27].
2. I. Abu-Isa, Effects of Methanol/Gasoline Mixtures on Elastomers, SAE Publications, 1984, 71-86.
3. M. A. Kader, A. K. Bhowmick, Thermal Ageing Degradation and Swelling of Acrylate Rubber Fluororubber and Their Blends Containing Polyfunctional Acrylates, J. Mater. Sci., 2002, 37, 1503-1513.
4. M. A. Kader, A. K. Bhowmick, Acrylic Rubber-Fluorocarbon Rubber Miscible Blends: Effect of Curatives and Fillers on Cure, Mechnical, Aging, and Swelling Properties, J. Appl. Polym. Sci., 2003, 89, 1442-1452.
5. M. A. Kader, A. K. Bhowmick, Novel Thermoplastic Elastomers from Fluorocarbon Elastomer, Acrylate Rubber and Acrylate Plastics, Rubber Chem. Tech., 2001, 74, 662-676.
6. กองบรรณาธิการ. แก๊สโซฮอล์ พลังงานสะอาด เพื่อเศรษกิจชาติเข้มแข็ง. เทคโนโลยีวัสดุ, 2546.
7. Orbital Engine Company. Market Barriers to the Uptake of Biofuels Study: A Testing Based Assessment to Determine Impacts of a 10% and 20% Ethanol Gasoline Fuel Blend on Non-Automotive Engines-2000 hrs Material Compatibility Testing, Report to Environment Australia. May, 2003 [Online]. Available from :http://www.environment.gov.au/atmosphere/fuelquality/publications/2000hours-non-automotive/pubs/2000hours.pdf [2009, Mar. 27].
8. ดร.พงษ์ธร แซ่อุย. ยาง: ชนิด สมบัติ และการใช้งาน. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2548.
9. P. Soontornruengyot, Grafting of Styrene and Methyl Methacrylate onto Natural Rubber in Batch and Semi-Batch Emulsion Process, Master's thesis, Chulalongkorn University, 1999.
10. C. Nakason, A. Kaesaman, N. Yimwan, Preparation of Graft Copolymers from Deprotenized and High Ammonia Concentrated Natural Rubber Latices with Methyl Methacrylate, J. Appl. Polym. Sci. 2003, 87, 68-75.
11. K. Charmondusit, S. Kiatkamjonwong, P. Prasassarakich, Grafting of Methyl Methacrylate and Styrene onto Natural Rubber, J. Sci. Chula. Univ. 1998, 23, 2.
12. L. Thiraphattaraphun, S. Kiatkamjonwong, P. Prasassarakich, S. Damronglerd, Natural Rubber-g-Methyl Methacrylate/Poly(methyl methacrylate) Blends, J. Appl. Polym. Sci. 2001, 81, 428-439.
13. K. Hirano, K. Suzuki, K. Nakano, M. Tosaka, Phase Separation Structure in the Polymer Blend of Fluorocarbon Elastomer and Hydrogenated Nitrile Rubber, J. Appl. Polym. Sci., 2005, 94, 149-156.

ภาคผนวก

ตอบคำถามต่อข้อคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิ

“ยางผสมระหว่างยางฟลูออโรคาร์บอนและยางธรรมชาติกราฟต์สำหรับเครื่องยนต์แก๊สโซฮออล์” สัญญาเลขที่ RDG5150046

ข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ	ชี้แจงโดยนักวิจัย
<u>ความเห็นด้านการพิมพ์ (Editorial)</u>	
1. หน้า 1 ในความเป็นมาเรื่องการทนน้ำมันของ NBR บรรทัดที่ 11 ตรวจสอบการพิมพ์ด้วย “ยางที่มีขั้วจึงสามารถทนทาน และจะน้ำมันซึ่งไม่มีขั้วได้ดี” หมายความว่าอะไร	1. แก้ไขแล้วโดยเปลี่ยนเป็น “ยางที่มีขั้วจึงสามารถทนทานต่อน้ำมันซึ่งไม่มีขั้วได้ดี”
2. หน้า 6 หัวข้อการดำเนินการวิจัยมีที่ผิดอยู่มาก เช่น บรรทัดที่ 6 ตรวจสอบการพิมพ์ “… ใช้ volumetric funnel” และน้ำที่ใช้มีเพียง 660 ml แต่ในสูตรมี 700 ml	2. ในหัวข้อการดำเนินการวิจัยมีที่แก้ไขเพียง 2 ตำแหน่ง คือ หน้า 6 บรรทัดที่ 26 เปลี่ยนจาก “Volumetric funnel” เป็น “Separating funnel” และในตารางที่ 2.1 แก้ปริมาณน้ำ DI จาก 700 เป็น 600
3. หน้า 7 การบดยางใส่พร้อมกันหรือไม่ ควรบอกลำดับใหม่ว่าใส่อะไรก่อน-หลังอย่างไร สัดส่วนที่ใช้ไม่ตรงกับตารางที่ 2.2 โดยเฉพาะ PO และ TAIC ปริมาณที่ใช้น่าจะสลับกัน	3. หน้า 7 บรรทัดที่ 13 เพิ่มเติมเป็น “นำยางธรรมชาติและยางฟลูออโรคาร์บอนแต่ละก้อนมานวดและกรีดที่เครื่อง Two-roll mill ที่อุณหภูมิห้องเพื่อลดความหนืดให้ใกล้เคียงกัน” บรรทัดที่ 16-17 แก้ไขตัวเลขของ PO และ TAIC เป็น 1.2 และ 2.4 กรัมตามลำดับ หัวตารางที่ 2.2 แก้ไขเป็น “สารเคมีและปริมาณที่ใช้.....” และในตารางเปลี่ยนจาก “ตัวอย่าง” เป็น “ยางและสารเคมี (phr)”
4. หน้า 8 การพิมพ์สูตร 2.1 – 2.5 ควรจะจัดเรียงใหม่ให้อ่านง่าย โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วย	4. หน้า 8 ได้แก้ไขการเขียนสูตรเพื่อให้อ่านง่ายมากยิ่งขึ้น
5. หน้า 29 ควรแสดงค่า Tensile strength ก่อนแล้วแสดงวิธีคำนวณหา % ตามที่แสดงมาให้ดูด้วย	5. ค่า Tensile strength ก่อนและหลังการบ่มเร่งได้แสดงไว้แล้วในหน้าที่ 13 และ 26 แต่ได้เพิ่มเติมสูตรการคำนวณไว้แล้วในรูปที่ 4.3 (หน้าที่ 29)
6. ผลการทดลองและการวิจารณ์ผลควรจะไปด้วยกัน เพราะการเสนอเฉพาะผลในรูปตารางจะไม่มีจุดเด่น การเสนอเป็นกราฟไปที่ละเรื่อง / ตอน พร้อมวิจารณ์จะมีความหมายมากกว่า ส่วนตารางตัวเลขผลที่ได้ หากต้องการนำเสนออาจนำเสนอเป็นภาคผนวก	6. เนื่องจากในรูปแบบรายงานที่ทาง สกว. แจ้งมานั้นให้แยกส่วนระหว่างผลการวิจัยและวิจารณ์ ผู้วิจัยจึงจัดเรียงมาตามนั้น

ข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ	ชี้แจงโดยนักวิจัย
7. parameter t_s เป็น scorch time ไม่น่าจะเรียก “เวลาการไหลของยาง” น่าจะเป็น “เวลาที่ยางเกิดการคงรูปก่อนกำหนด” (ตามที่มักใช้กันโดยทั่วไปมากกว่า) หรือ “ยางตาย”	7. แก้ไขจาก “เวลาการไหลของยาง” เป็น “เวลาที่ยางเกิดการคงรูปก่อนกำหนด” แล้วในหน้าที่ 24 บรรทัดที่ 1 และ 2 และหน้าที่ 34 บรรทัดที่ 18
<u>ความเห็นด้านวิชาการ (Technical)</u>	
1. หน้า 7 ตารางที่ 2.2 สูตรที่อ้างตามเอกสารอ้างอิง 13 ไม่น่าจะเหมาะสม เพราะดูตามเอกสารอ้างอิงน่าจะใช้กับยางผสมที่ต่างกับการวิจัย	1. สูตรที่ใช้เหมาะสมแล้วกับยางฟลูออโรคาร์บอนที่เลือกมา คือ ยาง VITON GF600S ซึ่งต้องใช้ DIAK # 7 (TAIC) เป็นสารวัลคาไนเซชันตามที่บริษัท DuPont แนะนำมา
2. จากข้อ 1 peroxide ที่ใช้ไม่น่าจะเหมาะสมกับงานนี้ ตามที่นักวิจัยได้วิจารณ์ไว้ที่หน้า 24 ซึ่งสามารถพิจารณาจากผลการทดสอบ parameter ต่าง ๆ ได้ โดยเฉพาะด้าน cure characteristic และ ageing พบว่า ยางหลายสูตรทดลองยัง undercure มาก ส่งผลให้บทสรุป/วิเคราะห์ผลที่อยู่บนฐานเงื่อนไขสูตรที่ไม่เหมาะสม จึงยังไม่น่าจะถูกต้องนัก เพราะผลทดสอบ tensile properties และการทนน้ำมันขึ้นอยู่กับการ cure ยางว่า optimum หรือไม่	2. เปอร์ออกด์ที่ใช้ก็เหมาะสมกับงานดีแล้ว และใช้ TAIC มาเป็นสาร co-agent ตามงานวิจัยที่เคยทำมาก่อนทั้ง Hirano et al. J. Appl. Polym. Sci. 95 (2005) 149 และ Taguet et al. Adv. Polym. Sci. 187 (2005) 127 และผลการทดลองที่ได้ก็ขึ้นรูปยางตามเวลาที่ได้จากเครื่อง ODR (หน้าที่ 12) ซึ่งจะเห็นว่า cure curve ที่ได้เป็น S-curve อย่างสมบูรณ์ และไม่มีตัวอย่างไหนที่ขึ้นรูป undercure โดยทั่วไปแล้วยางฟลูออโรคาร์บอนต้องทำ post cure เสมอเพื่อให้เกิดการเชื่อมขวางอย่างสมบูรณ์โดยไม่ใช้เวลานานเกินไป ดังนั้นผลการทดลองด้าน %Retention ของสมบัติต่าง ๆ ของยางฟลูออโรคาร์บอนก่อนการเติมยาง GNR จึงสูงกว่าตอนที่ยังไม่ ageing ด้วยความร้อน ดังนั้นผลการทดลองจึงมีความเหมาะสมถูกต้องแล้ว
3. การใช้ TAIC ในตารางที่ 2.2 เพื่อทำหน้าที่อะไร	3. TAIC เป็นสาร co-agent ในระบบที่ใช้เปอร์ออกไซด์เป็น curing agent
4. ปัจจุบันในประเทศไทยก็มีการผลิต NR-PMMA จำหน่าย (order) อยู่แล้ว	4. NR-PMMA ต้องสั่งจากต่างประเทศ เช่น จีน เข้ามาใช้ และยากต่อการควบคุม %Grafting ให้ได้ตามที่ต้องการ ดังนั้นการทำยางกราฟต์ขึ้นมาเองจะดีกว่าในด้านการควบคุมสมบัติของยาง