

ส่วนที่ 1 รายละเอียดโครงการ

1. ชื่อโครงการวิจัย การเตรียมยางทนน้ำมันไบโอดีเซล น้ำมันแก๊สโซฮอล์จากยางธรรมชาติผสมยางอะคริโลไนไตรบิวตะไดอินสำหรับทำยางโอริงและยางปะเก็น (Preparation of Biodiesel and Gasohol Resistance Rubber from NR/NBR blend for O-ring and Gasket Applications)

2. หน่วยงานหลักที่รับผิดชอบงานวิจัย และสถานที่ตั้งพร้อมทั้งชื่อหน่วยงานและลักษณะของการร่วมงานวิจัยกับหน่วยงานอื่น (ถ้ามี)

หน่วยงานหลักที่รับผิดชอบ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ต. คลอง 6 อ. ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110
โทรศัพท์ 0-2549-3484-5 โทรสาร 0-2549-3480

หน่วยงานวิจัยร่วม ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและอิเล็กทรอนิกส์ฯ คณะวิศวกรรมศาสตร์

3. คณะผู้วิจัย บทบาทของนักวิจัยแต่ละคนในการทำวิจัย และสัดส่วนที่ทำการวิจัย (%)

หัวหน้าโครงการ

ผศ. ดร. วารุณี (กลิ่นไกล) อริยวิริยะนันท์	สัดส่วนที่ทำวิจัย	60%
(Asst. Prof. Dr. Warunee (Klinklai) Ariyawiriyanan)		

ผู้ร่วมวิจัย

ผศ. ดร. ฉัตรชัย กันยาวัฐ	สัดส่วนที่ทำวิจัย	25%
(Asst.Prof.Dr. Chatchai Kunyawut)		
ผศ.จักรี ศรีนนท์ฉัตร	สัดส่วนที่ทำวิจัย	15%
(Dr.Jakkree Srinonchat)		

4. ประเภทของการวิจัย การวิจัยและพัฒนา

5. สาขาวิชาการและกลุ่มวิชาที่ทำการวิจัย สาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย

ส่วนที่ 2 เนื้อหาโครงการ

บทคัดย่อ

โครงการนี้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของยางเพื่อให้มีความสามารถต้านทานต่อน้ำมันไบโอดีเซลและแก๊สโซฮอล์ โดยใช้ยางธรรมชาติ (NR) ผสมกับยางอะคริโลไนไตรล์บิวตะไดอิน (NBR) โดยใช้เครื่องบดผสมสองลูกกลิ้งและนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดที่อัตราส่วนต่างๆ กัน คือ NR/NBR ที่ 100/0, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50, 40/60, 30/70, 20/80 และ 0/100 ตามลำดับ จากการทดสอบพบว่า ยางผสมที่อัตราส่วน NR/NBR (20/80) มีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด คือ ค่าความแข็ง 52.22 shore A ค่าความทนต่อแรงดึง ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวและค่ามอดุลัสของยางผสมที่อัตราส่วน NR/NBR (40/60) มีค่าสูงสุดคือ 8.36 MPa, 717.06% และ 2.47 MPa ตามลำดับ ดังนั้นจึงได้นำอัตราส่วนของยางผสมที่แตกต่างกันมาออกมา 3 สูตร คือ ที่อัตราส่วน NR/NBR (80/20), NR/NBR (40/60) และ NR/NBR (20/80) มาทำการเติมด้วยสารประสานคือ NR-g-PAN ลงไปโดยใช้เกณฑ์หรือสมบัติในเรื่องความต้านทานต่อน้ำมันไบโอดีเซลและแก๊สโซฮอล์ คือเกิดการบวมตัวน้อยภายหลังการแช่น้ำมันน้ำมันไบโอดีเซลและแก๊สโซฮอล์ จากการทดสอบพบว่า ยาง NR-g-PAN ช่วยทำให้ยางผสมต้านทานต่อน้ำมันน้ำมันไบโอดีเซลและแก๊สโซฮอล์ได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการคงรูปของยางผสมน้อยลง ทำให้ยางผสมมีความแข็งมากขึ้นคือ 53.54 shore A นอกจากนี้ยังทำให้ยางผสมมีสมบัติทางความร้อนดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามยาง NR-g-PAN มีผลทำให้ความหนืดของยางผสมเพิ่มสูงขึ้นและทำให้ค่าความทนต่อแรงดึง ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวและค่ามอดุลัสลดลง นอกจากนี้การทดสอบสมบัติทางกลและการทนน้ำมันของยาง NR/NBR ที่เติมด้วยสารเติมแต่งคือ CaCO₃, Zeolite, Silica และ Flyask พบว่าสามารถให้สมบัติทางกลได้ดีขึ้นและทนต่อการบวมตัวในน้ำมันทั้งสองชนิดได้มากโดยเฉพาะการเติมด้วย zeolite จะให้ผลการทนต่อน้ำมันได้ดีที่สุด

คำสำคัญ ยางธรรมชาติ ยางอะคริโลไนไตรล์ น้ำมันไบโอดีเซล น้ำมันแก๊สโซฮอล์

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ที่มาของปัญหา

ปัจจุบันมีการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงมากขึ้น โดยเฉพาะน้ำมันไบโอดีเซล น้ำมันแก๊สโซฮอล์ ก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งของการใช้น้ำมันในอนาคตเนื่องจากราคาน้ำมันมีแนวโน้มการปรับตัวสูงขึ้น อีกทั้งความต้องการเสริมสร้างความมั่นคงในด้านพลังงานของประเทศ การลดภาวะโลกร้อนและการพัฒนาสิ่งแวดล้อมให้ดีขึ้น เพื่อแก้ปัญหาการเกิดภาวะการขาดแคลนน้ำมันดิบจากการนำเข้าจากต่างประเทศ จึงได้มีการพัฒนาและวิจัยอย่างต่อเนื่องในการผลิตน้ำมันขึ้นมาใช้เอง เช่น น้ำมันไบโอดีเซล น้ำมันแก๊สโซฮอล์ ปัจจุบันพบว่ามีการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงจำหน่ายหลายชนิดในท้องตลาด โดยมีผลกระทบโดยตรงกับผลิตภัณฑ์ยางที่ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ในปัจจุบัน ชิ้นส่วนทำจากวัสดุประเภทยางในเครื่องยนต์ เช่น ยางโอริง ยางปะเก็น วัสดุเหล่านี้ที่ใช้ในอดีตอาจจะไม่เหมาะสมกับน้ำมันไบโอดีเซลส่งผลให้อายุการใช้งานของชิ้นส่วนในรถยนต์สั้นลง จึงต้องมีการปรับเปลี่ยนสมบัติให้เหมาะสมกับน้ำมันเชื้อเพลิงแต่ละประเภท ด้วยเหตุนี้จึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ทนต่อน้ำมันเชื้อเพลิงและความร้อนสูงโดยมีสมบัติเชิงกลที่ดี โดยใช้ยางพาราเป็นวัตถุดิบร่วมกับวัตถุดิบที่สามารถทนต่อน้ำมันได้ดีและมีสมบัติเชิงกลที่สามารถเสริมข้อด้อยของยางพาราได้ โดยเลือกยางที่ทนต่อน้ำมันได้ดี ทนต่อความร้อนและราคาไม่แพง เช่น ยางอะคลิโลไนไตรบิวตะไดอิน และใช้กระบวนการวัลคาไนซ์เพื่อเชื่อมโยงพันธะเพื่อนำมาผลิตเป็นชิ้นส่วนรถยนต์ เช่น O-ring, Gasket, Hose เป็นต้น การนำยางพารามาใช้จะเป็นการลดต้นทุนการผลิตและช่วยส่งเสริมการใช้ยางพาราซึ่งสามารถปลูกเองได้ในประเทศให้มีการใช้งานมากขึ้น ช่วยลดภาวะโลกร้อนได้ด้วย

กรอบแนวคิดในการแก้ปัญหา

การนำยางพารามาผสมกับยางสังเคราะห์ชนิดอื่นๆ เพื่อเพิ่มความสามารถในด้านการทนต่อน้ำมันและสารเคมีนั้นมีความเป็นไปได้ โดยยางพาราผสมนั้นจะมีความสามารถในการทนต่อสารเคมีและน้ำมันต่างๆ เช่น น้ำมันเบรก น้ำมันหล่อลื่นและน้ำมันเชื้อเพลิงประเภทน้ำมันเบนซินและน้ำมันดีเซลดีขึ้นเมื่อมีการเติมด้วยสารเชื่อมโยงและการปรับปรุงสูตรยางและระบบการวัลคาไนซ์ที่เหมาะสม โดยในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาก่อนนำยางพาราผสมกับยางอะคลิโลไนไตรบิวตะไดอิน ซึ่งมีการพัฒนาสารเพื่อเชื่อมโยงพันธะและทำการศึกษอย่างต่อเนื่องหลังจากที่ได้มีการเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างยางพาราผสมยางอะคลิโลไนไตรบิวตะไดอินแล้ว และเติมด้วยสารเพิ่มการเข้ากันได้ โดยในงานวิจัยนี้จะเน้นผลของสารตัวเติม ชนิดต่างๆ เช่น ซิลิกา ถั่วลอย แคลเซียมคาร์บอเนต และซี

โอไลต์ เพื่อช่วยเสริมแรง ที่เติมลงในยางพาราผสมกับยางอะคลิโนไนไตรบิวตะไดอิน และได้วัสดุยาง ที่ทนต่อน้ำมันไบโอดีเซล น้ำมันแก๊สโซฮอล์รวมทั้งยางมีสมบัติเชิงกลที่เพิ่มสูงขึ้นด้วย

ตามโครงสร้างทางเคมีของยางพาราเป็นยางที่ไม่มีขั้วในโมเลกุล เมื่อสัมผัสกับ สารละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น น้ำมัน จะเกิดการบวมตัวขึ้นได้โดยเฉพาะน้ำมันเชื้อเพลิงและสมบัติเชิงกลไม่ดี เช่น น้ำมันดีเซล น้ำมันเบนซิน เป็นต้น ในทางตรงข้ามกับยางอะคลิโนไนไตรบิวตะไดอินที่เป็นโมเลกุล ที่มีความเป็นขั้วสูง (ขึ้นอยู่กับปริมาณอะคลิโนไนไตร) ดังนั้นหากนำยางพาราผสมกับยางอะคลิโนไนไตรบิวตะไดอินจะทำให้ยางผสมสามารถทนต่อน้ำมันมีขั้วได้มากขึ้น เช่น น้ำมันไบโอดีเซล น้ำมันแก๊สโซฮอล์ แต่เนื่องจากความแตกต่างของความเป็นขั้วของยางทั้งสองทำให้ยางเข้ากันได้ยาก ส่งผลทำให้ สมบัติเชิงกลของยางผสมต่ำ แนวทางแก้ปัญหาการผสมยางทางหนึ่งคือการเติมสารเพื่อช่วยเพิ่มการเข้า กันได้โดยเลือกสารเพื่อเชื่อมโยงโมเลกุลของยางทั้งสอง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาอัตราส่วนต่างๆ กันในการผสมยางธรรมชาติกับยางอะคลิโนไนไตรบิวตะไดอิน ที่มีต่อความสามารถของการทนต่อน้ำมัน

1.2.2 เพื่อศึกษาผลการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ ในอัตราส่วนต่างๆ กัน ในการผสมยางธรรมชาติกับยางอะคลิโนไนไตรบิวตะไดอิน

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของสารตัวเติมต่างๆ ในการผสมยางธรรมชาติกับยางอะคลิโนไนไตรบิวตะไดอิน

1.2.4 เพื่อศึกษาสมบัติทางกลและสมบัติความทนทานต่อน้ำมันไบโอดีเซล น้ำมันแก๊สโซฮอล์ ของยางผสม

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 ยางที่ใช้คือ ยาง STR5L และ ยางอะคลิโนไนไตรบิวตะไดอิน

1.3.2 ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ คือ NRg-PAN graft copolymer

1.3.3 สารตัวเติมที่ใช้ คือ Silica, Flyash, Calcium carbonate และ Zeolite

1.3.4 ศึกษาสมบัติทางกล เช่น tensile strength, elongation at break, stress,

1.3.5 ศึกษาสมบัติการทนต่อน้ำมันไบโอดีเซล ได้แก่ B0, B5, B40 และ B100 และน้ำมันแก๊สโซฮอล์ ได้แก่ 91, 95, E20 and E85

1.4 ผลสำเร็จของการวิจัยที่ได้รับ และหน่วยงานที่จะนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ความสำเร็จและความคุ้มค่าของการวิจัยที่ได้รับคือ การพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตผลิตภัณฑ์สำหรับการพัฒนาวัสดุพลังงานจากวัสดุยางธรรมชาติเพื่อเป็นแนวทางในการนำมาใช้ประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่จำเป็นต้องสัมผัสกับน้ำมันไบโอดีเซลและน้ำมันแก๊สโซฮอล์ที่ใช้กันมากขึ้นในปัจจุบัน เช่นผลิตภัณฑ์ประเภทท่อยาง แหวน ปะเก็น ในรถยนต์ เป็นต้น โดยงานวิจัยนี้จะเป็นการวิจัยองค์ความรู้ขั้นพื้นฐานและสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยางได้ในประเทศไทย

ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ได้ศึกษาวัสดุทนน้ำมันที่เตรียมจากยางธรรมชาติผสมและการเพิ่มสมบัติเชิงกลด้วยการเลือกชนิดของสารตัวเติมที่เหมาะสม เพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันเชื้อเพลิงในปัจจุบัน สำหรับใช้ทำวัสดุประเภทยางปะเก็นและยางโอริงที่ต้องสัมผัสกับน้ำมันต่างๆ
2. เพิ่มคุณค่าของยางพาราไทยให้มีบทบาทในการใช้งานและช่วยในด้านการช่วยอนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อมให้มีมากขึ้น
3. ได้ความรู้เพื่อมาพัฒนาวัสดุทนน้ำมันที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี ได้มาตรฐานและราคาถูกและเป็นเทคโนโลยีที่สามารถผลิตขึ้นมาใช้เองในประเทศไทยได้
4. สร้างผลงานวิจัยซึ่งสามารถตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับชาติและนานาชาติอย่างน้อย 1 ฉบับ

หน่วยงานที่จะนำไปใช้ประโยชน์

กลุ่มอุตสาหกรรมและหน่วยงานเป้าหมาย

- อุตสาหกรรมการส่งออกยางพารา
- อุตสาหกรรมผลิตยางโอริง แหวน ปะเก็น
- กลุ่มอุตสาหกรรมยานยนต์

บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง

Chatchawan Kantala, Ekachai Wimolmala, Narongrit Sombatsompop and Chakrit Sirisinha ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของสารช่วยประสานต่อสมบัติการไหล ความหนาแน่นของพันธะข้าม และสมบัติเชิงกลของยางผสมระหว่างยาง NR กับ NBR โดยใช้สารช่วยประสานยางคลอโรพรีนและยางธรรมชาติอีพ็อกซีไดซ์ โดยปรับเปลี่ยนปริมาณที่ 0-7 phr โดยใช้ยาง NR กับ ยาง NBR ที่สัดส่วน 20:80 ผลการทดลองพบว่า การเติมสารช่วยประสานยางคลอโรพรีนและยางธรรมชาติอีพ็อกซีไดซ์ทำให้ค่าความหนืดของยางผสมเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในกรณีของสารช่วยประสานยางธรรมชาติอีพ็อกซีไดซ์ พบว่า การเติมสารช่วยประสานไม่ส่งผลต่อเวลาในการไหลตัว เวลาในการคงรูป และค่าความแตกต่างแรงบิด แต่ส่งผลให้ความหนาแน่นของพันธะข้ามและสมบัติเชิงกลโดยรวมเพิ่มขึ้นโดยการเติมสารช่วยประสาน 5 phr เป็นปริมาณที่เหมาะสม

Chakrit, Sauvarop and Jarunee ศึกษาปัจจัยที่มีผลโดยตรงต่อขนาดอนุภาคของเม็ดยางที่กระจายตัวในยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางอะครีโลไนไตรล์ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ สัดส่วนของการผสม สภาพการผสม สัดส่วนความหนืด สารตัวเติม (Filler) และสารตัวช่วยผสม (Compatibilizer) จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคของเม็ดยางที่กระจายตัวในยางผสมกับสมบัติด้านการคงทนต่อน้ำมันของยางผสมที่เตรียมได้ พบว่าอนุภาคของเม็ดยางที่กระจายตัวในระบบยางผสมมีขนาดเล็กลงเมื่อ (ก) ลดสัดส่วนของยางธรรมชาติที่กระจายตัว (ข) ผสมที่เวลาผสมมากขึ้นแต่ไม่เกิน 25 นาที (ค) ใช้ระบบยางผสมที่มีสัดส่วนความหนืดต่ำ และ (ง) เติมสารตัวเติมลงในระบบยางผสม สารตัวช่วยผสมได้แก่ Maleic Anhydride grafted ethyl-octane copolymer (EOR-g-MA) หรือ Maleic Anhydride Grafted Ethylene Propylene Diene Monomer (EPDM-g-MA) ทำให้อนุภาคของเม็ดยางที่กระจายตัวในระบบผสมมีขนาดใหญ่ขึ้น ความทนน้ำมันของยางผสมที่เตรียมได้มีสูงขึ้นเมื่ออนุภาคของเม็ดยางที่กระจายในระบบผสมมีขนาดเล็กลง ยกเว้นในระบบยางผสมที่มีการเติม Liquid Natural Rubber (LNR) เพื่อปรับสัดส่วนความหนืด พบว่า มีความทนทานน้ำมันลดลงแม้ว่าอนุภาคของเม็ดยางที่กระจายตัวในระบบยางผสมมีขนาดเล็กลง

สวรรยา เหลือมล้ำ ได้ศึกษาอิทธิพลของสารของสารเพิ่มความเข้ากันได้ 3 ชนิดคือยางธรรมชาติอีพ็อกซีไดซ์ (ENR) พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) และ เอพริลีน-เมทิลไครเลท โคพอลิเมอร์ (EMA) ต่อสมบัติการทนต่อน้ำมันไบโอดีเซล ดีเซล เบนซิล และแก๊สโซฮอล์ ที่อุณหภูมิและ 70 องศาเซลเซียส และสมบัติเชิงกลของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีนไฟเนด พอลิเอพริลีนที่อัตราส่วนผสม 50/50 (NR/CSM 50/50) จากการทดลองพบว่าสารเพิ่มความเข้ากันได้ทั้ง 3 ชนิด ไม่ช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ของยางผสม ยางผสมที่มี ENR มีระดับการเชื่อมโยงโมเลกุลของยางผสมดีที่สุด

ลำดับรองลงมาคือ PVC และ EMA เป็นลำดับสุดท้าย สารเพิ่มความเข้ากันได้ช่วยให้ยางผสมทนน้ำมันได้มากขึ้นที่อุณหภูมิห้อง สมบัติการทนน้ำมันของยางผสมที่มี PVC ดีที่สุด แต่สารเพิ่มความเข้ากันได้ไม่ช่วยเพิ่มสมบัติการทนต่อแรงฉีกขาด ความแข็ง และการคงทนต่อความร้อน ยกเว้นสมบัติการทนต่อแรงดึงซึ่งยางผสมที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้มีค่ามากกว่ายางผสมที่ไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้เล็กน้อย โดย ENR จะให้สมบัติการทนต่อแรงดึงสูงที่สุด ปริมาณที่เหมาะสมสำหรับสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด ENR และ PVC อยู่ที่ 5-7 phr และสำหรับ EMA 1-3 phr

วิรุทธ คุ้มประเสริฐ ได้ศึกษาปรับปรุงและพัฒนาทางธรรมชาติเพื่อต้านทานน้ำมันดีเซลและน้ำมันไบโอดีเซล โดยศึกษาผลกระทบ ของน้ำมันทั้งสองชนิดต่อยางธรรมชาติ (NR) ผสมกับยางอะไครโลไนไตรล์บิวตะไดอิน (NBR) งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ายางธรรมชาติสามารถผสมเข้ากันได้ดีกับยางอะไครโลไนไตรล์บิวตะไดอินที่อัตราส่วน 20 : 80 ตามลำดับ งานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงยางธรรมชาติโดยการกราฟท์ด้วยพอลิอะไครโลไนไตรล์ (NR-g-PAN) เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้กับยางอะไครโลไนไตรล์บิวตะไดอิน จากการทดสอบสมบัติเชิงกล การทดสอบความแข็ง (Hardness) ที่ทุกอัตราส่วนของยางผสม NR-g-PAN/NBR จะมีความแข็งสูงกว่ายางผสม NR/NBR การทดสอบสมบัติการยืดดึง (Tensile Testing) พบว่าที่อัตราส่วน 30 % ของยางผสม NR-g-PAN/NBR มีค่า Tensile Strength , Modulus at 100% Strain และ Elongation at Break ใกล้เคียงกับอัตราส่วน 20 %ของยางผสม NR/NBR แสดงว่า NR-g-PAN/NBR สามารถผสมเข้ากันได้ดีกว่ายาง NR/NBR การทดสอบการต้านทานน้ำมัน (Oil Resistance) พบว่ายางผสม NR-g-PAN/NBR สามารถเพิ่มความต้านทานน้ำมันได้มากกว่ายางผสม NR/NBR และจากการศึกษาสัญญาณวิทยา (Morphology) โดยสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคปี (SEM) พบว่ายางธรรมชาติเกิดการรวมตัวกับเฟสของยางอะไครโลไนไตรล์บิวตะไดอินได้ดีขึ้น

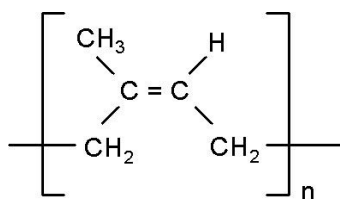
สิริยา อางนันทน์ ได้ทำการศึกษาโครงสร้างของยางธรรมชาติโดยผ่านปฏิกิริยากราฟท์โคพอลิเมอร์เรซินของสไตรีนและอะคริโลไนไตรล์บนยางธรรมชาติเพื่อใช้เป็นสารเสริมความเข้ากันได้ในการผสมยางธรรมชาติกับยางไนไตรล์ ศึกษาปฏิกิริยากราฟท์ โคพอลิเมอร์เรซินในแบบสารละลายโดยใช้เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์หรือ 2,2b อะโซไอโซบิวทิลไนไตรล์เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา และแบบอิมัลชันโดยใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตหรือสารผสมระหว่างคิวมินไฮโดรเปอร์ออกไซด์/เตตระเอทิลีนเพนทามีนเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อปฏิกิริยากราฟท์โคพอลิเมอร์เรซิน ได้แก่ ปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยา อุณหภูมิ และความดันไนโตรเจนที่ใช้ในการทดลอง วิเคราะห์โครงสร้างของยางธรรมชาติกราฟท์ด้วยวิธีสเปกโตรสโคปี จากการศึกษาพบว่าภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมยางธรรมชาติกราฟท์ คือ ปฏิกิริยากราฟท์โคพอลิเมอร์เรซินแบบสารละลายที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างมอนอเมอร์และยางธรรมชาติคือ 1/1 โดยตัวริเริ่มปฏิกิริยาเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ 5 ส่วนโดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความดันไนโตรเจน 2 บาร์เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ได้ร้อยละกราฟท์โคพอลิเมอร์เท่ากับ 85.0 นำยางธรรมชาติกราฟท์ที่ได้ไปใช้เป็นสารเสริมความเข้ากันได้ในการผสม

ระหว่างยางธรรมชาติและยางไนไตรล์ พบว่ายางธรรมชาติกราฟที่สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลและความทนทานต่อน้ำมันของยางผสมได้ พื้นผิวรอยขาดของชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบความต้านทานแรงดึงโดยใช้ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดแสดงให้เห็นถึงการยึดติดกันระหว่างวัฏภาคยางที่ดีภายหลังเติมยางธรรมชาติกราฟทั้งลงในยางผสม

2.2 ยางธรรมชาติ [1]

2.2.1 โครงสร้างของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมี คือ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (cis-1,4-polyisoprene) กล่าวคือในโมเลกุลยาง 1 โมเลกุลจะประกอบด้วยหน่วยของไอโซพรีน (C_5H_8) มาต่อกันเป็นสายยาว (แบบเส้นตรง) โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ในช่วง 200,000-400,000 และมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้างมาก ยางธรรมชาติที่มีความหนาแน่นเท่ากับ 0.93 g/cm^3 ที่อุณหภูมิ 20°C และมีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature , T_g) ประมาณ -72°C นั้นหมายความว่าหากนำยางธรรมชาติไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า -72°C สมบัติของยางจะเปลี่ยนจากที่เคยยืดหยุ่นไปเป็นของแข็งเปราะเช่นเดียวกับแก้ว



รูปที่ 2.1 แสดงสูตรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ

ที่มา : <http://rubber.sc.mahidol.ac.th/rubbertech/NR.htm>

จากรูปแสดงให้เห็นว่าใน 1 หน่วยของไอโซพรีนจะมีพันธะคู่และมีหมู่แอลฟาเมทธิลีน (α -methylene) ที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกัมมันตอยู่ ดังนั้น พันธะคู่ที่มีอยู่ในโมเลกุลของยางจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการคงรูปด้วยกัมมันต อย่างไรก็ตาม พันธะคู่เหล่านี้ยังสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่น ๆ ได้อีก เช่น ออกซิเจนหรือโอโซน ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพหรืออาจทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจน คลอรีน ไฮโดรเจนคลอไรด์ เป็นต้น ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างยาง (ที่ตำแหน่งพันธะคู่) กับสารเคมีต่าง ๆ เหล่านี้จะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (amorphous) แต่ในบางสถานะ เช่น ที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อยางถูกยืดโมเลกุลของยางบางส่วนสามารถจัดเรียงตัวได้อย่างค่อนข้างเป็นระเบียบยางจึงสามารถเกิดผลึก (crystallize) ได้ การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำหรือที่เรียกว่า “low temperature crystallization” จะพบในกรณีที่เก็บยางไว้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 20°C เป็น

เวลานาน โดยยางจะมีอัตราเร็วในการตกผลึกสูงสุดที่อุณหภูมิประมาณ -26°C การตกผลึกที่อุณหภูมิต่ำนี้จะทำให้ยางแข็งมากขึ้น ทำให้ไม่สามารถนำยางไปผสมให้เข้ากับสารเคมีหรือสารตัวเติมอื่น ๆ ได้ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นผลึกที่เกิดขึ้นก็จะถูกทำลาย ยางจะอ่อนตัวลงและกลับสู่สภาพเดิมด้วยเหตุนี้ประเทศในเมืองหนาวจึงต้องนำยางธรรมชาติมาอบที่อุณหภูมิประมาณ $50-70^{\circ}\text{C}$ เพื่อให้ยางอ่อนก่อนที่จะนำไปใช้งานในกระบวนการผลิตต่อไป ส่วนการเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัวหรือที่เรียกว่า “strain-induced crystallization” จะพบเมื่อยางถูกยืดจนมีความยาวมากกว่าความยาวดั้งเดิมประมาณ 2-3 เท่า การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัวจะทำให้ยางมีสมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน กล่าวคือ ยางจะเปลี่ยนจากสภาพโปร่งแสง (transparent) ไปเป็นทึบแสง (opaque) ซึ่งสังเกตได้ง่ายในยางคงรูปที่ไม่มี การเติมสารตัวเติม นอกจากนี้การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัวยังทำให้ยางคงรูปมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น นั่นคือ ยางจะมีความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาดและความต้านทานต่อการขัดถูสูงขึ้น

2.2.2 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ

1) ความยืดหยุ่น (Elasticity) สมบัติความยืดหยุ่นเป็นลักษณะเด่นอีกประการหนึ่งของยางธรรมชาติ กล่าวคือยางธรรมชาติที่คงรูปแล้วจะมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับยางหมดไป ยางจะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิมหรือใกล้เคียงได้อย่างรวดเร็ว

2) ความเหนียวติดกัน (Tack) ยางธรรมชาติ (ในสภาพที่ยังไม่คงรูป) มีสมบัติติดเชื่อม ในด้านความเหนียวติดกันซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางล้อรถยนต์ เป็นต้น

3) ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีความเป็นระเบียบสูงจึงทำให้ยางธรรมชาติสามารถตกผลึกได้ง่ายเมื่อถูกยืด ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นจะช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับยาง ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงมีค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงมากโดยไม่ต้องใช้สารตัวเติมเสริมแรงเข้ามาช่วย ($\sim 20\text{ MPa}$ หรือสูงกว่านั้น) การเติมสารตัวเติมเสริมแรงลงไปก็จะช่วยทำให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงขึ้น ซึ่งสมบัตินี้จะแตกต่างจากยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่ที่มักมีค่าความทนทานต่อแรงดึงต่ำ จึงไม่สามารถนำไปใช้งานในทางวิศวกรรมได้นอกจากจะมีการเติมสารตัวเติมเสริมแรงเข้าช่วยเท่านั้น

4) ความทนทานต่อการฉีกขาด (tear strength) เนื่องจากยางธรรมชาติสามารถตกผลึกได้เมื่อถูกยืด ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงมีความทนทานต่อการฉีกขาดสูงมากทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูง การเติมสารตัวเติมเสริมแรงลงไปก็จะช่วยทำให้ค่าความทนทานต่อการฉีกขาดของยางสูงขึ้น

5) สมบัติเชิงพลวัต (dynamic properties) ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัตที่ดี ยางมีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนต่ำในระหว่างการใช้งาน นอกจากนี้ ยางธรรมชาติยังมีความต้านทานต่อการล้าตัว (Fatigue resistance) ที่สูงมากอีกด้วย

6) ความต้านทานต่อการขัดถู (abrasion resistance) ยางธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อการขัดถู แต่ยังคงน้อยกว่ายาง SBR เล็กน้อย อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับยางสังเคราะห์ชนิดอื่น ๆ พบว่ายางธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อการขัดถูอยู่ในกลุ่มที่สูงมากดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงการจัดกลุ่มของยางตามค่าความต้านทานต่อการขัดถู

กลุ่มที่	ความต้านทานต่อการขัดถู	ชนิดของยาง
1	สูงมาก	ยางพอลิยูรีเทน (AU/EU) , ยางบิวตะไดอิน (BR) , ยางสไตรีนบิวตะไดอิน (SBR) , ยางไนไตรล์ (NBR) และยางธรรมชาติ (NR)
2	สูง-สูงมาก	ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอิน (EPDM) , ยางคลอโรพรีน (CP) และยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน (CSM)
3	สูง	ยางบิวไทล์ (IIR) , ยางเอทิลีนอะครีลิก (ethylene acrylic elastomer) และยางเอทิลวินิลอะซิเตต (ethyl vinyl acetate elastomer)
4	ต่ำ	ยางซิลิโคน (Q)

7) ความเป็นฉนวนไฟฟ้า (insulation) ยางธรรมชาติมีค่าความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูงมาก โดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (Specific resistivity) สูงถึง 10^{15} หรือ 10^{16} ohm.cm

8) ความต้านทานต่อของเหลวและสารเคมี (liquid and chemical resistance) เนื่องจากองค์ประกอบของยางธรรมชาติเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซนและโทลูอีน เป็นต้น ความสามารถในการละลายนี้จะลดลงถ้าหากเกิดการคงรูปเนื่องจากการเชื่อมโยงทางเคมีของโมเลกุลเกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติในยางคงรูปจะไปขัดขวางกระบวนการละลายของยาง ยางคงรูปจึงเพียงแต่เกิดการบวมตัวในตัวทำละลายเหล่านี้เท่านั้น อย่างไรก็ตาม การบวมตัวของยางดังกล่าวจะทำให้สมบัติเชิงกลของยางด้อยลง ด้วยเหตุนี้ ยางธรรมชาติจึงไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วต่าง ๆ แต่ยางจะทนทานต่อของเหลวที่มีขั้ว เช่น อะซิโตนหรือแอลกอฮอล์ นอกจากนี้ ยางธรรมชาติยังทนต่อกรดและด่างเจือจางได้ดี แต่ไม่ทนต่อกรดไนตริกและกรดกำมะถันเข้มข้น

9) การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โอโซนและแสงแดด (aging properties) เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่มาก ทำให้ยางว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นว่าปฏิกิริยาออกซิเดชัน) โดยมีแสงแดดหรือความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงถูกออกซิไดส์ได้ง่าย นอกจากนี้ ยางธรรมชาติยังไม่ทนต่อโอโซนเพราะเมื่อยางถูกยืดออกและได้รับโอโซนนาน ๆ จะเกิดรอยแตกขนาดเล็กจำนวนมากที่บริเวณพื้นผิวในทิศตั้งฉากกับทิศ

ทางการยึดตัวของยาง ด้วยเหตุนี้ ในระหว่างการผลิตผลิตภัณฑ์จึงต้องมีการเติมสารเคมีบางชนิด เช่น สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (anti-degradant) และ ไข (wax) ลงไปเพื่อยืดอายุการใช้งานของยางธรรมชาติ

10) อุณหภูมิของการใช้งาน (service temperature) ยางธรรมชาติสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิตั้งแต่ -55 °C จนถึง 70 °C อย่างไรก็ตามหากเก็บยางไว้ที่อุณหภูมิยาวนาน ๆ ยางอาจเกิดการตกผลึกซึ่งจะทำให้ยางแข็งขึ้นและสูญเสียความยืดหยุ่นไป แต่เมื่ออุณหภูมิการใช้งานสูงเกินไปสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ก็จะด้อยลงเนื่องจากความร้อนจะทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพในบางกรณีที่มีการออกสูตรผสมเคมียางได้อย่างเหมาะสม (มีการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพลงไป) ยางธรรมชาติอาจสามารถนำไปใช้งานได้อย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิสูงถึง 90 °C หรืออาจสูงถึง 100 °C (ในกรณีที่ยางได้รับอุณหภูมิเป็นช่วง ๆ เท่านั้น)

2.2.3 การผสมเคมียาง

ยางดิบตามลำพังจะมีขีดจำกัดในการใช้งานเนื่องจากมีสมบัติเชิงกลต่ำและมีลักษณะทางกายภาพที่ไม่เสถียร โดยสมบัติต่างๆ จะแปรผันตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างมาก กล่าวคือ ยางจะอ่อนตัวและเหนียวเมื่อร้อน แต่จะแข็งเปราะที่อุณหภูมิต่ำ ด้วยเหตุนี้ การใช้ประโยชน์จากยางจำเป็นต้องมีการผสมยางกับสารเคมีต่างๆ เช่น กำมะถัน ผงเขม่าดำ และสารตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น หลังจากการผสมเคมียาง ยางผสมที่ได้หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่ายางคอมพาวด์ จะถูกนำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อนและความดัน กระบวนการดังกล่าวนี้เรียกว่า “ยางสุกหรือยางคงรูป” ซึ่งสมบัติของยางคงรูปที่ได้นี้จะเสถียรไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนักและมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น แม้ว่ายางธรรมชาติสามารถคงรูปได้ด้วยเพอร์ออกไซด์หรือการใช้รังสีที่มีพลังงานสูงแต่ระบบการคงรูปด้วยกำมะถันก็ยังคงเป็นระบบที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง เมื่อเปรียบเทียบกับยางสังเคราะห์ ยางธรรมชาติต้องการปริมาณกำมะถันมากกว่าแต่ต้องการปริมาณสารตัวเร่งปฏิกิริยาน้อยกว่า เพราะในยางธรรมชาติมีสารประกอบอินทรีย์บางตัวที่สามารถเร่งปฏิกิริยาคงรูปได้

ยางธรรมชาติเป็นของแข็งที่มีความเหนียวและความหนืดสูงมาก การผสมสารเคมีให้เข้ากับยางจึงเป็นไปได้ยาก ด้วยเหตุนี้ ก่อนการผสมเคมีจึงต้องทำการบดยางหรือลดความหนืดของยางด้วยการตัดโมเลกุลของยางด้วยกระบวนการเชิงกล นั่นคืออาศัยแรงเฉือนในเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) หรือในเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) ขั้นตอนการบดยางเพื่อลดความหนืดของยางก่อนการผสมเคมีนี้ เรียกว่า “มาสติเคชั่น” ปกติการบดยางที่อุณหภูมิต่ำจะให้ประสิทธิภาพการบดที่ดี เพราะยางจะมีความหนืดสูง ส่งผลทำให้เกิดแรงเฉือนสูง โมเลกุลยางก็จะเกิดการฉีกขาดได้ดี แต่อุณหภูมิสูงยางจะมีความหนืดลดลงซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดแรงเฉือนที่เกิดขึ้นใน ระหว่างการผสมลดลงด้วย ประสิทธิภาพในการบดยางอันเนื่องจากแรงเชิงกลจึงลดลง แต่ในบางครั้งก็สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบดยางที่อุณหภูมิสูงได้เช่นกัน โดยการเติมสารแปปไทเซอร์ลงไปเล็กน้อย เพราะ

สารเคมีดังกล่าวจะช่วยทำให้โมเลกุลยางที่ถูกตัดขาดไปแล้วไม่สามารถกลับเข้าไปทำปฏิกิริยารวมกันใหม่ เนื่องจากการบดยางที่มากเกินไปจะทำให้ยางอ่อนเกินไป ซึ่งจะส่งผลให้ยางไม่สามารถรับสารตัวเติมได้ในปริมาณมาก ยางคงรูปที่ได้จึงมีความยืดหยุ่น สมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงพลวัตที่ไม่ดี ดังนั้นการบดยางจึงควรทำเท่าที่จำเป็น เพราะนอกจากจะทำให้ยางคงรูปที่ได้มีสมบัติที่ดีแล้ว ยังช่วยลดต้นทุนในการผลิตด้วย

2.2.4 การผสมยางธรรมชาติกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น

เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นยางที่ไม่มีขั้ว จึงสามารถผสมให้เข้ากันได้ดีกับยางที่ไม่มีขั้วชนิดต่างๆ ได้ดี เช่น ยางสไตรีนบิวตะไดอิน ยางพอลิไอโซพรีน และยางบิวตะไดอิน นอกจากนั้นบางครั้งอาจผสมกับยางไนไตรล์ได้ในระดับหนึ่ง (ควรใช้ยางไนไตรล์เกรดที่มีปริมาณอะคริโลไนไตรล์ต่ำ และถ้าเป็นไปได้ควรทำการเติมสารช่วยให้เข้ากันลงไปด้วยเล็กน้อยเพื่อให้ยางธรรมชาติและยางไนไตรล์เข้ากันได้ดียิ่งขึ้น) การนำยางธรรมชาติมาผสมกับยางสังเคราะห์จะเป็นการรวมเอาสมบัติที่ดีของทั้งยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ไว้ด้วยกัน คือ สมบัติที่ดีของยางธรรมชาติที่จะถูกส่งผ่านไปให้ยางสังเคราะห์ ได้แก่ ความสามารถในการขึ้นรูปที่ดี ความเหนียวติดกัน สมบัติเชิงพลวัต รวมถึงความร้อนสะสมที่ต่ำในระหว่างการใช้งาน ในทำนองเดียวกันสมบัติที่ดีของยางสังเคราะห์บางประการก็จะถูกถ่ายทอดให้แกยางธรรมชาติ เช่น ความต้านทานต่อการขีดถู (เมื่อผสมกับยางบิวตะไดอิน) ความทนทานต่อความร้อน (เมื่อผสมกับยางไนไตรล์) หรือความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องจากโอโซน (เมื่อผสมกับยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอินมอนอเมอร์) เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม ในการผสมยางธรรมชาติให้เข้ากับยางสังเคราะห์นั้น ผู้ผสมจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยต่างๆ ที่อาจมีผลโดยตรงต่อสมบัติของยางผสมอันได้แก่ ความหนืดและระบบการคงรูปของยางที่จะนำมาผสมกัน โดยทั่วไปแล้วก่อนที่จะนำยางทั้งสองชนิดมาผสมเข้าด้วยกันนั้นควรทำการบดยางธรรมชาติให้มีความหนืดตั้งต้นใกล้เคียงกับยางสังเคราะห์ก่อน เพราะจะทำให้ยางทั้งสองชนิดนั้นผสมเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น ส่วนการผสมยางธรรมชาติกับยางสังเคราะห์บางตัวที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุลน้อย เช่น ยางบิวไทโรลหรือยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอินมอนอเมอร์ ก็ควรเลือกระบบการคงรูปให้เหมาะสม ไม่เช่นนั้นยางทั้งสองชนิดซึ่งมีสมบัติการคงรูปที่แตกต่างกันมากนี้อาจเกิดการแยกเฟสกันในช่วงกระบวนการคงรูปได้ การเลือกใช้ยางสังเคราะห์เกรดที่มีปริมาณพันธะคู่สูงอาจช่วยบรรเทาปัญหาที่เกิดขึ้นจากกระบวนการคงรูปได้ นอกจากความหนืดและระบบการคงรูปแล้ว ในความสามารถในการกระจายตัวของสารตัวเติมหรือสารเคมีในแต่ละเฟสของยางที่นำมาผสมกันด้วย (โดยเฉพาะสารตัวเร่งปฏิกิริยา) เพราะสารตัวเติมหรือสารตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดจะมีความเป็นขั้วแตกต่างกันและสารเคมีเหล่านี้ก็ชอบที่จะอยู่ในเฟสของยางที่มีความเป็นขั้วใกล้เคียงกับตัวมันเองเท่านั้น ซึ่งการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอขององค์ประกอบเหล่านี้ในยางแต่ละเฟสอาจทำให้สมบัติของยางผสมที่ได้ต่ำกว่าที่ควรจะเป็น

2.2.5 การใช้ยางของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติมีสมบัติทั้งเชิงกลและเชิงพลวัตที่ดี อย่างไรก็ตาม ยางธรรมชาติก็มีข้อด้อยคือไม่ทนต่อความร้อน สภาพอากาศ น้ำมัน และสารเคมีอื่นๆ ทำให้ยางสังเคราะห์ชนิดต่างๆ เริ่มเข้ามามีบทบาทสำคัญแทนที่ยางธรรมชาติ อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ยางบางประการยังคงจำเป็นต้องใช้ยางธรรมชาติเป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตเนื่องจาก

1) ยางธรรมชาติมีสมบัติดีเยี่ยมในด้านความทนทานต่อแรงดึงแม้ไม่ได้เติมสารตัวเติมเสริมแรงและมีความยืดหยุ่นสูงมาก จึงเหมาะที่จะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น ลูกมียาง ลูกยางอนามัย ลูกโป่ง และยางรัดของ เป็นต้น

2) ยางธรรมชาติมีสมบัติทั้งเชิงกลและเชิงพลวัตที่ดี มีความยืดหยุ่นสูงในขณะที่มีความร้อนสะสมที่เกิดขณะใช้งานต่ำและมีสมบัติความเหนียวติดกันที่ดี จึงเหมาะที่จะนำไปในการผลิตผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิด เช่น ยางล้อรถบรรทุก ยางล้อเครื่องบิน ฝ้ายยาง ยางกันกระแทกท่าเรือ หรือใช้ผสมกับยางสังเคราะห์ในการผลิตยางล้อรถยนต์ เป็นต้น

3) ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อการฉีกขาดสูงทั้งที่อุณหภูมิต่ำและสูง จึงเหมาะสำหรับการผลิตยางกระเป๋าน้ำร้อน เนื่องจากในการแกะชิ้นงานออกจากเบ้าพิมพ์ในระหว่างกระบวนการผลิตจะต้องดึงชิ้นงานออกจากเบ้าพิมพ์ในขณะที่ร้อน ยางที่ใช้จึงต้องมีค่าความทนทานต่อการฉีกขาดขณะความร้อนสูง

2.3 ยางอะคริโลไนไตรล์บิวตะไดอิน (Acrylonitrile-Butadiene Rubber , NBR) [1]

2.3.1 โครงสร้าง การผลิตและสมบัติของยาง NBR

ยาง NBR เป็นโคพอลิเมอร์ของอะคริโลไนไตรล์ (acrylonitrile monomer) และ บิวตะไดอิน (Butadiene monomer) ซึ่งประกอบด้วยอะคริโลไนไตรล์ตั้งแต่ 18 - 51 % จากโครงสร้างของโมเลกุลจะเห็นว่าในส่วนของอะคริโลไนไตรล์จะมีหมู่ฟังก์ชัน -CN อยู่ทำให้โมเลกุลของยางชนิดนี้มีความเป็นขั้วสูง ยางชนิดนี้จึงมีสมบัติเด่นคือทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมและตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วต่าง ๆ ได้ดี ในขณะที่ส่วนของบิวตะไดอินที่มีอยู่ในโมเลกุลจะเป็นส่วนที่ให้ความยืดหยุ่นและเป็นตำแหน่งที่โมเลกุลจะเกิดการเชื่อมโยงในปฏิกิริยาขวาง

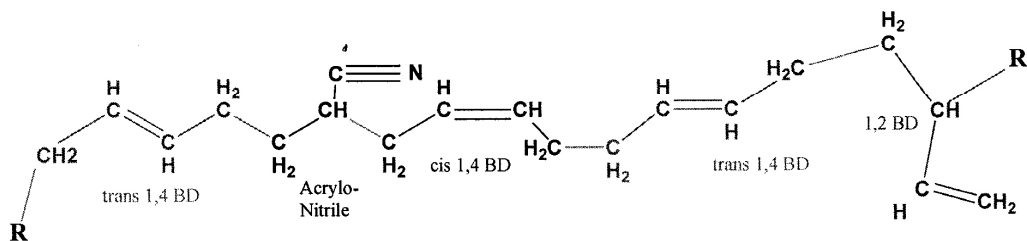
สมบัติของยาง NBR จะแปรผันโดยตรงตามสัดส่วนของอะคริโลไนไตรล์ที่มีอยู่ในโมเลกุล โดยทั่วไปเมื่อปริมาณของอะคริโลไนไตรล์สูงขึ้นจะทำให้สมบัติของยาง NBR เปลี่ยนดังนี้

- ความทนทานต่อน้ำมันปิโตรเลียมและตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนสูงขึ้น
- การกระด้างกระดอนต่ำลง
- Compression set ค่อยลง
- อัตราการซึมผ่านของก๊าซลดลง
- สมบัติการหักงอที่อุณหภูมิต่ำค่อยลง

- ความทนทานต่อความร้อนและโอโซนสูงขึ้น
- ความต้านทานต่อการขีดถูสูงขึ้น
- ความแข็งแรงและความทนทานต่อแรงดึงสูงขึ้น
- ความหนาแน่นสูงขึ้น

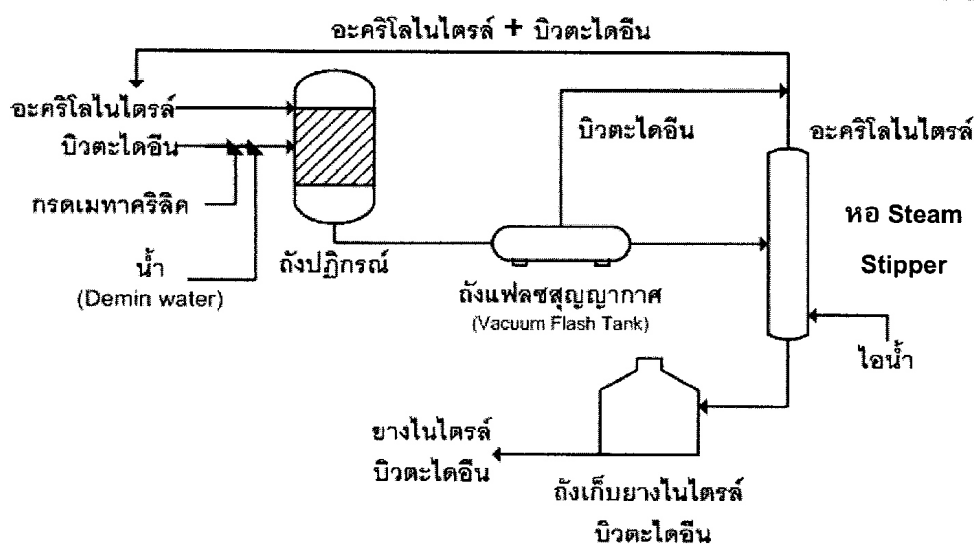
นอกจากสมบัติต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้นแล้วปริมาณอะคริโลไนไตรล์ยังส่งผลโดยตรงต่อค่าอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) อีกด้วย กล่าวคือค่า T_g จะสูงขึ้นตามปริมาณอะคริโลไนไตรล์ที่เพิ่มขึ้น โดยทั่วไป ค่า T_g ของยาง NBR จะอยู่ในช่วง -40°C ถึง 0°C กล่าวคืออุณหภูมิที่ใช้งานยาง NBR จะอยู่ในช่วง -40°C ถึง $+125^{\circ}\text{C}$ นั้นเอง

Nitrile Rubber (NBR)



รูปที่ 2.2 แสดงสูตรโครงสร้างของยาง NBR

2.3.2 การผลิตน้ำยางสังเคราะห์ไนไตรล์บิวตะไดอิน (Nitrile Butadiene Rubber Latex)

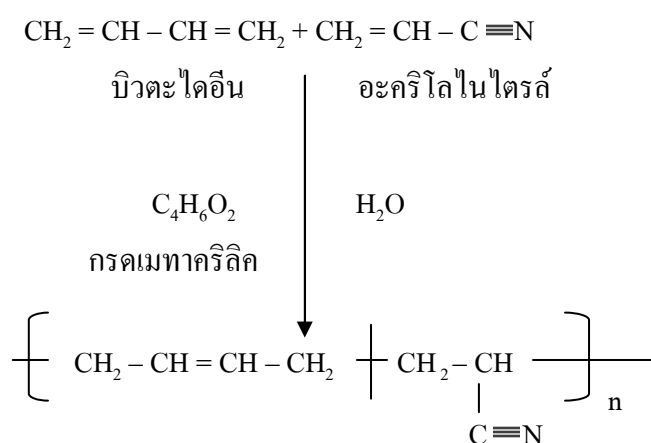


รูปที่ 2.3 แสดงกระบวนการผลิตน้ำยางสังเคราะห์ไนไตรล์บิวตะไดอิน

สัดส่วนวัตถุดิบหลัก : อะคริโลไนไตรล์ประมาณ 25% บิวตะไดอินประมาณ 71% และกรดเมทาคริลิก 4% (สัดส่วนของอะคริโลไนไตรล์ที่มากขึ้นจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีความคงทน แข็งแรง ทนต่อสารละลายและน้ำมันมากขึ้น) ปริมาณการใช้อะคริโลไนไตรล์ : 11,900 ตัน/ปี¹

กระบวนการผลิต : การผลิตเป็นแบบกะ (Batch Process) วัตถุดิบทั้งหมดจะถูกส่งไปยังถังปฏิกรณ์ซึ่งควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 35 - 50 ° C และความดัน 2.90 – 3.87 atm โดยใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาประมาณ 5 – 12 ชั่วโมง เมื่อวัตถุดิบเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ NBR Latex ตามค่าที่ควบคุม (ร้อยละ 93 - 95) สารหยุดปฏิกิริยาจะถูกเติมลงไป จากนั้น NBR Latex ที่มีลักษณะคล้ายน้ำยางธรรมชาติจะถูกส่งไปยังถังแฟลชสุญญากาศ (Vacuum Flash) เพื่อแยกบิวตะไดอินและขอขจัดด้วยไอน้ำ (Steam Stripper) เพื่อแยกอะคริโลไนไตรล์ที่ไม่ทำปฏิกิริยาออกและนำกลับมาใช้ใหม่ ทำให้ได้ NBR Latex บริสุทธิ์ส่งไปเก็บที่ถังต่อไป

ปฏิกิริยา :



รูปที่ 2.4 แสดงปฏิกิริยา NBR Latex

¹ ข้อมูลปี พ.ศ. 2550. สํารวจเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2551. โครงการจัดทำคู่มือกำกับดูแลสถานประกอบการ : คู่มือเพื่อพัฒนาระบบการจัดการสารเคมีอันตรายสูงที่มีการนำเข้าโรงงานอุตสาหกรรม

2.3.3 สมบัติทั่วไป

1) ความยืดหยุ่น (elasticity) ยาง NBR มีค่าความยืดหยุ่นด้อยกว่ายางธรรมชาติและยาง SBR และเนื่องจากความยืดหยุ่นของยางจะด้อยลงหากยางมีปริมาณของอะคริโลไนไตรล์สูงขึ้น ดังนั้น ถ้าต้องการยาง NBR ที่มีความยืดหยุ่นสูงก็ควรเลือกใช้ยางเกรดที่มีปริมาณอะคริโลไนไตรล์ต่ำ ๆ และในระหว่างการผสมเคมียางควรใช้สารทำให้ยางนิ่มในกลุ่มของอีเธอร์หรือเอสเทอร์หรือใช้เขม่าดำเกรดที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ ๆ เช่น N770 เป็นต้น นอกจากปริมาณของอะคริโลไนไตรล์แล้ว ค่าความยืดหยุ่นของยางชนิดนี้ยังขึ้นอยู่อย่างมากกับอุณหภูมิ กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

ยาง NBR ที่มีปริมาณอะคริโลไนไตรล์สูงจะมีความแข็งแรงลดลงอย่างรวดเร็วและมีสมบัติการกระด้างกระดอนสูงขึ้น

2) ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) เนื่องจากยาง NBR ไม่สามารถดกผลึกได้เมื่อถูกยืด ดังนั้น ยางชนิดนี้จึงมีค่าความทนทานต่อแรงดึงต่ำ จำเป็นต้องเติมสารตัวเติมเสริมแรงเข้าช่วย

3) ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ (aging properties) ยาง NBR มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติและยาง SBR โดยทั่วไป ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนจะขึ้นอยู่กับสูตรการผสมเคมียาง ตัวอย่างเช่น การใช้กระบวนการคงรูปแบบประสิทธิภาพ (โดยใช้ TMTD และสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้กำมะถันออกมาในระหว่างกระบวนการคงรูป) หรือ การคงรูปด้วยเปอร์ออกไซด์หรือการใช้ซิลิกา ร่วมกับสารคู่ควบไซเลน (silane coupling agent) หรือการใช้เขม่าดำเกรดที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ก็ล้วนมีส่วนช่วยในการปรับปรุงสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนทั้งสิ้น นอกจากนี้ การใช้สารป้องกันการเสื่อมสภาพ เช่น TMQ ร่วมกับ MBI ก็จะทำให้ยางมีความทนทานต่อความร้อนสูง อย่างไรก็ตาม แม้ว่ายาง NBR จะทนต่อความร้อนได้ดีแต่ยางชนิดนี้ไม่ทนต่อโอโซนและสภาพอากาศจึงต้องเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพ เช่น p-phenylene diamine ลงไปเพื่อช่วยยืดอายุการใช้งานของยาง

4) ความทนทานต่อน้ำมันและสารเคมี (oil and chemical resistance) เนื่องจากยาง NBR เป็นยางที่มีขั้วค่อนข้างสูงจึงทนต่อน้ำมัน (ทั้งน้ำมันพืช น้ำมันสัตว์และน้ำมันเชื้อเพลิง) น้ำและตัวทำละลายไม่มีขั้วอื่น ๆ ได้ดี แต่ยางจะไม่ทนต่อกรดแก่และของเหลวที่มีขั้ว เช่น คีโตน เอสเทอร์ ตัวทำละลายที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ (chlorinated solvent) และตัวทำละลายที่มีวงแหวนไฮโดรคาร์บอนมาก ๆ (highly aromatic solvent) ได้แก่ เบนซีน โทลูอินและไซลีน เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ระดับความทนทานต่อน้ำมันและสารเคมีของยาง NBR นอกจากนี้อาจขึ้นอยู่กับการเติมสารตัวเติมที่มีอยู่ในโมเลกุลแล้ว ยังขึ้นอยู่กับการผสมเคมียางด้วย โดยเฉพาะปริมาณของสารตัวเติมที่มีอยู่ในโมเลกุลและปริมาณของสารทำให้ยางนิ่มรวมไปถึงความหนาแน่นของการเชื่อมโยงอีกด้วย

5) อัตราการซึมผ่านของก๊าซ (gas permeability) ยาง NBR มีอัตราการซึมผ่านของก๊าซต่ำมาก โดยเฉพาะเกรดที่มีปริมาณอะคริโลไนไตรล์สูง ๆ จะมีอัตราการซึมผ่านของก๊าซใกล้เคียงกับยาง

บิวไทล์ โดยทั่วไปอัตราการซึมผ่านของก๊าซนอกจากจะขึ้นอยู่กับเกรดของยางแล้ว ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ อีก เช่น ชนิดและปริมาณของสารตัวเติมในยางรวมถึงความหนาแน่นของการเชื่อมโยง เป็นต้น

6) อุณหภูมิของการใช้งาน (service temperature) ยาง NBR มีช่วงอุณหภูมิการใช้งานตั้งแต่ประมาณ -40°C (ขึ้นอยู่กับปริมาณอะคริโลไนไตรล์) ถึง 100°C สำหรับยางที่ใช้งานที่อุณหภูมิอย่างต่อเนื่องหรืออาจสูงถึง 125°C สำหรับยางที่ไม่ได้ถูกใช้งานที่อุณหภูมิสูงอย่างต่อเนื่อง

7) ผลึกกันที่ยางที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันมีความต้านทานต่อความร้อนไม่ดียางจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลยางตรงตำแหน่งที่มีออกซิเจนมารวมตัวเป็นวงแหวนไม่แข็งแรง วงแหวนจะเปิดออกและเกิดการเชื่อมโยงแบบอีเทอร์พั่นระยะขึ้น (Ether crosslink)

ตารางที่ 2.2 แสดงการเลือกใช้อย่างให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งานในสภาวะต่าง ๆ

สมบัติที่ต้องการ			ยาง
อุณหภูมิการใช้งาน	ความทนทานต่อน้ำมัน	ความทนทานต่อโอโซน	
ต่ำกว่า 100°C	ต่ำ	ต่ำ	NR/IR/SBR/BR
	ปานกลาง	ปานกลาง	CR
	สูง	ต่ำ	NBR
$100 - 120^{\circ}\text{C}$	ต่ำ	สูง	AU/EU
	ปานกลาง	สูง	IIR/BIIR/CIIR
		ปานกลาง	CR (ที่มีสูตรเคมีเหมาะสม)
		สูง	CSM/CM
	สูง	ต่ำ	NBR (ที่มีสูตรเคมีเหมาะสม)
		สูง	CO/ECO
$100 - 120^{\circ}\text{C}$	ต่ำ	สูง	EPM/EPDM
	ปานกลาง	สูง	AEM
	สูง	สูง	ACM/HNBR
$100 - 120^{\circ}\text{C}$	ปานกลาง	สูง	VMQ/PMQ
	สูง	สูง	FMQ/FPM

2.3.4 การผสมเคมียาง

โดยภาพรวมแล้ว การผสมเคมียาง NBR ก็อาศัยหลักการที่คล้ายกันกับการผสมเคมีของยางธรรมชาติและยาง SBR อย่างไรก็ตาม เนื่องจากยาง NBR มีความเป็นขั้วสูง ดังนั้น จึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงความเข้ากันได้ (Compatibility) ของสารเคมีที่ใช้กับยาง NBR ด้วย สารเคมี 2 กลุ่มที่ต้องพิจารณาเป็นพิเศษ ได้แก่

1. สารกลุ่มที่ทำให้ยางคงรูปโดยเฉพาะกำมะถัน เพราะกำมะถันจะเข้ากันกับยาง NBR ได้ยาก กว่ายางไม่มีส่วนผสมอื่น ๆ ดังนั้น ในการออกสูตรการผสมเคมีของยาง NBR จึงควรใช้กำมะถันใน ปริมาณที่ต่ำ (เมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติหรือยาง SBR) หรืออาจใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถ แยกตัวให้กำมะถันแทนการใช้กำมะถัน (ใช้ระบบการคงรูปแบบกึ่งประสิทธิภาพ (semi-EV) หรือแบบ ประสิทธิภาพ (EV) ซึ่งระบบการคงรูปแบบหลังนี้จะช่วยให้ยางคงรูปที่ได้ความทนทานต่อการ เสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนได้ดีและมีค่า compression ต่ำ นอกจากนี้ เนื่องจากบิวทาไดอีนใน ยาง NBR มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ดังนั้น ในการออกสูตรยางก็ควรใช้ สัดส่วนของสารตัวเร่งปฏิกิริยาต่อกำมะถันสูงกว่าสัดส่วนที่ใช้ในยางธรรมชาติ สารตัวเร่งปฏิกิริยาที่ นิยมใช้กับยาง NBR ได้แก่ MBTS ซัลฟีนามิค ไรบูเรม ไดโซโอคาร์บาเมต และกัวนิดิน สำหรับใน กรณีที่ต้องการยางคงรูปที่มีความทนทานต่อความร้อนสูงมากๆ ก็อาจใช้ TMTD อย่างเดียวโดยไม่ต้อง ใช้กำมะถันหรืออาจเติมกำมะถันลงไปเล็กน้อย (0.25 phr) หรือใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถแยกตัว ให้กำมะถัน (0.5 phr) แทนได้

เนื่องจากกำมะถันละลายเข้าไปในยาง NBR ได้ยาก ทำให้กำมะถัน กระจายตัวเข้าไปใน เนื้อยางได้ไม่ดีซึ่งอาจส่งผลให้ยางเกิดการคงรูปได้ไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งก้อน ดังนั้น ในระหว่างการผสม จึงต้องทำการเติมกำมะถันเข้าไปในช่วงต้นของการผสมเพื่อเพิ่มระยะเวลาการผสมให้กำมะถันเข้ากับ ยางได้มากขึ้นหรืออาจเลือกใช้กำมะถันเกรดพิเศษที่มีแมกนีเซียมคาร์บอเนตเคลือบอยู่ที่พื้นผิว (MC-sulfur) แทนการใช้กำมะถันเกรดทั่วไป

2. สารกลุ่มที่ทำให้ยางนิ่ม เช่น น้ำมัน ฯลฯ สารในกลุ่มนี้ใช้เติมลงไปใน NBR เพื่อช่วยใน กระบวนการแปรรูป (ลดความหนืดของยาง) ปรับปรุงสมบัติด้านต่างๆ โดยเฉพาะสมบัติความเหนียว ติดกัน สมบัติการหักงอที่อุณหภูมิต่ำ และความยืดหยุ่นของยาง เป็นต้น สำหรับสารทำให้ยางนิ่มที่นิยม ใช้กันมากกับยาง NBR ได้แก่ น้ำมันอะโรมาติกและสารเคมีในกลุ่มอีเทอร์หรือเอสเทอร์ เช่น dioctyl phthalate (DOP) หรือ tritolyl phosphate เป็นต้น ส่วน xylene formaldehyde resin และ coumarone resin ก็เป็นสารที่ช่วยเพิ่มสมบัติความเหนียวติดกันให้แก่ยาง NBR ได้เป็นอย่างดี ส่วนสารทำให้ยางนิ่มที่นิยม ใช้กับยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ที่ไม่มีข้ออื่น ๆ เช่น น้ำมันพาราฟินิกหรือน้ำมันเนฟทานิกนั้น สามารถเข้ากันกับยาง NBR ได้น้อยมากเนื่องจากยาง NBR มีความเป็นขั้วสูง

แม้ว่าการเติมสารกลุ่มที่ทำให้ยางนิ่มจะช่วยปรับปรุงสมบัติหลายด้านของยาง NBR แต่ใน เวลาเดียวกันการเติมสารกลุ่มนี้ก็ทำให้สมบัติเชิงกลรวมถึงความทนทานต่อน้ำมันและสารเคมีของยาง ลดลง นอกจากนี้เมื่อถูกใช้งานที่อุณหภูมิสูงสารกลุ่มนี้อาจจะแยกออกไปทำให้สมบัติเชิงกลต่างๆ และ

ขนาดของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการใช้งานของผลิตภัณฑ์นั้นๆ ด้วยเหตุนี้การเลือกใช้สารกลุ่มนี้จึงควรทำด้วยความระมัดระวังและต้องพิจารณาถึงสภาพการใช้งานจริงของผลิตภัณฑ์ด้วยสำหรับในกรณีที่ต้องการนำไปใช้ที่อุณหภูมิสูงๆควรเลือกใช้สารทำให้ยางนิ่มชนิดที่ระเหยได้ยาก ได้แก่ polypropylene sebacate และ dibutyl carbitol formal เป็นต้น แต่สารทำให้ยางนิ่มที่ระเหยยากเหล่านี้มักมีราคาแพงกว่าสารทำให้ยางนิ่มทั่วไปมาก

2.3.5 การผสมยาง NBR กับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ

สำหรับยาง NBR เกรดที่มีปริมาณอะโครโลไนไตรล์ค่อนข้างสูง (> 25%) ก็อาจใช้ผสมกับพลาสติกพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) เพราะ PVC นอกจากจะทำให้ยางผสมมีความทนทานต่อโอโซน สภาพอากาศ เปลวไฟ น้ำมัน และตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนสูงขึ้นแล้ว ยังช่วยเพิ่มความทนทานต่อการฉีกขาดและความต้านทานต่อการขีดถูอีกด้วย แต่สมบัติบางประการ เช่น ความยืดหยุ่น compression set และสมบัติการหักงอที่อุณหภูมิต่ำจะด้อยลง โดยทั่วไป ยางผสมของ NBR / PVC จะมีปริมาณ PVC อยู่ประมาณ 30% ยางผสมนี้ใช้ในการผลิตท่อยางและปลอกหุ้มสายเคเบิล นอกจาก PVC แล้ว ยังสามารถใช้ยางชนิดอื่นๆ มาผสมกับยาง NBR ได้ เช่น การใช้ยาง BR ผสมลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติการหักงอที่อุณหภูมิต่ำหรือการใช้ยางธรรมชาติผสมลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติความเหนียวติดกันของยาง NBR เป็นต้น อย่างไรก็ตาม เนื่องจากยาง NBR เป็นยางที่มีขี้ผึ้ง แต่ยาง BR และยางธรรมชาติเป็นยางที่ไม่มีขี้ผึ้ง ดังนั้น การผสมยางดังกล่าวให้เข้ากันจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อยาง NBR ที่ใช้ในการผสมมีปริมาณอะโครโลไนไตรล์ต่ำๆเท่านั้น (หรืออาจทำการเติมสาร compatibility ลงไปเพื่อให้ยาง NBR และยางที่ไม่มีขี้ผึ้งเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น) และปริมาณของยางไม่มีขี้ผึ้งที่นำไปผสมก็ไม่ควรสูงมากเกินไป แม้ว่าการเติมยางที่ไม่มีขี้ผึ้งลงไปจะช่วยปรับปรุงสมบัติบางประการของยาง NBR แต่ในขณะเดียวกันยางที่ไม่มีขี้ผึ้งดังกล่าวก็จะทำให้สมบัติความทนทานต่อน้ำมันของยาง NBR ด้อยลงเช่นกัน

2.3.6 การใช้งาน

ยางชนิดนี้ส่วนใหญ่จะถูกใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องสัมผัสกับน้ำมัน ทนทานต่อความร้อนและต้านทานการขีดถูได้ดี ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ยางที่ทำจากยาง NBR ได้แก่ ประเก็นน้ำมัน ยางโอริง ยางซีล ยางเชื่อมต่อ สายพานลำเลียง ท่อดูดหรือส่งน้ำมัน ท่อยางเสริมแรง ยางบุภาชนะ ยางเคลือบลูกกลิ้ง รองเท้าบูท พื้นและส้นรองเท้า เป็นต้น

2.4 ยางแท่ง (Technically Classified Rubber) [1]

เนื่องจากยางแผ่นและยางเครฟมีการจัดชั้นด้วยสายตาซึ่งให้ไม่แน่นอน ด้วยเหตุนี้อุตสาหกรรมยางส่วนใหญ่ในปัจจุบันจึงเริ่มเปลี่ยนมาใช้ ยางแท่งหรือยางก้อนเป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางแทน ทั้งนี้เนื่องจากยางแท่งเป็นยางที่มีคุณภาพสม่ำเสมอกว่ายางแผ่นและยางเครฟ ผ่านการทดสอบและจัดชั้นเพื่อรับรองคุณภาพตามหลักวิชาการ การจัดชั้นของยางแท่งจะพิจารณาจากปริมาณของสิ่งสกปรกที่มีอยู่ในยางเป็นสำคัญ นอกจากนั้นก็อาจพิจารณาตัวแปรอื่นๆร่วมด้วย เช่น ปริมาณเถ้า ดัชนีความอ่อน

ตัว ฯลฯ ปัจจุบัน ประเทศไทยมีมาตรฐานยางแท่งเรียกว่า Standard Thai Rubber (STR) ซึ่งแต่เดิมเรียกว่า Thai Tested Rubber (TTR) ตารางที่ 2.3 แสดงข้อกำหนดในมาตรฐานยางแท่ง STR ซึ่งจะเห็นได้ว่ายางแท่งของไทยแบ่งเป็นหลายเกรดโดยอาศัยปริมาณของสิ่งสกปรกเป็นเกณฑ์

ตารางที่ 2.3 แสดงมาตรฐานยางแท่งของไทย (Standard Thai Rubber Scheme)

ข้อกำหนด	STR XL	STR 5L	STR 5	STR 5CV	STR 10	STR 10CV	STR 20	STR 20CV
ปริมาณสิ่งสกปรกที่เหลือนอยู่บนช่อง ขนาด 44 ไมครอน (max. % wt)	0.02	0.04	0.04	0.04	0.08	0.08	0.16	0.16
ปริมาณเถ้า (max. % wt)	0.40	0.40	0.60	0.60	0.60	0.60	0.08	0.08
ปริมาณไนโตรเจน(max. % wt)	0.50	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
ปริมาณสารระเหยได้ (max. % wt.)	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
ค่า Plasticity เริ่มต้น (P_0) (min)	35	35	30	-	30	-	30	-

ตารางที่ 2.3(ต่อ) แสดงมาตรฐานยางแท่งของไทย (Standard Thai Rubber Scheme)

ข้อกำหนด	STR XL	STR 5L	STR 5	STR 5CV	STR 10	STR 10CV	STR 20	STR 20CV
ค่า Plasticity Retention Index (PRI) (min)	60	60	60	60	50	50	40	40
สี (Lovibond scale) (max)	4.0	6.0	-	-	-	-	-	-
ความหนืดมูนี ML 1+4@100 °C	-	-	-	*	-	**	-	***
สีของเครื่องหมาย	สีน้ำเงิน บนพื้น สีขาว	สีเขียว อ่อน	สีเขียว อ่อน	สีขาว บนพื้น สีเขียว อ่อน	สี น้ำตาล บนพื้น สีขาว	สีขาว บนพื้น สีน้ำตาล	สีแดง บนพื้น สีขาว	สีขาว บนพื้น สีแดง
สีของแผ่นฟิล์ม LDPE ที่ใช้ ห่อหุ้ม	ขาวใส	ขาวใส	ขาวใส	ขาวใส	ขาวใส	ขาวใส	ขาวใส	ขาวใส
สีของแถบ LDPE	ขาวใส	ขาวใส	ขาวทึบ	ขาวใส	ขาวทึบ	ขาวทึบ	ขาวทึบ	ขาวทึบ

หมายเหตุ

* 70 (+7, -5), 60 (+7, -5) และ 50 (+7,-5)

** 60 (+7, -5)

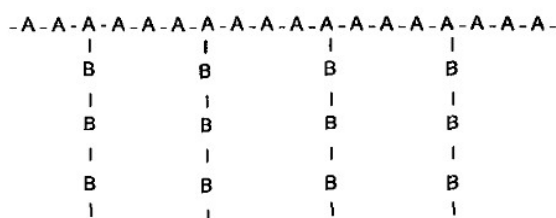
*** 65 (+7, -5)

ยางแท่งเป็นยางที่ผลิตขึ้นมาโดยอาศัยหลักการที่ว่าๆ ดังนี้คือ เริ่มต้นนำยางมาทำให้เป็นก้อนเล็กๆ (เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2 - 3 มม.) เพื่อให้ง่ายต่อการชำระล้างสิ่งสกปรกออกไปด้วยน้ำและง่ายต่อการให้แห้งในขั้นตอนถัดไป หลังจากอบยางให้แห้งด้วยอากาศร้อนแล้วก็นำยางแห้งที่เป็นก้อนเล็กๆ เหล่านี้ไปอัดให้เป็นแท่งขนาดมาตรฐาน 330 x 670 x 170 มม. ที่มีน้ำหนักประมาณ 33.33 กิโลกรัม

วัตถุดิบของการผลิตยางแท่ง ได้แก่ น้ำยางหรือยางแผ่นทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเกรดของยางแท่งที่ต้องการผลิต เช่น ถ้าต้องการผลิตยางแท่งเกรด STR XL หรือ STR 5L ซึ่งมีสีจางมาก (L ย่อมาจาก light และ XL ย่อมาจาก extra light) จำเป็นต้องใช้ น้ำยางเป็นวัตถุดิบและใช้กรดฟอร์มิคในการทำให้อนุภาคน้ำยางจับตัวกันภายใต้สภาวะที่มีการควบคุมอย่างดี หรือถ้าต้องการผลิตยางแท่งเกรด STR 10 หรือ STR 20 ซึ่งเป็นเกรดที่มีสีเงาปนสูงและมีสีเข้มกว่า ก็อาจใช้ยางแผ่นหรือเศษยาง/จียางเป็นวัตถุดิบ เป็นต้น ส่วนกระบวนการผลิตยางแท่งค่อนข้างจะยุ่งยาก ต้องอาศัยเครื่องจักรที่มีราคาแพงและต้องมีการควบคุมคุณภาพอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นราคายางแท่งจึงสูงกว่ายางแผ่นรมควัน

2.5 กราฟท์โคโพลิเมอร์ (Graft Copolymer) [14]

กราฟท์โคโพลิเมอร์เกิดจากการนำโมโนเมอร์ชนิดหนึ่งมาโพลิเมอร์ไรซ์กับสายโซ่โพลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง โมโนเมอร์จะเกิดโพลิเมอร์บนส่วนของสายโซ่โพลิเมอร์แรก กราฟท์โคโพลิเมอร์จะเกิดขึ้นเมื่อสายโซ่โพลิเมอร์มีจุดที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาส่วนใหญ่การสังเคราะห์กราฟท์โคโพลิเมอร์เป็นโพลิเมอร์ไรเซชันแบบเรดิคัลโพลิเมอร์ไรเซชัน ส่วนโพลิเมอร์ไรเซชันแบบไอออนิกโพลิเมอร์ไรเซชันก็มีแต่ไม่ค่อยใช้กัน โดยทั่วไปกราฟท์โพลิเมอร์ไรเซชันเกิดขึ้นได้ทั้งแบบระบบเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) หรือ ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) ขึ้นกับโพลิเมอร์ละลายในโมโนเมอร์หรือไม่ โครงสร้างทางเคมีของกราฟท์โคโพลิเมอร์เมื่อพิจารณา Side Chain ที่เป็นผลจากการเกิดด้วยตัวเองในกระบวนการโพลิเมอร์ไรเซชันซึ่งถูกจำกัดวิธีการด้วยลักษณะของโมโนเมอร์ แบบจำลองโครงสร้างการกราฟท์ของโคโพลิเมอร์ไรเซชันสามารถแสดงดังภาพที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แบบจำลองโครงสร้างกราฟท์โคโพลิเมอร์ไรเซชันของโพลิเมอร์ A และ B

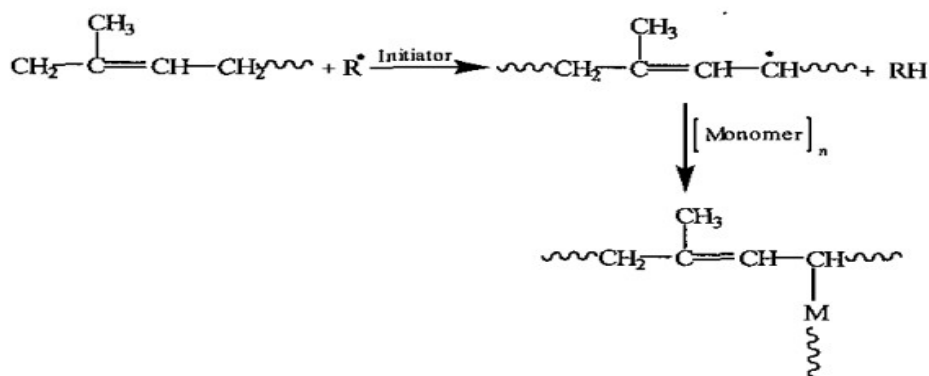
เนื่องจากเกิดกราฟท์โคโพลิเมอร์ไรเซชันรวมกับโพลิเมอร์บนสายโซ่โพลิเมอร์ดังนั้นวิธี ต่าง ๆ ของปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันจึงมีประโยชน์ต่อการสังเคราะห์กราฟท์โคโพลิเมอร์ด้วย ซึ่งปฏิกิริยาโพลิ

เมื่อไรเซชันแบบเรดิเคิลจะถูกกระตุ้นด้วยเรดิเคลิอิสระการทำโพลีเมอไรเซชันแบบเรดิเคิลแบบอิสระต้องมีหมู่ฟังก์ชันที่ว่องไวและเหมาะสมสำหรับกระตุ้นโคโพลีเมอไรเซชัน โดยเรดิเคลิอิสระมีผลโดยตรงต่อการโพลีเมอไรเซชันของโมโนเมอร์ให้เป็นโพลีเมอร์ โดยเทคนิคการสังเคราะห์กราฟท์โคโพลีเมอไรเซชันแบบเรดิเคิลกราฟท์โคโพลีเมอไรเซชันประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้

เรดิเคิลกราฟท์โคโพลีเมอไรเซชันเทคนิคนี้เป็นวิธีที่ใช้กันมากที่สุด เตรียมง่ายและมีประสิทธิภาพสูงแบ่งเป็น 3 วิธี Chain Transfer and Copolymerization, Ultraviolet Radiation and Ionizing Radiation และ Redox Initiation

2.5.1 Chain Transfer and Copolymerization

เป็นการกราฟท์โคโพลีเมอไรเซชันแบบเรดิเคิลโดยอาศัยตัวริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) เช่น เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl Peroxide) เป็นตัวริเริ่มเกิดเรดิเคลิอิสระบนสายโซ่หลัก ส่วนใหญ่ปฏิกิริยาการถ่ายโอนเรดิเคิลระหว่างสายโซ่หมายถึง การดึงอะตอมไฮโดรเจนหรือการแทนที่เรดิเคลิอิสระซึ่งอยู่สายโซ่ที่กำลังโตในการโพลีเมอไรเซชันจะรับอะตอมไฮโดรเจนจากสายโซ่โพลีเมอร์หลักเพื่อให้สายโซ่หลักอยู่ในสภาพเรดิเคลิอิสระสำหรับเกิดกึ่งขึ้นต่อไปได้แสดงดังรูปที่ 2.6



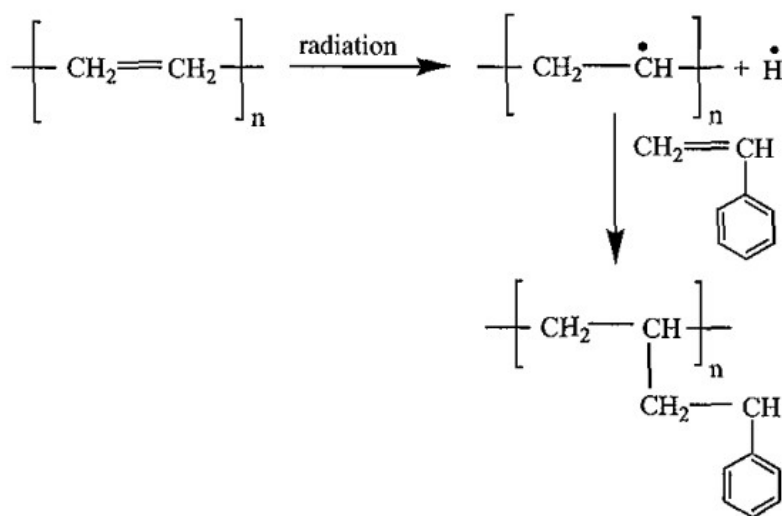
รูปที่ 2.6 Chain Transfer and Copolymerization ของยางธรรมชาติกราฟท์โคโพลีเมอร์

ปฏิกิริยาเริ่มจากตัวริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) ทำหน้าที่กระตุ้นโพลีเมอร์ที่ใช้ในการโพลีเมอไรเซชันให้เป็นเรดิเคิลซึ่งทำปฏิกิริยากับโมโนเมอร์ให้อยู่ในสภาพที่เกิดกราฟท์ดังนั้นการกราฟท์จะเกิดขึ้นกับความว่องไวของตัวริเริ่มปฏิกิริยาลักษณะของโมโนเมอร์ที่ใช้ในปฏิกิริยาต้องมีความว่องไวกับเรดิเคิลที่ได้จากสายโซ่โพลีเมอร์หลักเนื่องจากในการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาในระบบโพลีเมอไรเซชันขั้นต่ำอยู่ในช่วง 1-5 % และสำหรับการเกิดเรดิเคิลนั้นจำเป็นต้องเป็นสายโซ่ของโพลีเมอร์หลักต้องถูกดึงอะตอมไฮโดรเจนออกเพื่อให้เกิดเรดิเคิลใหม่ขึ้นในสายโซ่ของโพลีเมอร์หลักและมีการถ่ายโอนสายโซ่เพื่อโพลีเมอร์หลักอื่นให้เกิดเรดิเคิลและทำปฏิกิริยากับโมโนเมอร์ให้อยู่ในสภาพที่เกิดกราฟท์ต่อไป ดังนั้นความถี่ของการถ่ายโอนสายโซ่ก็มีผลต่อการกราฟท์ด้วยสารผสมของโพลีเมอร์ภายหลังการเกิดปฏิกิริยาการกราฟท์จะประกอบด้วยโฮโมโพลีเมอร์และกราฟท์โพลีเมอร์มีความสามารถในการ

ละลายแตกต่างกันปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และกราฟท์โคโพลิเมอร์ขึ้นอยู่กับลักษณะและชนิดของโพลิเมอร์-โมโนเมอร์และประสิทธิภาพของตัวริเริ่มปฏิกิริยาโพลิเมอร์ที่ไม่อิ่มตัวมีตำแหน่งสำหรับเกิดกราฟท์ได้ 2 ตำแหน่ง คือ ที่แอลฟาคารบอนอะตอมกับพันธะคู่ที่พันธะคู่จะว่องไวและมีแนวโน้มถูก Attack โดยเรดิคัลอิสระได้ง่ายนอกจากนี้พันธะคู่ยังสามารถเกิดโคโพลิเมอร์เช่กับโมโนเมอร์และมีตำแหน่งสำหรับเกิดกราฟท์ด้วยผลของ Crosslink ทำให้เกิด Coupling ของสองกิ่งที่แตกต่างกันทาง Macromolecule Backbone การกราฟท์โคโพลิเมอร์จะมีสมบัติด้าน Impact ดีขึ้นโดยประสิทธิภาพของการกราฟท์ขึ้นกับตัวริเริ่มปฏิกิริยา อุณหภูมิสูงประสิทธิภาพของการเกิดกราฟท์จะเพิ่ม ถ้าตัวริเริ่มปฏิกิริยาเพิ่มประสิทธิภาพจะลดลง

2.5.2 Ultraviolet Radiation and Ionizing Radiation

เป็นโพลิเมอร์ไรเซชันแบบเรดิเคิลอีกวิธีหนึ่งซึ่งเรดิคัลเกิดจากแสงอัลตราไวโอเล็ตหรือรังสีที่ไอออนไนซ์ได้ลงไปในระบบของโพลิเมอร์-โมโนเมอร์ ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยาของแสงต่อระบบของโพลิเอทิลีน-สไตรีน ทำให้เกิดเรดิเคิลบนโพลิเอทิลีน แสดงดังภาพที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดง Ultraviolet Radiation and Ionizing Radiation ของโพลิ(เอทิลีน-กราฟท์-สไตรีน)

การเกิดกราฟท์โพลิเมอร์โดยวิธีฉายรังสีหรือแสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นปฏิกิริยาแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกันโดยโพลิเมอร์ที่เป็นของแข็ง (Solid polymer) เกิดการพองตัวในโมโนเมอร์ที่เป็นของเหลว (Liquid Monomer) อัตราการกราฟท์และการกระจายของโมโนเมอร์เป็นตัวกำหนดว่าปฏิกิริยาเกิดที่ผิวของโพลิเมอร์หรือเกิดตลอดทั้งปริมาตรของโพลิเมอร์

2.5.3 Redox Initiation

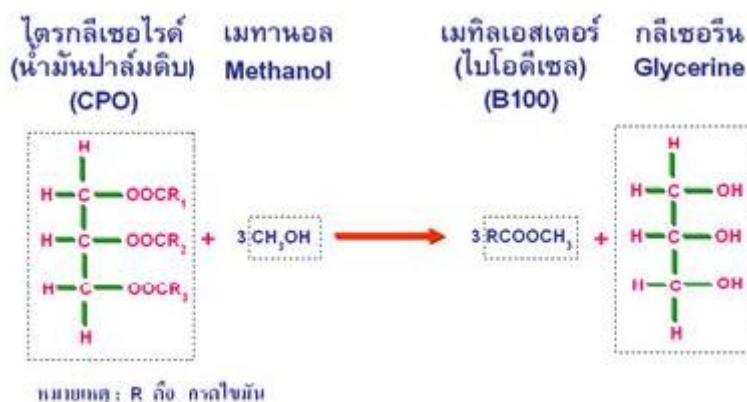
เป็นวิธีการสังเคราะห์โคโพลิเมอร์ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดกับโพลิเมอร์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล เช่น โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ เซลลูโลส ในการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์โดยใช้ซิริคไอออน (Circ Ion) หรือตัวออกซิไดส์ (Oxidizing Agents) เป็นแคทาลิสต์ทำให้โพลิเมอร์เกิดเรดิเคิลวิธีนี้ไม่มีไฮโมโพลิเมอร์เกิดขึ้นในระบบเพราะโมโนเมอร์ไม่ว่องไวต่อซิริคไอออน ปฏิกิริยาแสดงดังภาพที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดง Redox Initiation ของโพลีไวนิลแอลกอฮอล์กับซิริคไอออน

2.6 น้ำมันไบโอดีเซล (Biodiesel) [6-7]

น้ำมันไบโอเป็นเชื้อเพลิงเหลวที่ผลิตได้จาก น้ำมันพืชและไขมันสัตว์ เช่น ปาล์ม มะพร้าว ถั่วเหลือง ทานตะวัน เมล็ดเรพ (rape seed) สนุ่นดำ หรือ น้ำมันพืช น้ำมันสัตว์ ที่ผ่านการใช้งานแล้ว นำมาทำปฏิกิริยาทางเคมี transesterification ร่วมกับเมทานอล หรือ เอทานอลจนเกิดเป็นสารเอสเตอร์ที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล เรียกว่า ไบโอดีเซล (B100) ซึ่งเมื่อนำมาผสมกับน้ำมันดีเซลเกรดที่ใช้กันในปัจจุบันในสัดส่วนร้อยละ 5- 10 (B5-B10) จะสามารถนำมาใช้งานในเครื่องยนต์ดีเซลได้เป็นอย่างดี โดยไม่ต้องดัดแปลงเครื่องยนต์ นอกจากนี้ยังได้กลีเซอรอลและกรดไขมัน เป็นผลพลอยได้ ซึ่งปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างทางเคมีของการผลิตไบโอดีเซล

2.6.1 ประวัติความเป็นมา น้ำมันไบโอดีเซล

เครื่องยนต์ดีเซลสันดาปภายใน ได้ถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกในปี พ.ศ. 2440 (ค.ศ. 1897) โดยวิศวกรที่ชื่อว่า รูดอล์ฟ ดีเซล ส่วนการนำน้ำมันจากพืชมาใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลเป็นครั้งแรกเกิดขึ้นในปี พ.ศ. 2455 (ค.ศ. 1912) เมื่อใช้ไประยะหนึ่งก็ต้องหยุดไปเนื่องจากมีการค้นพบวิธีการผลิตน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมที่มีราคาถูกกว่า จนกระทั่งปี พ.ศ. 2513 (ค.ศ. 1970) เกิดวิกฤติราคาน้ำมันขึ้นทำให้พลังงานจากพืชได้รับความสนใจอีกครั้งหนึ่ง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. ไบโอดีเซล มีจุดเริ่มต้นมาจากประเทศในแถบยุโรป มีการทดลองกระบวนการ Trans-Esterification ในปี พ.ศ. 2525 โดยใช้เมลิสเตเฟ ณ สถาบัน Institute of Organic Chemistry, Graz, Austria
2. ปัจจุบันในสหภาพยุโรปและสหรัฐอเมริกา มีการผลิตและจำหน่ายอย่างกว้างขวางโดยได้รับการยอมรับจากบริษัทผู้ผลิตรถยนต์และผู้ค้าน้ำมัน โดยผสมไบโอดีเซลในสัดส่วนร้อยละ 2 (B2) ซึ่งบังคับใช้ในมตรัฐมิชิแกน และร้อยละ 20 (B20) ตามคำแนะนำให้ใช้ได้ตามกฎหมายยานยนต์เชื้อเพลิงทดแทนของสหรัฐอเมริกา
3. กว่า 28 ประเทศทั่วโลกมีการศึกษาและพัฒนาการผลิตไบโอดีเซลอย่างต่อเนื่อง และในรอบ 10 ปีที่ผ่านมา ประเทศที่ผลิตไบโอดีเซลเป็นอุตสาหกรรมมากที่สุด 5 อันดับแรก ได้แก่ เยอรมนี ฝรั่งเศส อิตาลี สหรัฐอเมริกา และออสเตรเลีย
4. ประเทศสหรัฐอเมริกานิยมใช้น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันใช้แล้ว (Used cooking oil) เป็นวัตถุดิบ
5. ประเทศที่พัฒนาแล้ว ใช้น้ำมันปาล์ม น้ำมันลินสีด และไขสัตว์ เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล

2.6.2 น้ำมันไบโอดีเซลในประเทศไทย

- ปี 2528 พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวฯ ทรงมีพระราชดำริให้มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์สร้างโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มขนาดเล็ก ณ สหกรณ์นิคมอ่าวลึก จังหวัดกระบี่ เนื่องจากเป็นแหล่งที่มีการปลูกปาล์มน้ำมันเป็นจำนวนมาก ประกอบกับเกิดวิกฤติราคาน้ำมันปาล์มดิบตกต่ำเพราะมีผลผลิตล้นตลาด และทรงพระกรุณาโปรดเกล้าฯ ให้สร้างโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ขนาดเล็กมีกำลังผลิตวันละ 110 ลิตร ณ ศูนย์การศึกษาพัฒนาพิภพทองอันเนื่องมาจากพระราชดำริ จังหวัดนราธิวาส
- ปี 2543 กองงานส่วนพระองค์ได้ทำวิจัยพัฒนา และทดลองนำน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์หรือปาล์มดีเซล มาทดลองใช้กับรถยนต์เครื่องยนต์ดีเซลของกองงานส่วนพระองค์ ที่พระราชวังไกลกังวล อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์
- จากผลความสำเร็จดังกล่าว ในวันที่ 9 เมษายน พ.ศ. 2544 พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวฯ ทรงพระกรุณาโปรดเกล้าฯ ให้นายอำพล เสนาณรงค์ องคมนตรี เป็นผู้แทนพระองค์ ยื่นจดสิทธิบัตร ณ กรมทรัพย์สินทางปัญญา กระทรวงพาณิชย์ ในพระปรมาภิไธยของพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวฯ ชื่อที่

แสดงถึงการประดิษฐ์คือ “การใช้น้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงเครื่องยนต์ดีเซล” สิทธิบัตรเลขที่ 10764

- วันที่ 16 พฤษภาคม พ.ศ.2544 วันพืชมงคลจรดพระนังคัลแรกนาขวัญ มีหน่วยงาน 4 หน่วยงานได้นำผลงานเกี่ยวกับการวิจัยใช้น้ำมันปาล์มเป็นน้ำมันในเครื่องยนต์ดีเซลไปจัดนิทรรศการที่สวนจิตรลดา ได้แก่ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย การปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และบริษัท ยูนิวานิช จำกัด
- ปี พ.ศ.2544 สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติได้จัดส่งผลงานในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวฯ ไปร่วมแสดงในงานนิทรรศการสิ่งประดิษฐ์นานาชาติชื่องาน “Brussels Eureka 2001” ณ กรุงบรัสเซลส์ ประเทศเบลเยียม ด้วยพระอัจฉริยภาพและพระปรีชาสามารถในการประดิษฐ์คิดค้นของพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวฯ ส่งผลให้ผลงานการคิดค้น 3 ผลงานของพระองค์ คือ “ทฤษฎีใหม่” “โครงการฝนหลวง” และ “โครงการน้ำมันไบโอดีเซลสูตรสกัดจากน้ำมันปาล์ม” ได้รับเหรียญทองประกาศนียบัตรสดุดีเทิดพระเกียรติคุณ พร้อมถ้วยรางวัล ในงานดังกล่าวล้วนเป็นผลงานการคิดค้นแนวใหม่ในการพัฒนาประเทศ นำมาซึ่งความปลาบปลื้มปิติยินดีแก่ประชาชนชาวไทยทั้งมวล ต่อมาหน่วยงานราชการ ภาคเอกชน เกษตรกร และบริษัทผู้ค้าน้ำมัน ร่วมมือกันพัฒนาหน่วยผลิตต้นแบบ ในหลายๆ โครงการ อย่างต่อเนื่อง จนสามารถผลิตได้ในเชิงพาณิชย์ และเพื่อเป็นการส่งเสริมให้ประชาชนได้รู้จักและสร้างความมั่นใจในการใช้น้ำมันไบโอดีเซล ภาครัฐจึงได้มีโครงการนำร่อง เพื่อส่งเสริมการใช้น้ำมันไบโอดีเซล ดังต่อไปนี้
- โครงการทดลองจำหน่ายน้ำมันไบโอดีเซล B2 ได้เริ่มดำเนินการในช่วงปลายปี 2547 โดยเป็นโครงการที่กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) สนับสนุนให้นำไบโอดีเซลมาผสมกับน้ำมันดีเซลเพื่อทดแทนสารเพิ่มความหล่อลื่นในสัดส่วนร้อยละ 2 (B2) จำหน่ายผ่านสถานีบริการน้ำมันบางจาก และ ปตท. โดยจำหน่ายให้รถยนต์สองแถวรับจ้างของจังหวัดเชียงใหม่ที่เข้าร่วมประมาณ 1,300 คัน ในราคาที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลปกติ 50 สตางค์ต่อลิตร โครงการนี้ถือเป็นโครงการนำร่องสนับสนุนให้ผู้บริโภคหันมาใช้ น้ำมันไบโอดีเซล
- โครงการนำร่องของชุมชนสหกรณ์ชาวสวนปาล์มน้ำมันกระบี่ ซึ่งมีพื้นที่ปลูกปาล์มประมาณ 200,000 ไร่ มีโรงหีบน้ำมันที่มีกำลังการผลิต 200,000 ลิตรต่อวัน สามารถขยายกำลังการผลิตเพิ่มเป็น 400,000 ลิตรต่อวันได้ และมีการลงทุนสร้างโรงงานไบโอดีเซล กำลังผลิต 20,000 ลิตรต่อวัน โดยใช้เทคโนโลยีการผลิตของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เป็นผู้ออกแบบ และได้รับการส่งเสริมจากภาครัฐ
- โครงการนำร่องห้วยโสมง จังหวัดหนองคาย มีพื้นที่ที่เหมาะสมต่อการปลูกน้ำมันปาล์มประมาณ 40,000 ไร่ และได้ทดลองปลูกปาล์มในพื้นที่ดังกล่าวประมาณ 30 เดือน ได้ผลใกล้เคียงกับการทดลองในจังหวัดสุราษฎร์ธานี ปัจจุบันได้มีบริษัทเอกชนกำลังศึกษารายละเอียดเพื่อเข้าร่วมโครงการ

นอกจากนี้ภาครัฐยังมีโครงการอื่นๆ สำหรับศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตและการใช้น้ำมันไบโอดีเซล อาทิ

- โครงการศึกษาความเหมาะสมการผลิตและการใช้ไบโอดีเซลจากพืชน้ำมันและไขมันสัตว์ ซึ่งเป็นการทดลองใช้งานจริงกับรถยนต์ราชการ โดยใช้ไบโอดีเซลผสมกับน้ำมันดีเซลในสัดส่วนร้อยละ 20 , 40 และ 100 ตามลำดับ แล้วนำผลการใช้มาเปรียบเทียบกับรถที่ใช้น้ำมันดีเซลปกติ
- โครงการศึกษาออกแบบจัดตั้งโรงงานผลิตไบโอดีเซลนำร่องระดับชุมชน โดย กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) ได้ส่งเสริมให้มีการศึกษาพัฒนาเครื่องต้นแบบระบบผลิตไบโอดีเซลระดับชุมชนจากน้ำมันปาล์มดิบแบบต่อเนื่อง ขนาดกำลังการผลิต 50 ลิตรต่อวัน
- โครงการศึกษาจัดทำแผนยุทธศาสตร์และปฏิบัติการส่งเสริมการใช้ไบโอดีเซลในภาคขนส่ง เพื่อศึกษาวิจัย พัฒนาและสาธิต การใช้งานจริงไบโอดีเซลร่วมกับก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในรถยนต์คู่โดยสาร และรถยนต์ในลักษณะ Dual Fuel โดยใช้น้ำมันไบโอดีเซลร้อยละ 30 ผสมกับก๊าซธรรมชาติอัด
- โครงการกรุงเทพไฟฟ้าย่อยไบโอดีเซล เป็นโครงการนำร่องของ พพ. เพื่อส่งเสริมการจำหน่ายน้ำมันไบโอดีเซล B5 ในเชิงพาณิชย์ ในเขตพื้นที่กรุงเทพฯ เพื่อเป็นการส่งเสริม ประชาสัมพันธ์และสร้างความรู้ ความเข้าใจให้กับประชาชน
- โครงการหน่วยผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว ขนาดกำลังผลิต 50,000 ลิตรต่อวัน ของ บริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) โดยน้อมนำแนวพระราชดำริด้านพลังงานทดแทน มาขยายผลและส่งเสริมให้ประชาชนหันมาใช้ไบโอดีเซล พร้อมเปิดจุดรับซื้อน้ำมันพืชใช้แล้วเพื่อผลิตไบโอดีเซล ณ โรงกลั่นน้ำมันบางจาก สุขุมวิท64 และสถานีบริการน้ำมันบางจากอีกกว่า 20 แห่ง ใน กทม. ปริมณฑล และที่อำเภอศรีประจันต์ จังหวัดสุพรรณบุรี รวมทั้งได้รณรงค์รับซื้อน้ำมันพืชใช้แล้วจากตลาดต่างๆ ในเขตกรุงเทพฯ เพื่อเป็นวัตถุดิบป้อนหน่วยผลิตไบโอดีเซลที่ตั้งอยู่ในโรงกลั่นน้ำมันบางจาก อีกทั้งได้ขยายสถานีบริการน้ำมันบางจากที่จำหน่ายไบโอดีเซลสูตร B5 ออกไปทั่วประเทศมากกว่า 300 แห่ง ในปี 2549 และมีแผนจะเพิ่มเป็น 500 แห่งในปี 2550 ซึ่งจะเป็นการช่วยลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมจากการทิ้งน้ำมันพืชใช้แล้วสู่สาธารณะและลดผลกระทบต่อสุขภาพประชาชนจากการนำไปใช้ซ้ำ
- โครงการไบโอดีเซลเพื่อสังคมไทยสู่เศรษฐกิจพอเพียง เฉลิมพระเกียรติ 80 พรรษา เป็นความร่วมมือของ กรุงเทพมหานคร บริษัทบางจากฯ และชุมชน ในการรณรงค์เพื่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพอนามัยที่ดี โดยรวบรวมน้ำมันพืชใช้แล้วจากชุมชนมาจำหน่ายให้กับบริษัทบางจากฯ เพื่อผลิตไบโอดีเซล พร้อมน้อมนำแนวพระราชดำริและปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียงมาขยายผล ให้เขตพระโขนงเป็นพื้นที่นำร่อง จากนั้นจะขยายให้ครบทั้ง 50 เขตใน กทม. รวมถึงผลักดันให้รถยนต์ของหน่วยงานกรุงเทพมหานคร (กทม.) ใช้ไบโอดีเซล B5 ซึ่งเป็นการสร้างความร่วมมือในการจัดการสิ่งแวดล้อมของ กทม. และสร้างรายได้ให้กับชุมชนและทุกภาคส่วนที่เข้าร่วมโครงการต่างๆ เหล่านี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

ส่งเสริมการใช้ไบโอดีเซล และมุ่งสร้างความเชื่อมั่นต่อประชาชนว่าน้ำมันไบโอดีเซลสามารถใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลปกติได้ และมีการผลิตจำหน่ายได้ในเชิงพาณิชย์

2.7 น้ำมันแก๊สโซฮอล์ (Gasohol) [7]

2.7.1 น้ำมันแก๊สโซฮอล์คืออะไร

น้ำมันแก๊สโซฮอล์ คือ น้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับรถยนต์ ที่ใช้สำหรับทดแทนน้ำมันเบนซิน (น้ำมันแก๊สโซลิน) ที่มีส่วนผสมระหว่างเอทานอลหรือเอทิลแอลกอฮอล์ มีความบริสุทธิ์ 99.5% ผสมกับน้ำมันเบนซิน ในอัตราส่วน น้ำมัน 9 ส่วน เอทานอล 1 ส่วน ได้เป็นน้ำมันแก๊สโซฮอล์ ซึ่งมีคุณสมบัติตามมาตรฐานที่กำหนด และสามารถใช้ทดแทนน้ำมันเบนซิน 95 ธรรมดาได้ โดยเติมได้ทันที ไม่ต้องติดตั้งอุปกรณ์ใดๆ เพิ่มเติม และสามารถเติมสลับหรือผสมกับเบนซิน โดยไม่ต้องรอให้น้ำมันหมดถัง

ปัจจุบันประเทศไทย โดยกระทรวงพลังงาน อนุญาตให้มีการผลิตแก๊สโซฮอล์ 3 ชนิด คือ

1) น้ำมันแก๊สโซฮอล์ E10 แบ่งเป็น

1.1 น้ำมันแก๊สโซฮอล์ ออกเทน 91

1.2 น้ำมันแก๊สโซฮอล์ ออกเทน 95

โดยมีส่วนผสมของเอทานอลไม่เกินร้อยละ 10 และไม่ต่ำกว่าร้อยละ 9 กับ น้ำมันเบนซินพื้นฐานร้อยละ 90 โดยปริมาตร สามารถใช้แทนหรือสลับกับน้ำมันเบนซิน 95 และ 91 ได้ตามปกติโดยไม่ต้องดัดแปลงเครื่องยนต์

2) น้ำมันแก๊สโซฮอล์ E20 มีส่วนผสมของเอทานอลไม่เกินร้อยละ 20 และไม่ต่ำกว่า ร้อยละ 19 กับ น้ำมันเบนซินพื้นฐานร้อยละ 80 โดยปริมาตร

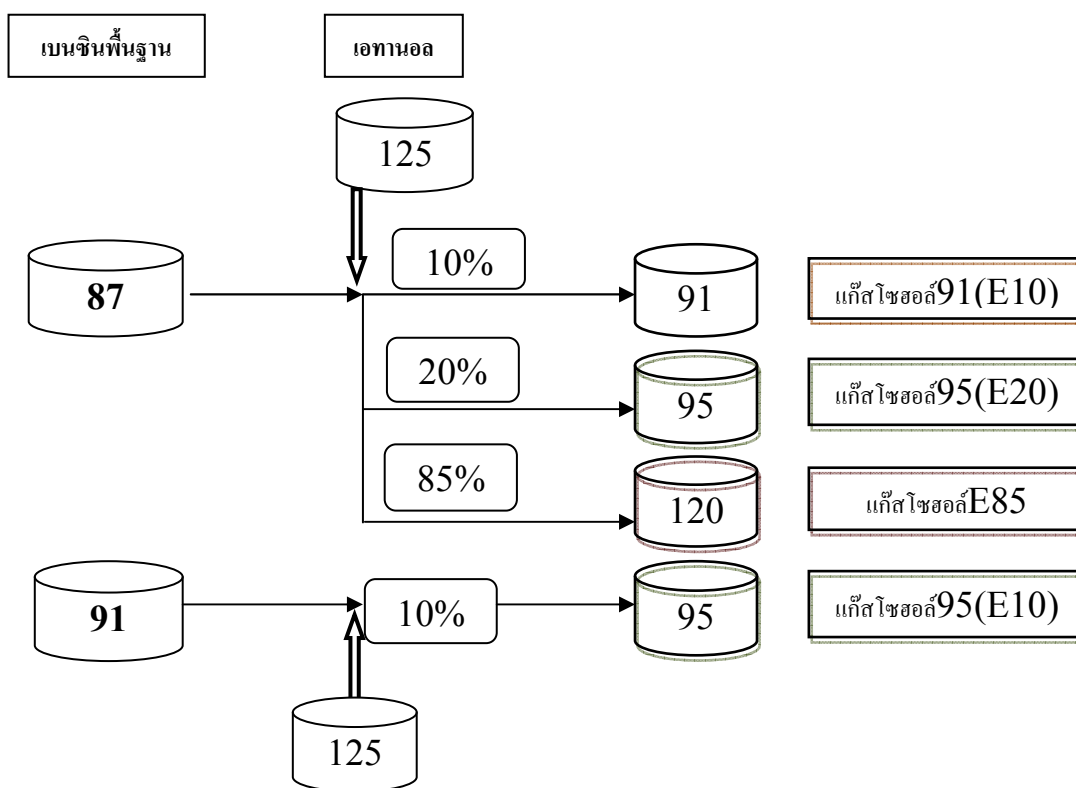
3) น้ำมันแก๊สโซฮอล์ E85 มีส่วนผสมของเอทานอลร้อยละ 85 กับ น้ำมันเบนซินพื้นฐานร้อยละ 15 โดยปริมาตรหรือมีเอทานอลไม่ต่ำกว่าร้อยละ 75

โดยเอทานอลที่ใช้ผสมจะอยู่ในรูปของเอทานอลแปลงสภาพ

2.7.2 กระบวนการผลิตน้ำมันแก๊สโซฮอล์

น้ำมันแก๊สโซฮอล์รู้จักกันดีแล้วว่าเป็นน้ำมันเบนซินเกรดที่มีแอลกอฮอล์ผสมอยู่ด้วยสัดส่วนต่างๆ ตามชื่อเรียกจริงๆ แล้วการผลิตแก๊สโซฮอล์สามารถผลิตที่โรงกลั่นร่วมกับกระบวนการผลิตเบนซินทั่วไปได้ และมีหลายโรงกลั่นที่ทำเช่นนั้น แต่เนื่องจากแก๊สโซฮอล์ชอบน้ำมาก เมื่อมีการปนเปื้อนด้วยน้ำ แก๊สโซฮอล์จะดูดและอมน้ำไว้จนถึงปริมาณหนึ่งจะแยกตัวออกจากน้ำมันเบนซิน ดังนั้นเพื่อป้องกันปัญหาการปนน้ำจึงพยายามผสมแก๊สโซฮอล์ในคลังน้ำมันที่อยู่ใกล้แหล่งจ่ายและสถานีบริการให้มากที่สุด กระบวนการผสมแก๊สโซฮอล์ทำได้โดยการผสมเบนซินพื้นฐานด้วยเอทานอลด้วยสัดส่วนที่ต้องการ โดยสามารถผสมในถังน้ำมันก่อน หรือผสมในท่อจ่ายลงรถได้เลย ซึ่งการผสมที่คลังน้ำมันนั้นน้ำมันเบนซินพื้นฐานและเอทานอลต้องได้มาตรฐานก่อน

การผสมจะควบคุมปริมาณเอทานอลให้ได้ตามสัดส่วนที่ต้องการก็จะได้แก๊สโซฮอล์เกรดต่างๆ ที่ต้องการ



รูปที่ 2.10 แสดงกระบวนการผลิตแก๊สโซฮอล์ที่คลังน้ำมัน

ที่มา : <http://www.vcharkarn.com/vblog/37277/10>

2.7.3 ข้อกำหนดและคุณภาพของน้ำมันแก๊สโซฮอล์ของประเทศไทย

ตารางที่ 2.4 แสดงข้อกำหนดและคุณภาพของน้ำมันแก๊สโซฮอล์ของประเทศไทย

ข้อกำหนดและคุณภาพของน้ำมันเบนซินและแก๊สโซฮอล์	หน่วยวัด	ข้อจำกัด	เบนซิน 91	เบนซิน 95	แก๊สโซฮอล์ 91 E 10	แก๊สโซฮอล์ 95 E10	แก๊สโซฮอล์ 95 E 20
สี(color)			แดง	เหลืองอ่อน	เขียว	ส้ม	-
ค่าออกเทนโดยวิธีวิจัย(RON)		ไม่ต่ำกว่า	91	95	91	95	95
ค่าออกเทนโดยวิธีมอเตอร์(MON)		ไม่ต่ำกว่า	80	84	80	84	84

ค่ากำมะถัน(Sulfur)	ร้อยละ โดย น้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
ค่าเบนซีน(Benzene)	ร้อยละ โดย ปริมาตร	ไม่สูงกว่า	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
ค่าสารอะโรมาติก(Aromatics)	ร้อยละ โดย ปริมาตร	ไม่สูงกว่า	35	35	35	35	35
ค่าการกลั่น (Distillation)							
อุณหภูมิการระเหยในอัตราร้อยละ 10 โดยปริมาตร	° C	ไม่สูงกว่า	70	70	70	70	70

ตารางที่ 2.4 (ต่อ) แสดงข้อกำหนดและคุณภาพของน้ำมันแก๊สโซฮอล์ของประเทศไทย

ข้อกำหนดและ คุณภาพ ของน้ำมันเบนซิน และ แก๊สโซฮอล์	หน่วยวัด	ข้อจำกัด	เบนซิน 91	เบนซิน 95	แก๊สโซฮอล์ 91 E 10	แก๊สโซฮอล์ 95 E10	แก๊สโซฮอล์ 95 E 20
-อุณหภูมิการระเหยใน อัตราร้อยละ 50 โดยปริมาตร	° C		70-110	70-110	70-110	70-110	70-110
อุณหภูมิการระเหยใน อัตราร้อยละ 90 โดยปริมาตร	° C	ไม่สูงกว่า	170	170	170	170	170
อุณหภูมิจุดเดือดสุดท้าย	° C	ไม่สูงกว่า	200	200	200	200	200
ค่าความดันไอ ณ อุณหภูมิ 37.8 องศาเซลเซียส	กิโลปาสกาล	ไม่สูงกว่า	62	62	62	62	62
ค่าสารออกซิเจนเนต							
ค่าสารเอ็มทีบีอี(MTBE)	ร้อยละโดย ปริมาตร	-	5.5 -11				
ค่าเอทานอล(Ethanol)	ร้อยละโดย ปริมาตร			9 -10	9-10	19-20	

หมายเหตุ สีของแก๊สโซฮอล์ 95 (E20) ยังไม่ได้กำหนด

บางจาก ใช้สีเขียว

ปตท. ใช้สีส้ม

2.7.4 น้ำมันแก๊สโซฮอล์ E85

น้ำมันแก๊สโซฮอล์ E85 ของประเทศไทย คือ น้ำมันเบนซินที่มีส่วนผสมของเอทานอลชนิดความบริสุทธิ์ 99.5% อยู่ระหว่างร้อยละ 75 - 85 กับน้ำมันเบนซินพื้นฐาน สามารถใช้เติมในรถยนต์ที่ผลิตให้สามารถรองรับน้ำมันแก๊สโซฮอล์ที่มีส่วนผสมของเอทานอลในสัดส่วนที่สูงได้หรือเรียกว่ารถยนต์ E85 หรือ Flex Fuel Vehicle

น้ำมันแก๊สโซฮอล์ E85 เป็นเชื้อเพลิงที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Environmentally Friendly Fuel) ลดมลพิษที่ปล่อยจากไอเสีย ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกตัวหนึ่งที่เป็นสาเหตุหลักของการเกิดภาวะโลกร้อน โดยจะลดลงมากเมื่อเทียบกับการใช้น้ำมันเบนซิน นอกจากนั้น น้ำมันแก๊สโซฮอล์ E85 ยังช่วยลดการพึ่งพาน้ำมันจากต่างประเทศ เนื่องจากการใช้น้ำมันแก๊สโซฮอล์ E85 ของผู้บริโภค 1 ลิตร จะมีส่วนช่วยให้ประเทศไทยลดการใช้น้ำมันเบนซินลงได้ถึง 0.85 ลิตร ในปัจจุบันน้ำมันแก๊สโซฮอล์ E85 มีใช้อย่างแพร่หลายในประเทศสวีเดน และในบางรัฐของ สหรัฐอเมริกา แอบริกานิซต้า มีการกำหนดอัตราการผสมของเอทานอลแตกต่างกันไปในแต่ละพื้นที่ ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศในแต่ละฤดูกาลของประเทศนั้นๆ เหตุผลหลักที่สำคัญและเหมือนกันทุกประเทศของการส่งเสริมการใช้เอทานอลผสมในน้ำมันเบนซิน คือ เพื่อสร้างความมั่นคงด้านพลังงาน ลดการพึ่งพาน้ำมันปิโตรเลียม ลดภาวะโลกร้อนจากการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศ และเพื่อช่วยเหลือ

2.7.5 ข้อดีของน้ำมันแก๊สโซฮอล์

ผลดีต่อเครื่องยนต์

- ไม่มีผลกระทบต่อสมรรถนะเครื่องยนต์และอัตราการเร่งไม่แตกต่างจากน้ำมันเบนซิน 95
- สามารถผสมกับน้ำมันที่เหลืออยู่ในถังได้เลยโดยไม่ต้องรอให้น้ำมันที่มีอยู่ในถังหมด
- ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินการปรับแต่งเครื่องยนต์

ผลดีต่อประเทศ

- ช่วยลดการนำเข้าน้ำมันเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ ลดการขาดดุลทางการค้า
- ช่วยประหยัดเงินตราต่างประเทศในการนำเข้าสาร MTBE ถึงปีละ 3,000 ล้านบาท
- ใช้ประโยชน์จากพืชผลทางการเกษตรสูงสุดและยกระดับราคาพืชผลทางการเกษตร สร้างรายได้ให้เกษตรกร
- เครื่องยนต์มีการเผาไหม้ที่ดีขึ้น ทำให้ช่วยลดมลพิษทางอากาศ และแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อม โดยสามารถลดปริมาณไฮโดรคาร์บอนและคาร์บอนมอนอกไซด์ลง 20 - 25 % ทำให้ลดค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับสุขภาพของประชาชน
- ทำให้เกิดการลงทุนที่หลากหลายทั้งด้านเกษตรและอุตสาหกรรม

- เป็นพลังงานหมุนเวียนจึงถือเป็นการอนุรักษ์ทรัพยากรของโลก ซึ่งเป็นแนวทางพัฒนาประเทศที่ยั่งยืน

ผลดีต่อคุณ

- ได้ใช้น้ำมันแก๊สโซลีน ในราคาที่ประหยัดลง 1.50 บาทต่อลิตร
- ช่วยให้เครื่องยนต์เผาไหม้สะอาด สมบูรณ์ยิ่งขึ้น
- ได้มีส่วนช่วยเหลือเกษตรกร เพื่อนร่วมชาติให้ขายผลผลิตได้ในราคาที่สูงขึ้น
- ได้ช่วยลดมลพิษทางอากาศ ซึ่งส่งผลถึงชีวิตตนเอง ลูกหลาน และเพื่อนร่วมชาติ

2.8 สารเคมีที่ใช้ในยางผสม [3]

2.8.1 ระบบการคงรูปด้วยเปอร์ออกไซด์

2.8.1.1 ข้อดีของระบบการคงรูปด้วยเปอร์ออกไซด์

- การคงรูปด้วยเปอร์ออกไซด์ไม่ก่อให้เกิดปัญหาเรื่องการบวมของสารเคมีต่าง ๆ
- การใช้เปอร์ออกไซด์ในการคงรูปไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสี

(no discoloration) โดยเฉพาะยางสีที่ต้องสัมผัสกับแสงอัลตราไวโอเลต (UV) โดยตรง

- สามารถใช้เปอร์ออกไซด์ในการคงรูปร่วม (co-vulcanization) ระหว่างยางกับ

พอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ ได้ง่าย

- ยางที่ได้จากการคงรูปด้วยเปอร์ออกไซด์จะมีสมบัติการเสียรูปหลังการกดอัด (โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง) ที่ดีและมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนสูงกว่ายางที่ได้จากการคงรูปด้วยกำมะถัน เพราะพันธะ C – C ที่เกิดจากการคงรูปด้วยเปอร์ออกไซด์จะมีความแข็งแรงสูงกว่าพันธะ C – S และพันธะ S – S ที่เกิดจากการคงรูปด้วยกำมะถัน ตามลำดับ (พลังงานพันธะของ C – C C – S และ S – S มีค่าประมาณ 344 279 และ 206 kJ/mol ตามลำดับ)

2.8.1.2 ข้อเสียของระบบการคงรูปด้วยเปอร์ออกไซด์

แม้ว่าระบบการคงรูปด้วยเปอร์ออกไซด์จะมีข้อดีหลายประการ แต่การใช้เปอร์ออกไซด์เป็นสารทำให้ยางคงรูปก็ก่อให้เกิดผลเสียหลายข้อเช่นกัน ตัวอย่างเช่น ยางคงรูปที่ได้จากการใช้เปอร์ออกไซด์บางชนิด โดยเฉพาะไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (dicumyl peroxide , DCP) และบิวทิลคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (tert.-butylcumyl peroxide , BCUP) อาจมีกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ของอะเซโทฟีโนน (acetophenone) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการทำปฏิกิริยาของรูป ดังนั้น สำหรับยางที่สามารถทนต่ออุณหภูมิสูงได้ดี (เช่น ยางซิลิโคน) จึงต้องมีการจำกัดสารที่เกิดขึ้นเหล่านี้โดยการนำยางที่คงรูปแล้วไปผ่านการอบที่อุณหภูมิสูงอีกครั้ง เรียกขั้นตอนนี้ว่า “post curing” ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเปอร์ออกไซด์ชนิดใหม่ ๆ เช่น บิวทิลเปอร์ออกไซด์ไดเมทิลเฮกเซน (2,5-bis-(tert.butylperoxy)-2,5-dimethylhexane) ที่ทำให้เกิดกลิ่นเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม การทำ post curing เพื่อจำกัดสารเคมีที่เกิดจากการสลายตัวของ

เปอร์ออกไซด์ก็ยังเป็นสิ่งที่เป็นเพราะสารเคมีเหล่านี้อาจเข้าไปมีส่วนร่วมในปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพของยางซึ่งอาจส่งผลทำให้ผลิตภัณฑ์ยางมีอายุการใช้งานน้อยลง

นอกจากนี้ข้อด้อยต่างๆที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น ระบบการคงรูปด้วยเปอร์ออกไซด์ยังมีข้อจำกัดในการใช้งานอยู่อีกหลายประการ ดังนี้

2.8.1.2.1 ระบบการคงรูปด้วยเปอร์ออกไซด์ไม่เหมาะสำหรับใช้ในการคงรูปยางที่

ใช้อากาศร้อน (hot air) เป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน รวมถึงเทคนิคการคงรูปด้วยคลื่นพลังงานที่มีความถี่สูงมากๆ (ultrahigh frequency, UHF) หรือที่เรียกว่าคลื่นไมโครเวฟ เพราะในอากาศมีออกซิเจนที่สามารถไปออกซิไดซ์อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวของเปอร์ออกไซด์ให้กลายเป็นไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (R-O-O-H) ซึ่งไฮโดรเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นนี้จะสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนและจะส่งผลทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพแทนที่จะเกิดการเชื่อมโยงทางเคมี(ไฮโดรเปอร์ออกไซด์เป็นสารริเริ่มในการเกิดปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพของยาง) ในกรณีที่ต้องคงรูปยางในสถานะที่มีออกซิเจน ควรใช้ไดคลอโรเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (2,4-dichlorobenzoylperoxide) เป็นสารทำให้ยางคงรูปเพราะมีเพียงเปอร์ออกไซด์ชนิดนี้เท่านั้นที่ไม่ทำให้เกิดไฮโดรเปอร์ออกไซด์

2.8.1.2.2 ระบบการคงรูปด้วยเปอร์ออกไซด์ไม่เหมาะสำหรับใช้ในการคงรูปยางบิวไทล์ (IIR) เพราะเมื่อเปอร์ออกไซด์แตกตัวจะทำให้ยางบิวไทล์เกิดการเสื่อมสภาพแทนที่จะเกิดการเชื่อมโยงทางเคมี อย่างไรก็ดี ระบบการคงรูปด้วยเปอร์ออกไซด์สามารถใช้ได้กับยางฮาโลบิวไทล์ (X-IIR)

2.8.1.2.3 เนื่องจากเปอร์ออกไซด์สามารถทำปฏิกิริยากับสารเคมีอื่นๆที่เป็นองค์ประกอบของการผสมยางได้ จึงอาจเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงที่ไม่พึงประสงค์ ดังนั้น เมื่อใช้ระบบเปอร์ออกไซด์ในการคงรูปยาง ผู้ออกสูตรจึงจำเป็นต้องเลือกใช้สารเคมีอื่นๆ ด้วยความระมัดระวัง โดยเฉพาะน้ำมัน สารทำให้ยางนํม และสารป้องกันการเสื่อมสภาพ ตัวอย่างเช่น เปอร์ออกไซด์สามารถทำปฏิกิริยากับสารป้องกันการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากทั้งออกซิเจน(antioxidants) และโอโซน (antiozonants) ทำให้สารป้องกันการเสื่อมสภาพดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการทำงานลดลง หากจำเป็นต้องคงรูปด้วยเปอร์ออกไซด์ควรใช้สารป้องกันการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากออกซิเจนในกลุ่มควิโนลีน (quinoline) เพราะสารเคมีในกลุ่มนี้ได้รับผลกระทบจากเปอร์ออกไซด์น้อยที่สุดและควรใช้ไฮพาราฟิน (paraffin wax) ในการป้องกันการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากโอโซนแทนการใช้สารเคมีชนิดอื่นๆ นอกจากนี้เปอร์ออกไซด์ยังสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำมันหรือสารทำให้ยางนํมชนิดอื่นๆ ได้อีก โดยเฉพาะน้ำมันอะโรมาติกซึ่งจะได้รับผลกระทบจากเปอร์ออกไซด์มากที่สุดในขณะที่น้ำมันพาราฟินิกได้รับผลกระทบน้อยที่สุด

2.8.2 ชนิดของเปอร์ออกไซด์

เปอร์ออกไซด์ที่นิยมใช้เป็นสารเชื่อมโยงในยางส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ในกลุ่มไดอัลคิลเปอร์ออกไซด์ (dialkyl peroxide) สารเปอร์ออกไซด์ที่ใช้กันมากที่สุด ได้แก่ ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (DCP) ซึ่งอาจอยู่ในรูปของแข็งหรือของเหลวที่มีความบริสุทธิ์ตั้งแต่ 90 - 99% แต่เนื่องจากเปอร์ออกไซด์ชนิดนี้มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีค่อนข้างสูง บางครั้งจึงมีการนำเอาเปอร์ออกไซด์ชนิดนี้ไปผสมกับตัวพาที่เฉื่อย (inert carrier) เช่นแคลเซียมคาร์บอเนตหรืออาจผสมพอลิเมอร์บางชนิดเพื่อให้ได้เปอร์ออกไซด์ที่มีความบริสุทธิ์อยู่เพียง 40 - 50

ตารางที่ 2.5 เปอร์ออกไซด์อินทรีย์ (organic peroxide) ที่นิยมใช้ในการคงรูปยาง

ชื่อทางเคมีและสูตร	ชื่อทางการค้าและผู้ผลิต	รูปแบบ	ความบริสุทธิ์ (%)	หมายเหตุ
เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (benzoylperoxide)	Lucidol (Novadel)	ผงเปียกชื้น	80	เหมาะสำหรับยางซิลิโคนเท่านั้นและผงที่อยู่ในสภาพแห้งอาจจะระเบิดได้
	Lucidol B-70 (Novadel)	กึ่งแข็งกึ่งเหลวใน Phthalate plasticizer	70	
	Lucidol S-50 (Novadel)	กึ่งแข็งกึ่งเหลวในน้ำมันซิลิโคน	50	
ไดคลอโรเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (2,4-dichlorobenzoyl peroxide)	Perkadox SD (Novadel)	ผงเปียกชื้น	50	เหมาะสำหรับยางซิลิโคนเท่านั้นและผงที่อยู่ในสภาพแห้งอาจจะระเบิดได้
	Perkadox PDB-50 (Novadel)	กึ่งแข็งกึ่งเหลวใน Phthalate plasticizer	50	
	Perkadox PDS-50 (Novadel)	กึ่งแข็งกึ่งเหลวในน้ำมันซิลิโคน	50	
ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumylperoxide)	Perkadox SB (Novadel)	ผง	95	เหมาะกับยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์โอเลฟิน รวมถึงยางซิลิโคน
	Perkadox BC-40 (Novadel)	ผง	40	
	Perkadox BM-50 (Novadel)	สารละลายใน Phthalate plasticizer	50	

ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างของเปอร์ออกไซด์อินทรีย์ที่นิยมใช้ในการคงรูปยาง

ชื่อทางเคมี และสูตร	ชื่อทางการค้า และผู้ผลิต	รูปแบบ	ความบริสุทธิ์ (%)	หมายเหตุ
ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumylperoxide)	Dicup (Hercules)	ผง	96	เหมาะสมกับยาง ธรรมชาติและยาง สังเคราะห์โอเลฟิน รวมถึงยางซิลิโคน
	Dicup 40C	ผง	40	
บิวทิลเปอร์ออกซี-ได เมทิลเฮกเซน (2,5-Di- (t-butylperoxy)-2,5- dimethylhexane)	Varox (Vanderbit)	ผง	50	เหมาะสมกับยาง ธรรมชาติและยาง สังเคราะห์โอเลฟิน รวมถึงยางซิลิโคน
	Luperco 101-XL (wallace&Tiernan)	ผง	45	
บิวทิลเปอร์ออกซี-ได ไอโซโพรพิลเบนซีน (DI-(t-butylperoxy)- diisopropylbenzene)	Vulcup (Hercules)	ผง	85	เหมาะสมกับยาง ธรรมชาติและยาง สังเคราะห์โอเลฟิน รวมถึงยางซิลิโคน

2.8.3 ปริมาณการใช้เปอร์ออกไซด์

ปริมาณของเปอร์ออกไซด์ที่ใช้จะไม่เกิน 2.5 phr แต่ส่วนใหญ่จะใช้ค่อนข้างน้อย (<1 phr) เพราะการใช้เปอร์ออกไซด์ในปริมาณมากเกินไปจะทำให้ยางแข็งกรอบและสูญเสียความยืดหยุ่น อีกทั้งยังต้องประสบกับปัญหาสารเคมีตกค้างอีกด้วย ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการคงรูปยางนั้นจะอยู่ที่ 160-190 ° C (~320-380 ° F) อย่างไรก็ตามอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการคงรูปยางจะขึ้นโดยตรงกับชนิดของเปอร์ออกไซด์ด้วย

2.9 การบดยางให้นิ่ม (mastication)

การบดยางผสมกับสารเคมีต่างๆ ให้เข้ากับเนื้อยางสมบัติของยางที่สำคัญสำหรับการบดผสมคือ ความหนืด (viscosity) ถ้ายางมีความหนืดสูงจะทำให้การบดผสมเป็นไปได้ยากเนื่องจากสารเคมีจะเข้าผสมกับยางได้ยากและจะใช้พลังงานในการบดผสมสูง ด้วยเหตุนี้ก่อนการใส่สารเคมีลงไปจึงต้องมีการลดความหนืดโดยการบดยางให้นิ่ม (mastication) ซึ่งภาษาชาวบ้านเรียกว่า การตียาง ในบางกรณีอาจมีการเติมสารช่วยย่อยโมเลกุลหรือ peptizer เพื่อให้ยางนิ่มเร็วขึ้น โดยทั่วไปการบดยางจะกระทำในเครื่องบดซึ่งอาจใช้เครื่องบดระบบปิด (internal mixer) หรือเครื่องบดระบบเปิด (two-roll-mill) ขั้นตอนนี้ยางถูกทำให้นิ่มโดยโมเลกุลของยางถูกทำให้ฉีกขาด เพราะแรงเฉือนจากเครื่องบดและจะใช้ระยะเวลาในการบดนานเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับความหนืดเริ่มต้นของยาง ถ้ายางมีความหนืดสูงมาก (โดยเฉพาะยาง

ธรรมชาติ) ก็ต้องบดนาน อุณหภูมิของการบดควรจะต่ำกว่า 100 °C เพื่อป้องกันยางเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน

ค่าความหนืดของยางสามารถวัดค่าได้โดยใช้เครื่อง Mooney viscometer ใช้หลักการหมุน (rotate) ยางด้วยแกน rotor ของเครื่องภายใต้การควบคุมอุณหภูมิของขึ้นทดสอบ มักวัดความหนืดในรูปของ Mooney viscosity ML (1+4) 100 °C (M = Mooney, L = Large rotor, 1 = preheat time (min), 4 = ระยะเวลาการหมุนของ rotor ก่อนทำการอ่านค่าความหนืดและวัดที่ 100 °C

2.10 การทดสอบยาง

การทดสอบที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมยางแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่ การทดสอบคุณภาพยางดิบ การทดสอบสมบัติในกระบวนการผลิต (processibility) และการทดสอบสมบัติของยางที่คงรูปแล้ว (vulcanizate properties)

1. การทดสอบคุณภาพของยางดิบ

จะทดสอบสมบัติทางกายภาพของยางส่วนใหญ่ถ้าป็นยางธรรมชาติจะมีการทดสอบสิ่งเจือปน ความชื้น และสารประกอบบางอย่างเช่น ไนโตรเจน พวงแฉ่ง ความอ่อนตัวและดัชนีความอ่อนตัวของยาง (plasticity and plasticity retention index) ค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) ส่วนยางสังเคราะห์มักทดสอบค่าความหนืดมูนนี่

2. การทดสอบสมบัติในกระบวนการผลิต

สมบัติที่จำเป็น ได้แก่ ความนิ่ม-แข็งของยาง ซึ่งแสดงในรูปของค่าความหนืดมูนนี่ กรณีที่ต้องการศึกษาการไหล (rheology) ก็ต้องใช้เครื่อง capillary rheometer ในการศึกษาลักษณะการคงรูปของยางก็จะวัดโดยใช้เครื่อง oscillating disc rheology หรือ moving die rheology เป็นต้น

3. การทดสอบสมบัติของยางคงรูป

สมบัติพื้นฐานของยางคงรูปที่ต้องทดสอบ ได้แก่ สมบัติการดึงยาง (tensile properties) เช่น ค่าความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ค่าโมดูลัส (modulus) และค่าความยืดสูงสุด (elongation at break) สมบัติการทนทานต่อการฉีกขาด (tear strength) ความแข็ง (hardness) การหักงอ (flex cracking) การล้าตัว (fatigue) การต้านทานโอโซน (ozone resistance) การกระเด็น (rebound resilience) ความทนทานต่อการขัดสี (abrasion resistance) การยุบตัว (compression set) การเกิดความร้อนสะสม (heat build-up) เป็นต้น

2.10.1 การทดสอบการหาอุณหภูมิและเวลาคงรูปของยาง

2.10.1.1 เครื่องหาอุณหภูมิและเวลาคงรูปของยาง

เมื่อก้าวถึงเครื่องจักรและเครื่องมือที่ใช้ในอุตสาหกรรมยางจะพบว่ามียู่มากมายหลายชนิดเครื่องจักรและเครื่องมือเหล่านั้นต่างก็มีความสำคัญและมีความจำเป็นในแต่ละขั้นตอนการทำผลิตภัณฑ์ยาง แต่เครื่องจักรและเครื่องมือบางอย่างก็เหมาะในการทำผลิตภัณฑ์ยางบางชนิดเท่านั้น เช่น ผลิตภัณฑ์ท่อยาง ผลิตภัณฑ์ยางรถยนต์ ผลิตภัณฑ์ยางสำหรับยางเชิงวิศวกรรม ก็ใช้เครื่องจักรและเครื่องมือบางชนิดที่เหมือนกันและแตกต่างกันออกไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของผลิตภัณฑ์นั้นถึงแม้ว่าโรงงานอุตสาหกรรมยางจะทำผลิตภัณฑ์ยางที่มีลักษณะแตกต่างกันดังที่กล่าวข้างต้น แต่ทุกโรงงานมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการหาอุณหภูมิและเวลาคงรูปของยาง (Rheometer)

เครื่องหาอุณหภูมิและเวลาคงรูปของยาง เป็นเครื่องมือและเวลาที่ใช้สำหรับการทำให้ยางคงรูป (Vulcanize หรือ Cure) มีประโยชน์มากเพราะทำให้โรงงานรู้ถึงเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำผลิตภัณฑ์ ไม่ว่าจะเป็นผลิตภัณฑ์ยางชนิดยางชนิดใดหรือมีสูตรการผลิตที่สูตรก็ตาม ทั้งนี้เพื่อให้ผลิตภัณฑ์นั้นมีคุณภาพดี ใช้งานทนทานและเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด ยิ่งไปกว่านั้น การรู้ถึงเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำผลิตภัณฑ์ยังก่อให้เกิดการประหยัดค่าใช้จ่าย ลดความเสียหายและลดการสูญเสียชิ้นงานให้น้อยที่สุด นอกจากนั้นเครื่องหาอุณหภูมิและเวลาคงรูปของยาง ยังช่วยให้โรงงานสามารถพัฒนาสูตรใหม่ๆ เพื่อพัฒนาคุณภาพผลิตภัณฑ์ให้ดียิ่งขึ้นหรือพัฒนาให้เกิดผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ ได้อีกด้วย

ในปัจจุบันเครื่องหาอุณหภูมิและเวลาคงรูปของยางที่นิยมใช้งานมีอยู่ 2 แบบ คือ

แบบที่ 1 Oscillating Disk Rheometer (ODR) ที่ต้องใช้การหมุนของ Rotor เป็นส่วนสำคัญในการทำงาน

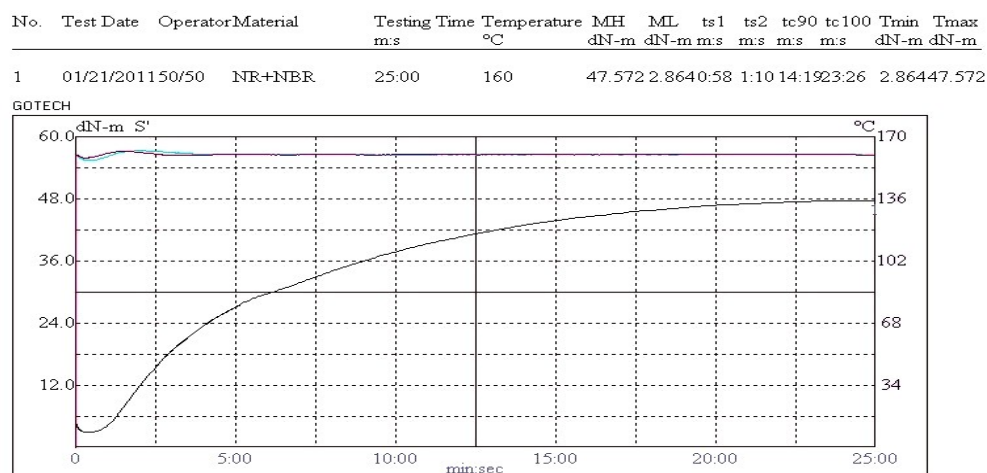
แบบที่ 2 Moving Die Rheometer (MDR) ที่ไม่ต้องใช้ Rotor แต่ใช้การเคลื่อนไหวกว้างของ Die เป็นหลักในการทำงาน



รูปที่ 2.11 แสดงเครื่อง Moving Die Rheometer(MDR)

2.10.1.2 การอ่าน และการแปลผลการกราฟ

โดยทั่วไปในการพัฒนาสูตรยางที่จะนำไปทำผลิตภัณฑ์ยางนั้นจะต้องนำยางไปหาอุณหภูมิและเวลาการรูปที่เหมาะสมในการผลิตเชิงพาณิชย์ ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้เครื่องหาอุณหภูมิและเวลาการรูปของยาง ผลการวิเคราะห์แสดงออกมาในลักษณะเป็นกราฟ ดังรูป 2.12



รูปที่ 2.12 กราฟแสดงผลการทดสอบจากเครื่อง MDR

คำอธิบาย

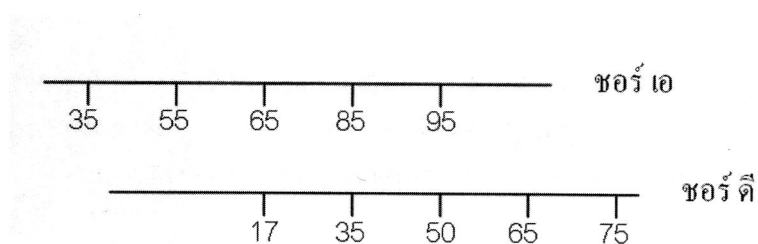
S'	=	กราฟของทอร์กของความยืดหยุ่น (torque of elasticity) กับเวลา
S''	=	กราฟของทอร์กของความหนืด (torque of viscosity) กับเวลา
Temp	=	อุณหภูมิที่ยางเกิดปฏิกิริยาการรูป หรือ อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ
ML	=	Lowest modulus of elasticity
	=	ค่าที่อวกที่ความยืดหยุ่นต่ำสุด (minimum torque of elasticity)
MH	=	Highest modulus of elasticity
	=	ค่าที่อวกที่ความยืดหยุ่นสูงสุด (Maximum torque of elasticity)
TD@ML	=	Tan delta at ML (อัตราส่วนของ S'' / S' ที่ ML)
TD@MH	=	อัตราส่วนของ S'' / S' ที่ MH
Ts1	=	Scorch time 1 (เวลาที่ยางเริ่มเกิดปฏิกิริยาการรูป จุดที่ 1)
Ts2	=	Scorch time 2 (เวลาที่ยางเริ่มเกิดปฏิกิริยาการรูป จุดที่ 2)
Tc10	=	เวลาที่ยางเกิดปฏิกิริยาการรูปไป 10%
Tc50	=	เวลาที่ยางเกิดปฏิกิริยาการรูปไป 50%
Tc90	=	เวลาที่ยางเกิดปฏิกิริยาการรูปไป 90%
CRI	=	ดัชนีอัตราเร็วในการการรูป (Cure rate index), $100/(t_{c90}-ts1)$

2.10.2 การทดสอบวัดความแข็ง (Hardness Test)

ความแข็งเป็นสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของยางซึ่งมักจะใช้ร่วมกับสมบัติแรงดึงในการกำหนดคุณภาพของยาง ความแข็งจะแตกต่างจากความแข็งเกร็ง (stiffness) เพราะความแข็งเป็นการวัดความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเฉพาะที่บริเวณพื้นผิวเท่านั้น แต่ความแข็งเกร็งเป็นการวัดความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยางทั้งก้อน หลักการพื้นฐานของการวัดค่าความแข็งก็คือจะนำหัวกด (indenter) ไปกดลงบนชิ้นทดสอบภายใต้สภาวะที่กำหนด ความลึกของการทะลุทะลวงของหัวกด (depth of penetration) จะสะท้อนถึงค่าความแข็งของยางเพราะยางที่มีความแข็งสูงก็就会有ความลึกของการทะลุทะลวงต่ำ

เครื่องวัดความแข็งที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง มี 2 แบบ คือ เครื่องดูโรมิเตอร์ (durometer) ซึ่งมีหลายแบบ เช่น แบบชอร์ เอ (shore A) และแบบชอร์ ดี (shore D) และเครื่องวัดความแข็งในหน่วยของ IRHD (International Rubber Hardness Degree) เนื่องจากเครื่องดูโรมิเตอร์ส่วนใหญ่ใช้แรงกดจากสปริงจึงมีความแม่นยำต่ำกว่าเครื่องวัดความแข็งในหน่วย IRHD ซึ่งใช้น้ำหนักที่คงที่เป็นตัวกด อย่างไรก็ตาม เครื่องดูโรมิเตอร์ก็ยังเป็นเครื่องที่นิยมใช้กันมากที่สุดในโรงงานอุตสาหกรรมเนื่องจากตัวเครื่องมีราคาค่อนข้างต่ำ

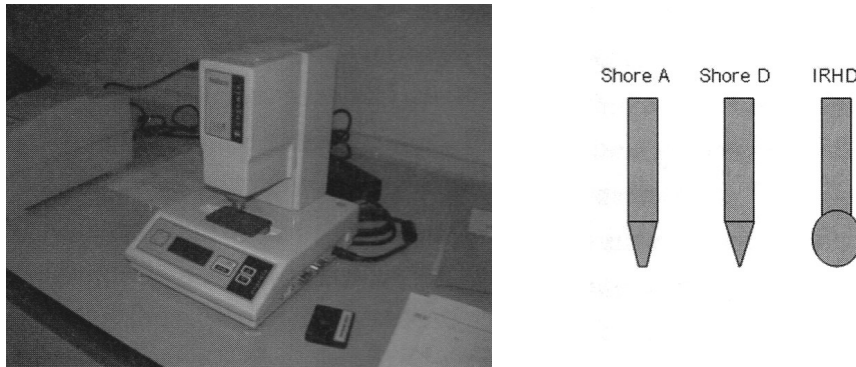
เครื่องดูโรมิเตอร์แบบชอร์ เอ นิยมใช้วัดความแข็งสำหรับยางทั่วไปที่มีความแข็งต่ำกว่า 90 ชอร์เอ แต่สำหรับยางที่มีความแข็งสูงกว่านี้ก็จะนิยมใช้เครื่องมือวัดแบบชอร์ ดี รูปที่ 2.13 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งระหว่างชอร์ เอ และชอร์ ดี อย่างไรก็ตามผู้ทดสอบควรตระหนักไว้เสมอว่าค่า 100 ชอร์เอ เท่ากับค่า 100 ชอร์ ดี ดังนั้นสเกลจาก 95 - 100 ชอร์เอ จึงเทียบเท่ากับสเกลจาก 50 - 100 ของชอร์ ดี



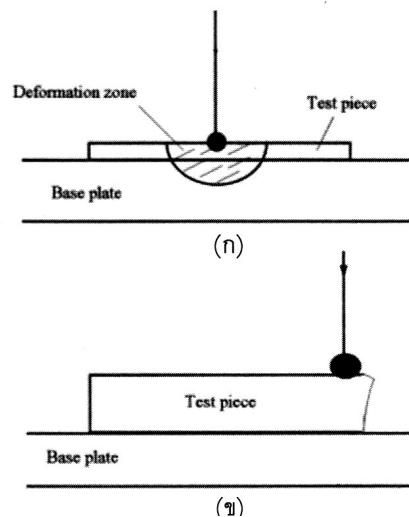
รูปที่ 2.13 แสดงการเปรียบเทียบสเกลความแข็งของชอร์ เอ และ ชอร์ ดี [2]

รูปที่ 2.14 แสดงตัวอย่างเครื่องวัดความแข็งแบบตั้งโต๊ะพร้อมทั้งลักษณะของหัวกดชนิดต่าง ๆ ชิ้นทดสอบที่นำมาทดสอบควรมีผิวแบนเรียบทั้งด้านบนและด้านล่างและพื้นที่ทั้งสองต้องขนานกัน ค่าความแข็งที่อ่านได้จะขึ้นอยู่กับขนาดของชิ้นทดสอบโดยเฉพาะความหนาเพราะถ้าชิ้นทดสอบบางมากเกินไปจะทำให้ผลการวัดที่ได้มีความผิดพลาดสูง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อกดหัวกดลงบนชิ้นทดสอบ ยางที่อยู่ในบริเวณรอบ ๆ จุดที่ถูกกดจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเพื่อตอบสนองต่อแรงกด

(เป็นรัศมีรูปครึ่งวงกลมดังแสดงในรูปที่ 2.15) หากขึ้นตัวอย่างบางมากเกินไป การตอบสนองต่อแรงกดก็จะไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะจากยางเท่านั้น แต่จะรวมการตอบสนองที่เกิดจากฐานกดซึ่งเป็นโลหะที่มีความแข็งแรงมาก ๆ เข้าไปด้วย ในกรณีเช่นนี้ยางก็就会有ความต้านทานต่อการทะลุทะลวงของหัวกดสูงกว่าปกติ ส่งผลให้ค่าความแข็งที่วัดได้มีค่าสูงกว่าความเป็นจริง ในทำนองกลับกัน การวัดค่าความแข็ง ณ บริเวณที่ซิดขอบของชิ้นทดสอบมากเกินไปก็จะส่งผลทำให้ค่าความแข็งที่วัดได้มีค่าต่ำกว่าความเป็นจริงเพราะยางสามารถยุบตัวหรือเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ง่าย ณ บริเวณขอบ



รูปที่ 2.14 แสดงเครื่องวัดความแข็งและลักษณะของหัวกดแบบต่างๆ



รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะการตอบสนองต่อแรงกดของชิ้นทดสอบในกรณีที่
(ก) ชิ้นทดสอบบางมากเกินไป (ข) ทำการวัดซิดขอบของชิ้นทดสอบมากเกินไป

สำหรับการวัดค่าความแข็งโดยเครื่องคูโรมิเตอร์ (ในหน่วยชอร์) มาตรฐาน ASTM D 2240 ได้กำหนดไว้ว่าชั้นทดสอบควรมีความหนาอย่างน้อย 6 มม. (ชั้นทดสอบอาจเตรียมจากการนำยางแผ่นเรียบหลาย ๆ แผ่นมาวางซ้อนกันจนได้ความหนาตามต้องการ อย่างไรก็ตาม การเตรียมชั้นทดสอบแบบนี้จะใช้ได้เฉพาะในกรณีที่แผ่นยางทั้งหมดสามารถแนบกันได้สนิทเท่านั้น) และชั้นทดสอบควรมีขนาดทางด้านข้าง (lateral dimensions) ที่สูงเพียงพอที่ทำให้ผู้ทดสอบสามารถวัดความแข็งของยางในบริเวณที่ห่างจากขอบอย่างน้อย 12 มม.ได้ การกดหัวกดลงบนชั้นทดสอบควรกระทำด้วยความรวดเร็ว และต้องออกแรงกดให้มากพอที่จะทำให้ฐานของหัวกดแนบสนิทกับชั้นทดสอบแล้วจึงอ่านค่าความแข็งภายใน 1 วินาทีโดยทั่วไป ผู้ทดสอบควรทำการวัดความแข็งอย่างน้อย 5 จุด บนชั้นทดสอบและรายงานค่าเฉลี่ยที่วัดได้ อย่างไรก็ตาม ผู้ทดสอบควรตระหนักไว้ว่าผลการทดสอบอาจมีการแปรปรวนได้เนื่องจากค่าความแข็งที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือชนิดนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างเช่น ความเร็วของการกดหัวกดลงบนชั้นทดสอบ ระยะเวลาที่อ่านค่าความแข็ง และแรงที่ใช้กดหัวกดเป็นต้น การเพิ่มความเร็วของการกดหัวกดจะทำให้ความแข็งของยางที่วัดได้จากเครื่องมือค่าสูงขึ้น (เช่นเดียวกันกับการกระโดดลงน้ำจากแผ่นกระดานซึ่งผู้กระโดดจะรู้สึกว่ามีน้ำมีความแข็งมากขึ้นหากกระโดดจากที่สูงเพราะความเร็วของผู้กระโดดขณะที่สัมผัสกับน้ำจะสูงขึ้นตามระดับความสูง) ส่วนระยะเวลาที่อ่านค่าความแข็งก็มีผลอย่างมากต่อค่าที่วัดได้เช่นกันเพราะโดยทั่วไปแล้ว การอ่านค่าทันทีหลังจากที่ฐานของหัวกดแนบสนิทกับชั้นทดสอบก็อาจทำให้ค่าที่ได้สูงกว่าการอ่านค่าหลังจากนั้น 2 - 3 วินาที การลดลงของค่าความแข็งตามเวลาจะเกิดขึ้นได้เร็วหรือช้าเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับสมบัติวิสโคอิลาสติกของยาง สำหรับยางที่มีความยืดหยุ่นสูง (มีองค์ประกอบส่วนที่เป็นของแข็งยืดหยุ่นสูง) ค่าความแข็งที่วัดได้ก็จะเปลี่ยนแปลงน้อยมากตามเวลาที่อ่านค่า ส่วนปัจจัยสุดท้ายที่มีผลกระทบต่อความแข็งได้คือแรงที่ใช้ในการกดหัวกด ในเชิงทฤษฎีแล้ว มาตรฐานที่ใช้ในการกดควรมีค่าสูงเพียงพอที่จะทำให้ฐานของหัวกดแนบกันสนิทกับชั้นทดสอบ แต่ในทางปฏิบัติแล้ว ผู้ทดสอบแต่ละคนก็จะออกแรงกดแตกต่างกันทำให้เกิดความแปรปรวนของค่าที่อ่านได้เพราะแรงกดที่สูงก็อาจจะทำให้ค่าที่อ่านได้สูงตามไปด้วย ดังนั้นมาตรฐาน ASTM จึงได้เสนอแนะให้นำน้ำหนักมาตรฐานไปวางไว้ที่ตรงกลางของแกนหัวกดเพื่อลดความแปรปรวนของการทดสอบที่อาจเกิดขึ้น ซึ่งน้ำหนักมาตรฐานที่แนะนำคือ 1 กิโลกรัมสำหรับการทดสอบในหน่วยชอร์ เอ และ 5 กิโลกรัมสำหรับการทดสอบในหน่วยชอร์ ดี

สำหรับการวัดความแข็งในหน่วย IRHD มาตรฐาน ASTM D 1415 ได้กำหนดไว้ว่าชั้นทดสอบควรมีขนาดทางด้านข้างไม่น้อยกว่า 20 มม. และมีความหนาไม่ต่ำกว่า 4 มม. (นิยมเตรียมชั้นทดสอบที่มีความหนาประมาณ 8 - 10 มม.) ในบางกรณีผู้ทดสอบอาจนำยางผิวเรียบสองชั้นมาวางประกบกันเพื่อทำให้ได้ชั้นทดสอบที่มีความหนาตามต้องการได้ อย่างไรก็ตาม หากจำเป็นต้องวัดความแข็งของชั้นทดสอบที่บางมาก ๆ หรือชั้นทดสอบที่มีความหนาสูงกว่า 4 มม. แต่มีขนาดทางด้านข้างต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนดหรือชั้นทดสอบที่ไม่มีผิวแบนราบเช่นยางโอริง เป็นต้น ผู้ทดสอบควรใช้เครื่องวัด

ขนาดเล็กที่เรียกว่า micro IRHD instrument แทน โดยทั่วไปการวัดความแข็งในหน่วย IRHD จะทำการวัด 3 หรือ 5 จุดบนชิ้นทดสอบและรายงานค่ากลาง

การวัดค่าความแข็งควรวัดที่อุณหภูมิห้อง (ในช่วง 23 ± 2 °C) และในการรายงานผลการทดสอบนั้นควรมีการระบุขนาดของชิ้นทดสอบ ชนิดของเครื่องมือที่ใช้ อุณหภูมิ และลักษณะของพื้นผิว (เช่น ได้จากการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์หรือได้จากการขัดผิวให้เรียบ) เป็นต้น สำหรับค่าความแข็งที่วัดได้จากชิ้นทดสอบที่ไม่ได้มาตรฐานเรียกว่าค่าความแข็งปรากฏ (apparent hardness) ส่วนค่าความแข็งที่วัดได้จากชิ้นทดสอบมาตรฐานเรียกว่าค่าความแข็งมาตรฐาน (standard hardness) ค่าความแข็งปรากฏของยางชนิดเดียวกันอาจมีค่าต่างกันขึ้นอยู่กับรูปร่างและความหนา ส่วนค่าความแข็งที่วัดได้จากพื้นผิวโค้งเช่น ขางโอริง จะเป็นค่าเฉพาะที่ใช้กับชิ้นส่วนนั้น ๆ เท่านั้น ซึ่งค่าที่อ่านได้อาจจะแตกต่างจากค่าความแข็งมาตรฐานมากถึง 10 IRHD หรืออาจมากกว่านั้น

2.10.3 การทดสอบสมบัติแรงดึง (Testing of Tensile Properties)

สมบัติแรงดึงที่นิยมใช้ในการควบคุมคุณภาพของยางได้แก่ ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) และ โมดูลัส (Modulus) มาตรฐานที่ใช้ทดสอบสมบัติแรงดึงมีหลายแบบได้แก่ มาตรฐาน ASTM D 412 มาตรฐาน ISO 37 มาตรฐาน BS 903 Part A2 และมาตรฐาน DIN 53504

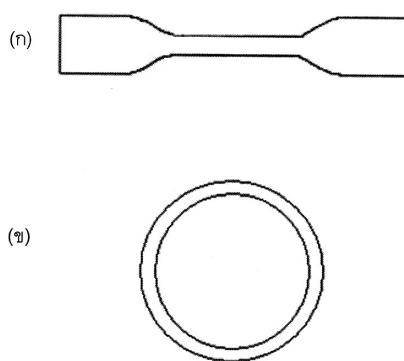
สมบัติแรงดึงของยางสามารถวัดได้โดยการดึงชิ้นทดสอบมาตรฐานจนขาดด้วยอัตราเร็วในการดึงคงที่ (มาตรฐาน ASTM D 412 ได้กำหนดอัตราเร็วในการดึงเท่ากับ 500 ± 50 มิลลิเมตรต่อนาที) เครื่องที่ใช้ทดสอบส่วนใหญ่จะเรียกว่าเครื่อง Universal Testing Machine หรือ Tensile Testing Machine (ดูรูปที่ 2.16 ประกอบ) ในระหว่างการดึงเครื่องจะทำการวัดและบันทึกค่าแรงดึงที่เปลี่ยนไปตามระยะการยืดตัวของยางแล้วนำค่าที่วัดได้ไปคำนวณและพล็อตเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด พร้อมทั้งคำนวณหาค่าความทนทานต่อแรงดึง การยืด ณ จุดขาดและค่าโมดูลัสที่ความเครียดต่าง ๆ



รูปที่ 2.16 แสดงรูปร่างเครื่อง Universal Testing Machine

โดยทั่วไปชิ้นทดสอบที่จะนำมาทดสอบควรได้รับการคงรูปมาแล้วไม่น้อยกว่า 16 ชั่วโมงเพื่อให้แน่ใจว่าชิ้นทดสอบนั้นได้รับการคงรูปอย่างสมบูรณ์แล้ว อย่างไรก็ตามไม่ควรเก็บชิ้นทดสอบไว้นานเกิน 28 วันหลังการคงรูป (ยกเว้นในกรณีเตรียมชิ้นทดสอบจากผลิตภัณฑ์) สำหรับรูปร่างของชิ้นทดสอบมาตรฐานสามารถแบ่งออกได้เป็นสองแบบคือ รูปคัมเบลล์และรูปวงแหวน ดังแสดงในรูปที่ 2.17

ชิ้นทดสอบรูปคัมเบลล์ควรได้จากการขึ้นรูปด้วยการฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์หรือการตัดจากยางแผ่นเรียบที่มีความหนาในช่วง 1.3 - 3.3 มิลลิเมตรโดยยางแผ่นเรียบนี้อาจได้มาจากการเตรียมโดยตรงจากการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์หรืออาจได้จากการนำผลิตภัณฑ์ยางมาตัดให้เป็นแผ่นและขัดผิวให้เรียบ ซึ่งในกรณีหลังนี้ผู้ทดสอบต้องแน่ใจว่าชิ้นทดสอบที่เตรียมได้ต้องมีพื้นผิวที่เรียบและไม่มีชิ้นผ้าใบอยู่ภายใน หากทำการเตรียมยางแผ่นเรียบโดยใช้วิธีตามมาตรฐาน ASTM Practice D 3182 ชิ้นทดสอบควรมีความหนาในช่วง 2 ± 0.2 มิลลิเมตร และในระหว่างทำการตัดชิ้นทดสอบด้วยด้ายรูปคัมเบลล์ ผู้ตัดควรตัดยางให้ขาดด้วยการกดด้ายเพียงครั้งเดียว (single impact stroke) ทั้งนี้เพื่อให้พื้นผิวที่เกิดจากการตัดเรียบปราศจากรอยตำหนิ (พื้นผิวที่ไม่เรียบหรือมีรอยขีดข่วนเพียงเล็กน้อยจะทำให้ความทนทานต่อแรงดึงที่วัดได้มีค่าต่ำกว่าความเป็นจริง) นอกจากนี้ผู้ตัดต้องแน่ใจว่าได้ทำการตัดชิ้นทดสอบตามแนวความยาวในทิศที่ขนานกับทิศที่ออกมาจากเครื่องรีดแบบสองลูกกลิ้ง เพราะการตัดชิ้นทดสอบในแนวที่ตั้งฉากกับทิศทางที่ยางไหลออกมาจากลูกกลิ้งจะทำให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงที่วัดได้มีค่าต่ำกว่าความเป็นจริง ส่วนการวัดความหนาของชิ้นทดสอบนั้น มาตรฐาน ASTM D 412 ได้กำหนดให้ทำการวัดความหนา 3 จุดคือ ที่บริเวณกึ่งกลางและที่บริเวณปลายทั้งสองด้านของคอดัมเบลล์ จากนั้นก็นำค่ากลางไปใช้ในการคำนวณหาพื้นที่หน้าตัด อย่างไรก็ตาม ผู้ทดสอบไม่ควรนำชิ้นทดสอบที่มีค่าความหนาต่ำสุดและสูงสุดต่างกันเกิน 0.08 มิลลิเมตร มาใช้ในการทดสอบ

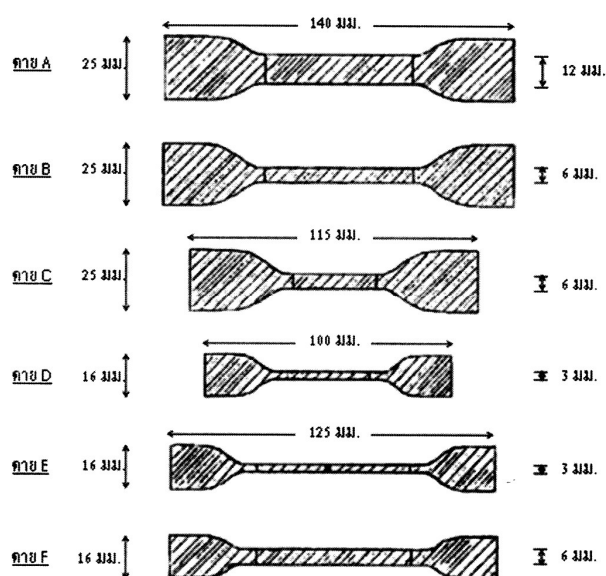


รูปที่ 2.17 แสดงรูปร่างของชิ้นทดสอบสำหรับการทดสอบสมบัติแรงดึง

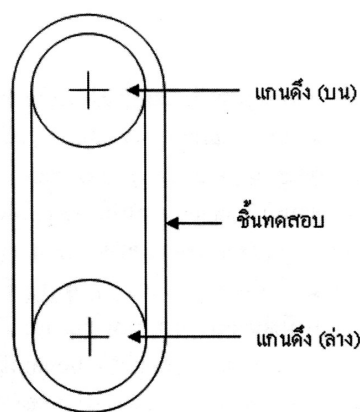
(ก) รูปคัมเบลล์ และ (ข) รูปวงแหวน

สำหรับการทดสอบเพื่อควบคุมคุณภาพนั้น โดยทั่วไปควรทำการทดสอบ 3-5 ซ้ำและรายงานค่ากลาง (Median) แต่สำหรับการวิจัยแล้วนิยมทำการทดสอบอย่างน้อย 5 ซ้ำและรายงานค่าเฉลี่ย (Mean) พร้อมทั้งค่าการเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

เนื่องจากชิ้นทดสอบมาตรฐานนั้นมีหลายขนาดให้ผู้ทดสอบได้เลือกใช้เช่น มาตรฐาน ASTM ได้แบ่งชิ้นงานทดสอบรูปดัมเบลล์ออกเป็น 6 ขนาดตั้งแต่ตาย เอ ถึงตาย เอฟ (รูปที่ 2.18 ประกอบ) และแบ่งชิ้นทดสอบรูปวงแหวนออกเป็น 2 ขนาดคือขนาดเล็ก (Type 1) ซึ่งมีเส้นรอบวงภายในเท่ากับ 50 มิลลิเมตรและขนาดใหญ่ (Type 2) ซึ่งมีเส้นรอบวงภายในเท่ากับ 100 มิลลิเมตรเป็นต้น ดังนั้นหากผู้ทดสอบต้องการเปรียบเทียบสมบัติแรงดึงของยางก็ควรเลือกใช้ชิ้นทดสอบที่มีรูปร่างและขนาดเท่ากันเพราะเป็นที่ทราบกันดีว่าทั้งขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบล้วนแล้วแต่มีผลต่อค่าที่วัดได้ทั้งสิ้น โดยทั่วไปค่าความทนทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มลดลงเมื่อพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบสูงขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นยังพบว่าชิ้นทดสอบรูปวงแหวนจะให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงต่ำกว่าชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ ทั้งนี้เนื่องจากว่าในระหว่างการดึงชิ้นทดสอบรูปวงแหวนนั้นความเค้นและความเครียดของยางจะกระจายตัวไม่สม่ำเสมอบนพื้นที่หน้าตัดของยางเพราะค่าเหล่านี้จะสูงสุดที่บริเวณเส้นรอบวงด้านในและจะมีค่าต่ำสุดที่บริเวณเส้นรอบวงด้านนอกด้วยเหตุนี้ชิ้นทดสอบรูปวงแหวนจึงไม่เป็นที่นิยมใช้กันมากนักในห้องปฏิบัติการ อย่างไรก็ตามก็ดีชิ้นทดสอบรูปวงแหวนก็มีข้อดีเหนือชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์คือไม่ก่อให้เกิดปัญหาการลื่นไถล (slip) ของชิ้นทดสอบในระหว่างการดึงเพราะชิ้นทดสอบจะถูกคล้องเข้ากับแกนของเครื่องดึง อีกทั้งยังสามารถวัดระยะของการดึงหรือวัดความเครียดได้โดยตรงจากระยะห่างระหว่างแกนดึงทั้งสองดังแสดงในรูป 2.19



รูปที่ 2.18 แสดงรูปร่างของชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์แบบต่างๆ ตามมาตรฐาน ASTM D412



รูปที่ 2.19 แสดงลักษณะการดึงขึ้นทดสอบแบบวงแหวน

อัตราเร็วในการดึงขาก็เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อค่าที่วัดได้ โดยทั่วไปการเพิ่มอัตราเร็วในการดึงจะส่งผลทำให้ยางมีค่าการยืดตัว ณ จุดขาดลดลง มีค่าโมดูลัสสูงขึ้น ในขณะที่ค่าความทนทานต่อแรงดึงอาจสูงขึ้นหรือลดลงก็ได้ นอกจากนี้ทิศทางการจัดเรียงตัวของโมเลกุลยางที่เกิดขึ้นในขณะที่ยางถูกรีดผ่านเครื่องรีดแบบสองลูกกลิ้งก็มีผลต่อสมบัติแรงดึงของยางด้วยเช่นกัน โดยพบว่าถ้าทำการทดสอบสมบัติแรงดึงในทิศทางตามแนวการจัดเรียงตัวของโมเลกุลยาง (ขนานกับทิศทางการรีดผ่านลูกกลิ้ง) จะพบว่าความทนทานต่อแรงดึงที่วัดได้จะมีค่าสูงกว่าการทดสอบในทิศทางที่ตั้งฉากกับแนวการจัดเรียงตัวของโมเลกุล ด้วยเหตุนี้ในการเตรียมขึ้นทดสอบควรมีการระบุทิศทางของยางที่ผ่านออกมาจากลูกกลิ้งด้วย เพราะมาตรฐานส่วนใหญ่ได้กำหนดให้ดำเนินการทดสอบสมบัติแรงดึงในทิศทางการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลยาง

ข้อควรระวังของการทดสอบสมบัติแรงดึงก็คือขึ้นทดสอบที่นำมาทดสอบเป็นขึ้นทดสอบที่ไม่เคยได้รับแรงหรือความเค้นจากภายนอกมาก่อน ผู้ทดสอบต้องหลีกเลี่ยงการนำขึ้นทดสอบที่เคยได้รับการดึงมาก่อนมาทำการทดสอบ เพราะการดึงในครั้งแรกและในครั้งถัด ๆ ไปจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่แตกต่างกัน พฤติการณ์ลดลงของค่าความเค้นเมื่อดึงในครั้งหลังเรียกว่า “stress softening”

สมบัติแรงดึงเป็นสมบัติพื้นฐานที่ใช้ในการควบคุมการผลิต เนื่องจากค่าความทนทานต่อแรงดึงเป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงได้ง่ายตามการเปลี่ยนแปลงของยางอันเนื่องมาจากสาเหตุต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการเปลี่ยนสูตรการผสมเคมี หรือการเปลี่ยนแปลงทางกระบวนการผลิต นอกจากนี้สมบัตินี้ยังนิยมใช้เป็นตัวชี้วัดความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมากรังสีต่างๆ เช่น ความร้อน ของเหลว ก๊าซ สารเคมี โอโซน สภาพอากาศ เป็นต้น โดยทั่วไปการทดสอบสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพสามารถกระทำได้โดยการวัดสมบัติแรงดึงของยางทั้งก่อนและหลังการสัมผัสรังสีดังกล่าว ซึ่งถ้าสมบัติแรงดึงเกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยก็แสดงว่ายางมีความทนทานต่อรังสีนั้นได้ดีและยางควรจะมียอายุการใช้งานที่ยาวนานภายใต้รังสีดังกล่าว

2.10.4 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis; TGA)

การวิเคราะห์ด้วย Thermo-gravimetric ใช้การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารเมื่อมีการให้ความร้อนหรือที่อุณหภูมิคงที่เทียบกับอุณหภูมิ ซึ่งมีผลต่อการศึกษาทางด้านเคมีและทางกายภาพที่ปรากฏเนื่องจากการกระทำของอุณหภูมิ TGA สามารถที่จะกำหนดวัสดุที่นำมาใช้ในการผลิต การออกแบบผลิตภัณฑ์และอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์โดยการทดสอบด้วยเวลาสั้น ๆ (< 60 min) ในการทดสอบเริ่มจากการตัดชิ้นงานที่จะนำมาทดสอบให้เป็นชิ้นเล็กๆ (10 mg) ใช้วัดได้ตั้งแต่ในขณะที่น้ำหนักของตัวอย่างชิ้นงานจะแสดงขึ้นมาบนหน้าจอคอมพิวเตอร์อย่างต่อเนื่อง โดย TGA สามารถใช้ในการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

1. การสูญเสียของน้ำ สารละลายหรือพลาสติกไซเซอร์
2. กระบวนการดีคาร์บอเนชัน
3. การไพโรไลซิส
4. การออกซิเดชัน
5. การสลายตัว
6. % ฟิลเลอร์หรือเถ้า
7. % ถ่านโค้กจากตัวเร่งปฏิกิริยา
8. % คาร์บอนในน้ำมัน
9. % การระเหยในสารอินทรีย์



รูปที่ 2.20 แสดงเครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน
(Thermogravimetric Analysis; TGA)

2.10.5 การทดสอบความทนทานต่อความร้อน (Testing of Heat Resistance)

การทดสอบสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนของยางเพียงอย่างเดียวสามารถทำได้โดยดำเนินการทดสอบในสถานะที่ไร้ออกซิเจน เช่น ทดสอบภายใต้สุญญากาศหรือภายใต้ก๊าซเฉื่อย อย่างไรก็ตาม ในการใช้งานจริงนั้น ยางต้องสัมผัสกับทั้งออกซิเจนและความร้อน ซึ่งความร้อนจะเป็นตัวเร่งให้ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับยางได้เร็วยิ่งขึ้น ทำให้ยางเสื่อมสภาพได้เร็วกว่าการทดสอบภายใต้สถานะที่มีความร้อนเพียงอย่างเดียว ด้วยเหตุนี้ การทดสอบสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนของยางจึงนิยมจึงนิยมทำภายใต้บรรยากาศปรกติหรือภายใต้ ออกซิเจน ดังนั้น ผลการทดสอบที่ได้จึงเป็นผลอันเนื่องมาจากทั้งความร้อนและออกซิเจน

วิธีการทดสอบสมบัติความทนทานต่อความร้อนของยางได้แสดงไว้ในมาตรฐาน ISO 188 BS 903: Part A19 DIN 53508 และ ASTM D 572 D 573 และ D 865 แม้ว่าจะมีการทดสอบอยู่หลายวิธีแต่ในภาพรวมแล้วการทดสอบสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลักๆ ได้แก่ การทดสอบสมบัติความทนทานต่อความร้อนภายใต้บรรยากาศปรกติ (ทดสอบโดยใช้เตาอบธรรมดา) และการทดสอบสมบัติความทนทานต่อความร้อนภายใต้แรงดันของออกซิเจน (เรียกว่า oxygen bomb)

สำหรับวิธีการทดสอบแบบใช้เตาอบธรรมดา (ตามมาตรฐาน ASTM D 573 และ ASTM D 865) ชิ้นทดสอบจะถูกอบหรือถูกบ่มแรงที่อุณหภูมิสูงภายใต้บรรยากาศปรกติและภายในระยะเวลาที่กำหนด หลังจากนั้นจึงทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติของยางก่อนทำการอบ การบ่มแรงเพื่อให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพด้วยความร้อนนี้สามารถทำได้โดยใช้เตาอบแบบที่มีช่องอบเดียว (single chamber) หรือใช้เตาอบแบบที่มีหลายช่องอบ (multicell oven) ก็ได้ทั้งนี้การเลือกใช้ชนิดของเตาอบจะขึ้นอยู่กับชนิดของยางที่ทดสอบ กล่าวคือ หากต้องการบ่มแรงยางที่มีสูตรการผสมเคมีคล้ายๆ กัน ก็สามารถใช้เตาอบแบบที่มีช่องอบเดียวได้โดยการนำตัวอย่างยางทั้งหมดไปอบพร้อมกัน แต่หากต้องการบ่มแรงยางที่มีสูตรการผสมเคมีแตกต่างกัน การทดสอบแบบนี้ควรใช้เตาอบที่มีหลายช่องอบเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดการปนเปื้อนอันเกิดจากการแผ่ผ่านของสารเคมีต่างๆ โดยทั่วไปแล้วเตาอบทั้ง 2 แบบควรมีอัตราการหมุนเวียนของอากาศคงที่และที่สำคัญคือชิ้นงานทดสอบต้องสัมผัสกับอากาศร้อนในทุกทิศทาง ภายหลังจากการบ่มแรงเสร็จสิ้นชิ้นทดสอบจะถูกนำออกมาจากตู้อบ ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องและทำการทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นทดสอบดังกล่าวหลังจากการนำชิ้นทดสอบออกจากตู้อบอย่างน้อย 16 ชั่วโมง แต่ไม่เกิน 96 ชั่วโมง โดยทั่วไปผู้ทดสอบมักทำการทดสอบชิ้นทดสอบจำนวน 3 ชิ้นและรายงานค่ากลางที่ได้จากการทดสอบและนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากชิ้นทดสอบที่ไม่ได้รับการบ่มแรง

2.10.6 การทดสอบสมบัติความทนทานต่อของเหลว (Testing of Resistance to Fluids)

วิธีการทดสอบสมบัติความทนทานต่อของเหลวของยางคงรูปได้แสดงไว้ใน ISO 1817 ASTM D 471 และ D 1460 BS 903 : Part 16 และ DIN 53521 หลักการทั่วไปของการทดสอบคือ นำชิ้นทดสอบไปแช่ในของเหลวภายใต้อุณหภูมิและระยะเวลาที่กำหนด จากนั้นก็วัดการบวมพองของยาง (การเปลี่ยนแปลงของปริมาตร) แม้ว่าการวัดการบวมพองจะเป็นดัชนีพื้นฐานที่บ่งบอกถึงความทนทานต่อของเหลวของยางแต่ผู้ทดสอบก็ควรวัดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลอื่นๆ เช่น ความแข็ง ความทนทานต่อแรงดึง เพราะในบางครั้งอาจพบว่ายางเกิดการบวมพองเพียงเล็กน้อยแต่สมบัติเชิงกลต่างๆ ค่อยลงไปมาก

มาตรฐาน ASTM D 471 ได้กำหนดวิธีการทดสอบสมบัติความทนทานต่อของเหลว โดยเสนอแนะให้เลือกทำการทดสอบที่อุณหภูมิและระยะเวลาทดสอบตามที่แสดงในตารางที่ 2.6 ผู้ทดสอบควรเลือกอุณหภูมิที่จะทดสอบให้สอดคล้องกับสภาวะการใช้งานจริงของยาง ส่วนระยะเวลาที่ควรเลือกใช้นั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ธรรมชาติของยาง อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ รวมถึงชนิดของของเหลวที่นำมาใช้ในการทดสอบอีกด้วย

ตารางที่ 2.7 อุณหภูมิและระยะเวลาในการแช่ที่เสนอแนะโดยมาตรฐาน ASTM D 471

อุณหภูมิ (°C)	ระยะเวลาในการแช่ (ชั่วโมง)
-75 ± 2, -55 ± 2, -40 ± 2, -25 ± 2, -10 ± 2, 0 ± 2, 23 ± 2,	22, 46, 70, 166, 670
50 ± 2, 70 ± 2, 85 ± 2, 100 ± 2, 125 ± 2, 150 ± 2, 175 ± 2,	
200 ± 2, 225 ± 2, 250 ± 2	

ตารางที่ 2.8 น้ำมัน ASTM เกรดต่าง ๆ

สมบัติ	ASTM oil NO. 1	ASTM oil NO. 2	ASTM oil NO. 3	ASTM oil NO. 5
Aniline point, °C	124.0 ± 1.0	93.0 ± 3.0	70.0 ± 1.0	115.0 ± 1.0
Kinematic viscosity, Mm ² /s (cSt)	18.7 – 21.0 ^a	19.2 – 21.5 ^a	31.9 -34.1 ^b	10.78 – 11.88 ^a
Flash point min, °C	243	240	163	243.0

^a ทำการวัดที่อุณหภูมิ 99 °C

^b ทำการวัดที่อุณหภูมิ 37.8 °C

โดยทั่วไปการทดสอบสมบัติความทนทานต่อของเหลวของยางสามารถทำได้หลายวิธี แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะวิธีการอย่างง่ายและพบได้บ่อยในห้องปฏิบัติการเท่านั้น อันได้แก่

1. การวัดการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักหรือปริมาตร

ขั้นตอนสำหรับการวัดการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักหรือปริมาตรจะมีรูปร่างเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาด 25×50×2 มิลลิเมตร เมื่อเตรียมชิ้นงานทดสอบจำนวน 3 ชิ้นต่อ 1 ตัวอย่างเรียบร้อยแล้ว ก็จะนำชิ้นทดสอบไปแช่น้ำหนักหรือวัดปริมาตรโดยอาศัยหลักการแทนที่น้ำ จากนั้นก็นำชิ้นทดสอบไปจุ่มลงในหลอดทดลอง (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและความสูงเท่ากับ 38 และ 300 มิลลิเมตร ตามลำดับ) ที่มีของเหลวหรือน้ำมันบรรจุอยู่ 100 มิลลิลิตร ผู้ทดสอบต้องทำการแยกชิ้นทดสอบทั้ง 3 ชิ้นให้ห่างจากกันประมาณ 6 มิลลิเมตร ด้วยลูกแก้วกลม จากนั้นก็ทำการปิดฝาหลอดทดลองด้วยจุกขวด ถ้าหากของเหลวที่ใช้ในการทดสอบสามารถระเหยได้ง่ายหรือกรณีที่ทำการทดสอบกับน้ำมัน ASTM ที่อุณหภูมิสูง ($\geq 125^{\circ}\text{C}$) ผู้ทดสอบต้องติดตั้งควบแน่น (air-cooled reflux condenser) เข้าไปด้วยที่หลังจากที่ปิดฝาหลอดทดลองแล้วก็นำชุดทดสอบไปปรับสภาวะที่อุณหภูมิและเวลาตามที่กำหนด เมื่อปรับสภาวะเรียบร้อยแล้ว ก็นำชิ้นทดสอบออกจากหลอดทดลอง (หากทำการทดลองที่อุณหภูมิสูง ต้องทำให้ชิ้นทดสอบเย็นลงก่อนโดยการย้ายชิ้นทดสอบไปแช่ในของเหลวที่เย็นเป็นระยะเวลา 30 ถึง 60 นาที) จากนั้นก็นำชิ้นทดสอบไปจุ่มในอะซิโตนและเช็ดด้วยกระดาษกรองก่อนที่จะนำไปชั่งน้ำหนักหรือวัดปริมาตรต่อไป ผลการทดสอบนิยมแสดงในรูปของร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักหรือปริมาตรดังแสดงในสมการข้างล่าง

$$\text{ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก (\%)} = [(M_2 - M_1) / M_1] \times 100$$

$$\text{ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของปริมาตร (\%)} = [(V_2 - V_1) / V_1] \times 100$$

เมื่อ M_1 คือ น้ำหนักของชิ้นทดสอบก่อนแช่ในของเหลว

M_2 คือ น้ำหนักของชิ้นทดสอบหลังแช่ในของเหลว

V_1 คือ ปริมาตรของชิ้นทดสอบก่อนแช่ในของเหลว

V_2 คือ ปริมาตรของชิ้นทดสอบหลังแช่ในของเหลว

2. การวัดการเปลี่ยนแปลงของความทนทานต่อแรงดึงการยืดตัวและความแข็ง

ชิ้นทดสอบที่ใช้ในกรณีนี้จะมีลักษณะเป็นรูปคัมเบลล์ ดายซี ตามมาตรฐาน ASTM D412 ผู้ทดสอบต้องเตรียมชิ้นทดสอบจำนวน 2 ชุด โดยชิ้นทดสอบชุดแรกจะถูกนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลก่อนที่จะแช่ในของเหลว ในขณะที่ชิ้นทดสอบชุดที่ 2 จะถูกนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลหลังการแช่ในของเหลว และนำผลการทดสอบที่ได้ทั้งก่อนและหลังการแช่มาเปรียบเทียบกัน วิธีการแช่ชิ้นทดสอบลงในของเหลวจะเหมือนกันกับการทดสอบการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักหรือปริมาตร แต่การทดสอบในกรณีนี้จะใช้ของเหลวในปริมาณที่สูงกว่าคือใช้ของเหลวในปริมาณ 150 มิลลิลิตร ผู้ทดสอบต้องทำการวัดความหนาของชิ้นทดสอบก่อนการแช่ ทั้งนี้เพราะการทดสอบสมบัติแรงดึงหลังการแช่จะคำนวณสมบัติแรงดึงโดยใช้ความหนาของชิ้นทดสอบก่อนการแช่

2.10.7 การทดสอบสมบัติของยางแบบหมุน (rotation)

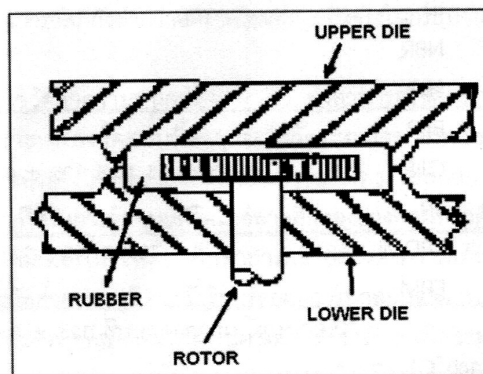
เครื่องมือที่ใช้วัดความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยางที่เป็นแบบหมุนจะเรียกว่า “เครื่องพลาสติกมิเตอร์แบบหมุน (rotation plastimeter)” หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า “เครื่องมูนนี่วิสโคมิเตอร์ (Mooney viscometer)” (ดูรูปที่ 2.21) ค่าที่แสดงถึงความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยางที่วัดได้จากเครื่องมือประเภทนี้จะแสดงในรูปของความหนืด กล่าวคือยางที่มีความหนืดสูงก็จะมีสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างต่ำ ในทำนองกลับกัน ยางที่มีความหนืดต่ำก็จะมีสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูง ด้วยเหตุนี้ ยางที่มีความหนืดต่ำจึงไหลได้ง่ายทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปได้โดยง่าย วิธีการทดสอบวัดค่าความหนืดของยางได้แสดงไว้ในมาตรฐาน ASTM D 1646 ISO R289 BS903:Part A58 และ DIN 53523-3



รูปที่ 2.21 แสดงเครื่องทดสอบ Mooney viscometer

รูปที่ 2.22 แผนผังของเครื่องมูนนี่วิสโคมิเตอร์ จากรูปจะเห็นได้ว่าตัวเครื่องประกอบด้วยโรเตอร์ (rotor) ที่หมุนอย่างช้าๆ อยู่ภายในช่องว่างระหว่างคายที่ร้อน 2 อัน คือ คายบน (upper die) และคายล่าง (lower die) สำหรับขั้นตอนในการวัดความหนืดของยางด้วยเครื่องมูนนี่วิสโคมิเตอร์สามารถสรุปได้คร่าวๆดังนี้ ในขั้นแรกผู้ทดสอบจะนำตัวอย่างยางที่ผ่านการรีดให้เป็นแผ่นเรียบแล้วมาประมาณ 27 ± 3 กรัม (หากยางมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่า 1.1 ก็จำเป็นต้องปรับน้ำหนักของตัวอย่างยางให้สูงขึ้น) จากนั้นก็ตัดให้เป็นแผ่นกลมจำนวน 2 แผ่นที่มีขนาดพอดีกับเบ้าของคาย (die cavity) ซึ่งโดยทั่วไปแผ่นตัวอย่างยางจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 47 มิลลิเมตร หลังจากที่ยางและโรเตอร์มีอุณหภูมิเท่ากับค่าที่ตั้งไว้แล้วก็ดึงโรเตอร์ออกมาและนำแผ่นตัวอย่างยางแผ่นแรกไปวางไว้ด้านล่างของโรเตอร์โดยเสียบเข้ากับแกนของโรเตอร์ จากนั้นจึงนำโรเตอร์ใส่กลับเข้าไปที่ตำแหน่งเดิมของเครื่องและนำแผ่นตัวอย่างยางแผ่นที่สองไปวางไว้ด้านบนของโรเตอร์ เมื่อกดปุ่มเริ่มทดสอบ คายบนก็จะเลื่อนลงมาประกบกับคายล่าง ความดันที่เกิดขึ้นจะบังคับให้ตัวอย่างยางไหลจนเต็มเบ้าของคาย

หลังจากที่ให้ความร้อนแก่ยางประมาณ 1 นาทีเพื่อให้ยางมีอุณหภูมิเท่ากับค่าที่ตั้งไว้ โรเตอร์ก็จะหมุนทำให้เกิดแรงเฉือนระหว่างพื้นผิวของโรเตอร์และพื้นผิวของคาน ความหนืดของยางจะสัมพันธ์โดยตรงกับแรงที่ใช้ในการหมุนโรเตอร์โดยมีหน่วยเป็น “Mooney unit (MU)”



รูปที่ 2.22 แผนผังของเครื่องมือวัดความหนืด

โดยทั่วไป การทดสอบค่าความหนืดนี้ตามมาตรฐานสากลจะมีการกำหนดสภาวะของการทดสอบดังนี้ ความเร็วรอบในการหมุนของโรเตอร์เท่ากับ 2 ± 0.02 รอบต่อนาที อุณหภูมิของการทดสอบส่วนใหญ่เท่ากับ 100 ± 0.5 °C ยกเว้นสำหรับยางบางชนิดที่นิยมทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 125 °C (ดูตารางที่ 2.8 ประกอบ) ในระหว่างการทดสอบ ผู้ทดสอบต้องรอให้อุณหภูมิที่ตั้งไว้ก่อนโรเตอร์จะเริ่มหมุน โดยช่วงที่ให้ความร้อนแก่ยาง (preheat time) จะใช้เวลา 1 นาที และนิยมอ่านค่าความหนืดของยางหลังจากที่โรเตอร์หมุนไปได้ 4 นาที ยกเว้นในกรณีของยางบิวไทล์ (IIR) ซึ่งจะอ่านค่าความหนืดของยางหลังจากที่โรเตอร์หมุนไปได้ 8 นาที ขนาดของโรเตอร์ที่ใช้มี 2 ขนาด คือ ขนาดเล็ก (เส้นผ่านศูนย์กลาง 30.48 ± 0.03 มิลลิเมตร) และขนาดใหญ่ (เส้นผ่านศูนย์กลาง 38.10 ± 0.03 มิลลิเมตร) โดยทั่วไป นิยมใช้โรเตอร์ขนาดใหญ่ในการทดสอบวัดค่าความหนืดนี้ของยาง แต่ถ้ายางที่นำมาทดสอบมีค่าความหนืดนี้สูงกว่าระดับที่เครื่องจะสามารถวัดได้โดยใช้โรเตอร์ขนาดเล็กแทน

สำหรับยางที่มีความหนืดหรือน้ำหนักโมเลกุลสูงมากๆ ผู้ทดสอบอาจปรับเปลี่ยนสภาวะของการทดสอบโดยการเพิ่มอุณหภูมิของการวัดหรืออาจลดความเร็วรอบในการหมุนของโรเตอร์ให้ต่ำลง แต่สำหรับยางที่มีความหนืดต่ำมากๆ หรือยางที่เหนียวหนืด (Sticky) ก็อาจนำแผ่นฟิล์มพลาสติกที่บางประมาณ 0.025 มิลลิเมตร ไปวางคั่นระหว่างยางและเบ้าคานเพื่อทำการทดสอบเป็นไปได้อย่างยิ่งขึ้น ตัวอย่างของแผ่นฟิล์มที่นิยมนำมาใช้คั่นระหว่างยางและเบ้าคาน ได้แก่ แผ่นเซลโลเฟน (cellophane) แผ่นไมลาร์ (mylar) หรือแผ่นพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นสูง (high density polyethylene, HDPE) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม แผ่น HDPE สามารถใช้ได้กับการทดสอบที่อุณหภูมิ 100 °C เท่านั้น

ตารางที่ 2.9 สภาวะสำหรับการทดสอบค่าความหนืดมูนีตามมาตรฐาน ASTM D1646

ชนิดของยาง	อุณหภูมิที่ทดสอบ (°C)	ระยะเวลาในการหมุนโรเตอร์ (นาที)
NR		
BR		
CR	100 ± 0.5	4
IR		
NBR		
SBR		
BIIR		
CIIR	100 ± 0.5 หรือ 125 ± 0.5*	8
IIR		
EPDM	125 ± 0.5	4
EPM		

*ใช้อุณหภูมิในการทดสอบที่ 125 ± 0.5 °C สำหรับยางที่มีค่าความหนืดสูงกว่า 60-ML 1+8 (100 °C)

ตัวอย่างสัญลักษณ์โดยทั่วไปที่ใช้ในการแสดงผลการทดสอบค่าความหนืดมูนีคือ 40-ML 1+4 (100°C) หรือ 40-ML 1+4@100°C

เมื่อ 40 คือ ค่าความหนืดที่วัดได้ในหน่วยมูนี

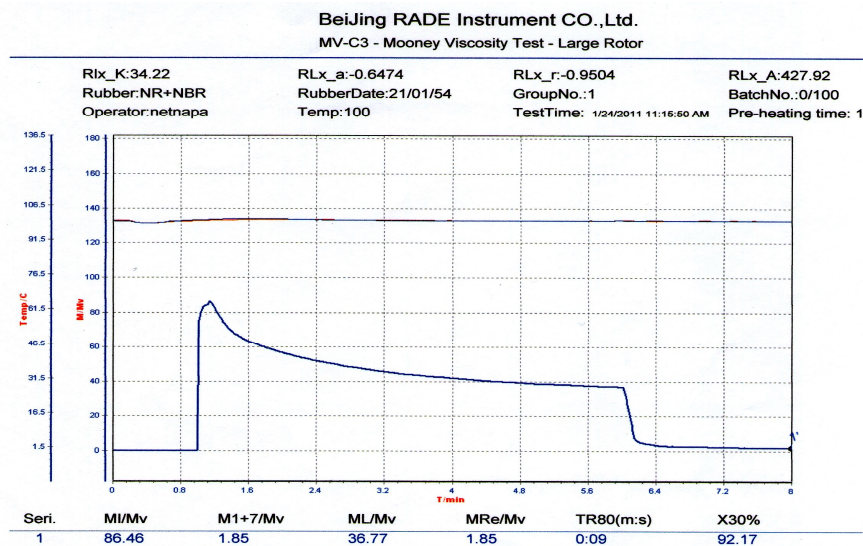
M มาจาก Mooney

L หมายถึง โรเตอร์ขนาดใหญ่ (large) และถ้าเป็นโรเตอร์ขนาดเล็กจะใช้ S (small) แทน

1 คือ ระยะเวลาที่ให้ความร้อนแก่ยางก่อนการทดสอบ (preheat time)

4 คือ ระยะเวลาที่อ่านค่าความหนืด (มีค่าเท่ากับ 8 สำหรับยางบิวไทล์)

100 °C คือ อุณหภูมิของการทดสอบ (มีค่าเท่ากับ 125 °C สำหรับยาง EPDM เป็นต้น)



รูปที่ 2.23 กราฟที่ได้จากเครื่องมูนีวิสโคมิเตอร์

เครื่องวัดค่าพลาสติกซีดีของยางแบบมูนีวิสโคมิเตอร์

1) เครื่องวัดแบบมูนีวิสโคมิเตอร์จะวัดค่าความหนืดของยางที่อัตราเฉือน (shear rate) สูงกว่า (วัดที่อัตราเฉือนเฉลี่ยประมาณ 1 s^{-1}) อย่างไรก็ตาม อัตราเฉือนที่ใช้ในการวัดก็ยังต่ำกว่าอัตราเฉือนที่เกิดขึ้นจริงในกระบวนการผลิตมาก

2) เครื่องมือวัดแบบมูนีวิสโคมิเตอร์นอกจากจะสามารถใช้ค่าความหนืดของยางแล้ว ยังสามารถใช้ศึกษาลักษณะการคงรูปของยางคอมพาวด์ได้อีกด้วย เพราะเครื่องมือวัดแบบนี้สามารถใช้ระยะเวลา สกอร์ช (scorch time) และดัชนีการคงรูป (Cure index) ของยางได้

3) เครื่องมือวัดแบบมูนีวิสโคมิเตอร์สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดสมบัติวิสโคอีลาสติกของยางคอมพาวด์ได้ด้วย กล่าวคือ ผู้ทดสอบสามารถนำเครื่องมูนีวิสโคมิเตอร์ไปใช้ในการศึกษาการคลายตัวของความเค้น (stress relaxation) ได้ เพราะหลังจากที่ได้ดำเนินการวัดค่าความหนืดมูนีวิสโคมิเตอร์เรียบร้อยแล้ว ผู้ทดสอบสามารถตั้งโปรแกรมเพื่อให้โรเตอร์หยุดหมุนและทำการบันทึกค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ซึ่งถ้ายางมีความยืดหยุ่นสมบูรณ์ (fully elastic) ค่าแรงบิดก็จะคงที่ตามเวลาเพราะโมเลกุลของยางจะไม่เกิดการคลายตัว แต่ในความเป็นจริงแล้ว ยางมีสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติกที่มีองค์ประกอบอยู่ 2 ส่วนคือส่วนที่เป็นของเหลวหนืด (viscous) และส่วนที่เป็นของแข็งยืดหยุ่น (elastic) โดยส่วนที่เป็นของเหลวหนืดของยางจะทำให้ค่าแรงบิดลดลงตามเวลาเพราะโมเลกุลของยางที่ได้รับความเครียดจะเกิดการคลายตัว โดยที่อัตราเร็วของการคลายตัวจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของของเหลวหนืดและของแข็งยืดหยุ่นที่มีอยู่ในตัวนั่นเอง กล่าวคือถ้ายางมีองค์ประกอบส่วนที่เป็นของแข็งยืดหยุ่นอยู่ในสัดส่วนที่สูง แรงบิดจะลดลงอย่างช้าๆ ตามเวลาของการคลายตัว แต่ถ้ายางมีองค์ประกอบส่วนที่เป็นของเหลวหนืดอยู่ในสัดส่วนที่สูง แรงบิดก็จะลดลงอย่างรวดเร็วตามเวลาของการคลายตัว เป็นต้น

บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

3.1.1 วัสดุและสารเคมี

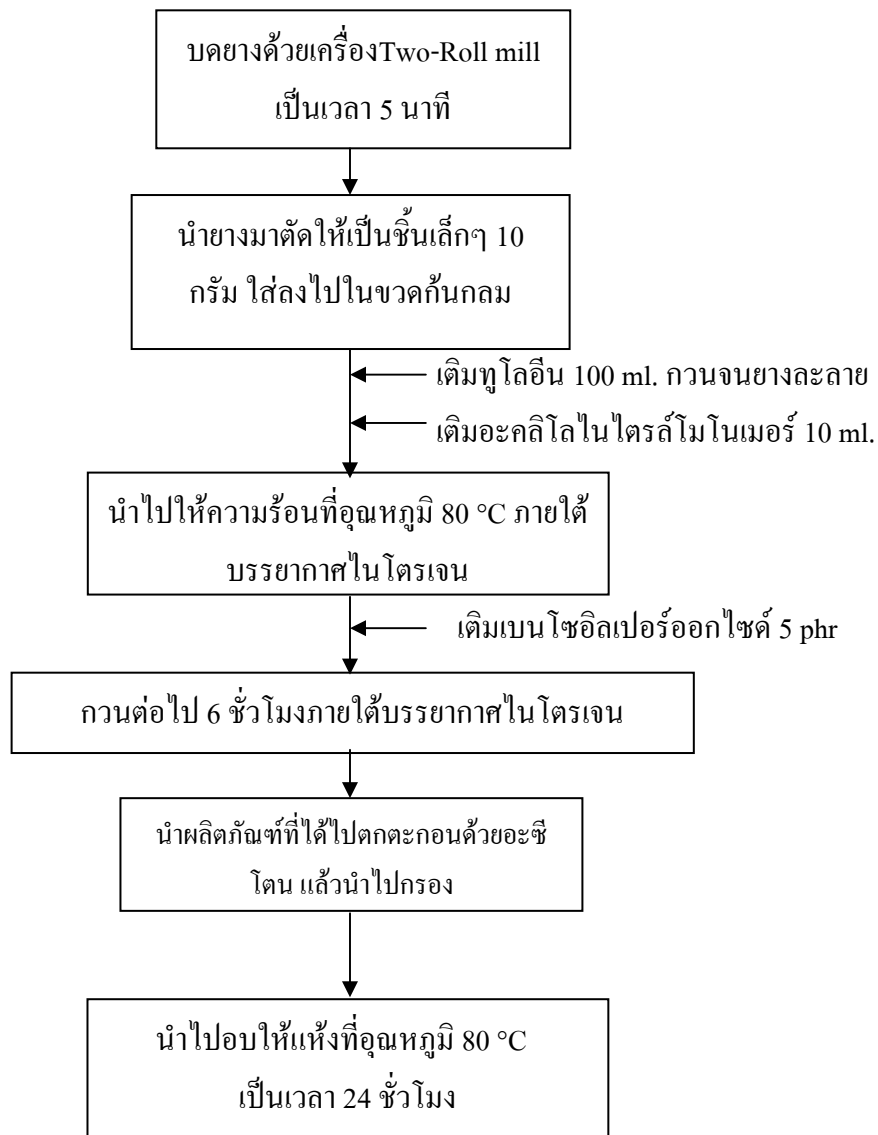
1. ยางธรรมชาติ (NR) เกรด XL ของบริษัท แพนเอเชีย ปาโอเทคโนโลยี จำกัด
2. ยางอะครีโลไนไตรล์บิวตะไดอิน (NBR)
3. อะครีโลไนไตรล์โมโนเมอร์ ของ บริษัท Fluka Chemical จำกัด
4. ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์(Dicumyl Peroxide)
5. เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์
6. ทุโลอิน
7. อะซีโตน(Acetone)
8. แก๊สไนโตรเจน ของบริษัท Thai Industrial Gases จำกัด
9. ปีโตรเลียมอีเทอร์ (Petroleum Ether)
10. เอทานอล
11. น้ำมันไบโอดีเซล ได้แก่ B0, B5, B40 และ B100
12. น้ำมันแก๊สโซฮอล์ ได้แก่ 91, 95, E20 และ E85
13. silica
14. Flyash
15. CaCO_3
16. Zeolite

3.1.2 เครื่องมือ และ อุปกรณ์

1. เครื่องอัดรีด (Compression Molding) ของ บริษัท ยง ฟง แมชชีนเนอรี จำกัด
2. เครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง (Two-roll Mill) ของ บริษัท ยง ฟง แมชชีนเนอรี จำกัด
3. เครื่องทดสอบความแข็ง (Durometer Hardness Shore A) ของ PACIFIC TRANSDUCER CORP.
4. เครื่องทดสอบแรงดึง (UNIVERSAL LLOYD - LR 10 k)
5. เครื่องทดสอบหาเวลาคงรูปของยาง บริษัท GOTECH GT -M2000
6. เครื่องทดสอบหาความหนืดของยาง บริษัท Beijing RADE Instrument (MV-CS)
7. เครื่องทดสอบ Thermogravimetric Analysis (TGA) ของ PerkinElmer TGA 4000

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.2.1 ขั้นตอนการเตรียมยางธรรมชาติกราฟท์โพลีอะคริโลไนไตรล์

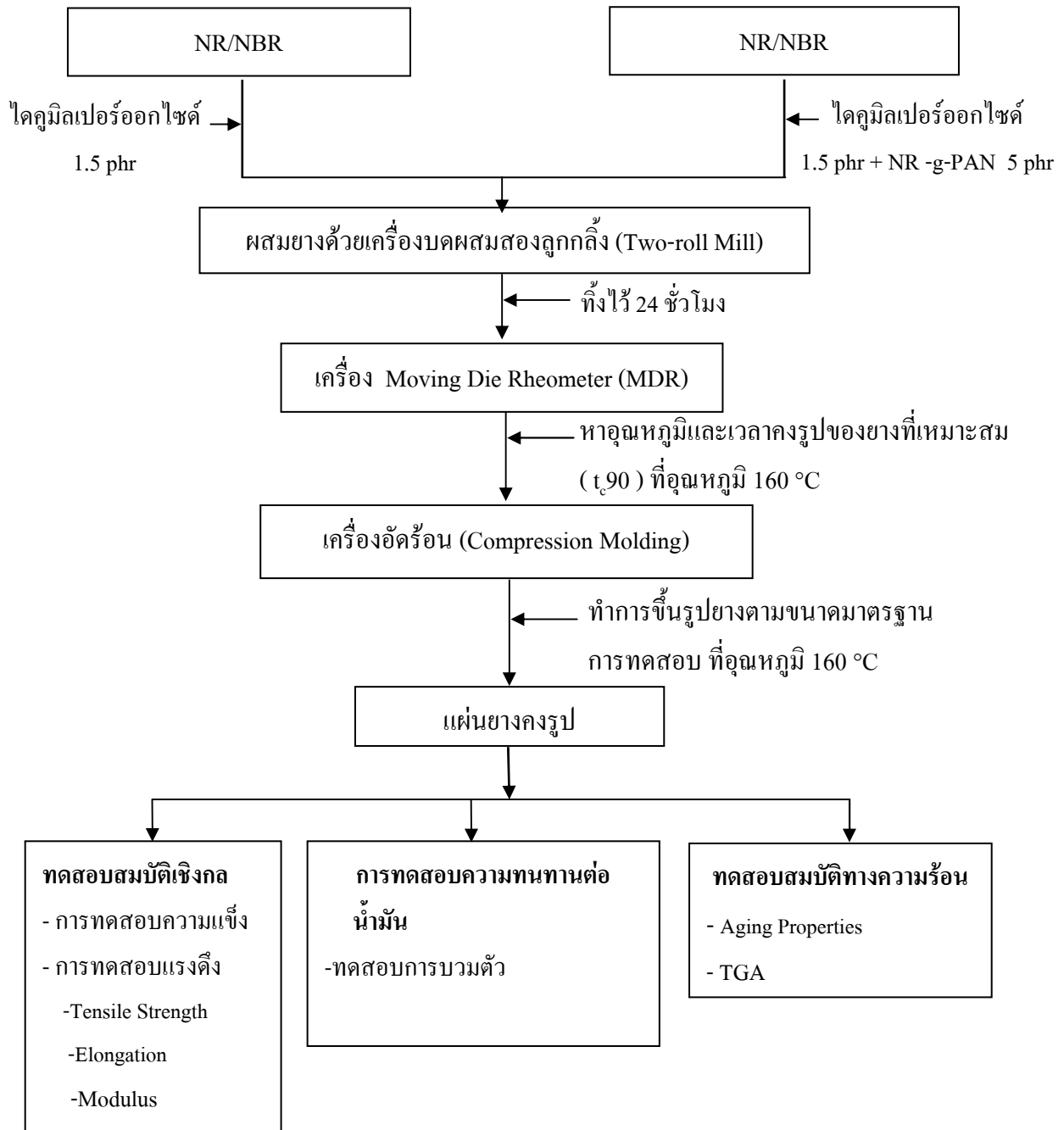


รูปที่ 3.1 แสดงแผนผังการเตรียมยาง NR-g-AN

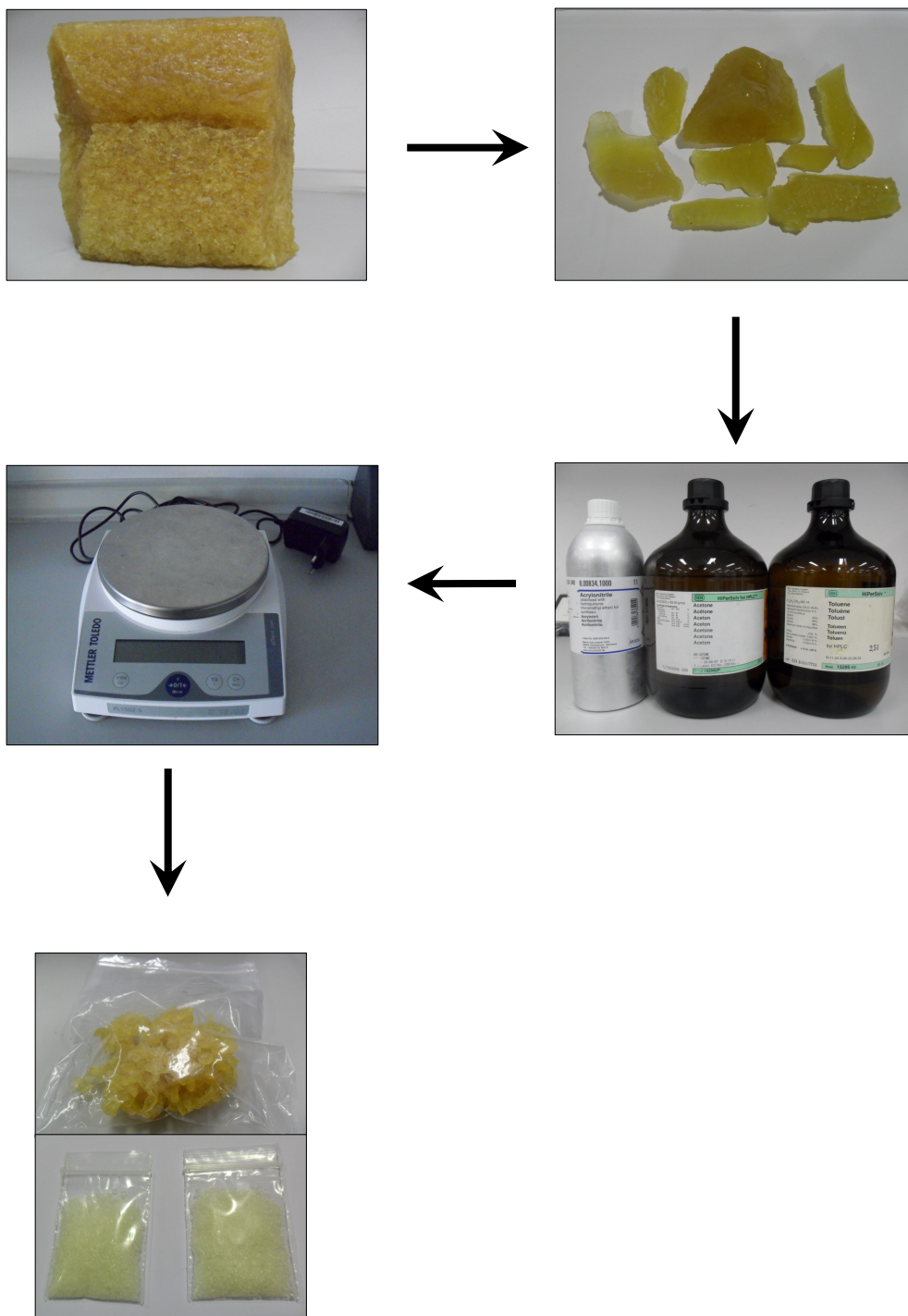


รูปที่ 3.2 แสดงแผนการเตรียมยางธรรมชาติกราฟท์โพลีอะคริโลไนไตรล์

3.2.2 ขั้นตอนการเตรียมยางทึมน้ำมัน



รูปที่ 3.3 แสดงแผนผังการดำเนินการ



รูปที่ 3.4 แสดงขั้นตอนการเตรียมวัสดุและสารเคมี

3.2.3 ขั้นตอนการเตรียมยางทนนํ้ามันผสมด้วยสารเติมแต่ง (Filler)

ตารางที่ 3.1 แสดงส่วนผสมในแต่ละสูตร

Compounds	Part Per Hundred (phr)																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
NR	90	80	70	60	50	80	80	-	80	70	70	70	60	60	60	100	-	-
NBR	5	15	25	35	45	15	15	-	15	25	25	25	45	45	45	-	100	-
MG30	5	5	5	5	5	5	5	-	5	5	5	5	5	5	5	-	-	100
Filler:(sillca,flyash, CaCO ₃ ,Zeolite)						20	40	-	60	20	40	60	20	40	60			
DCP	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	-	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5

วิธีการเตรียมและขึ้นรูป



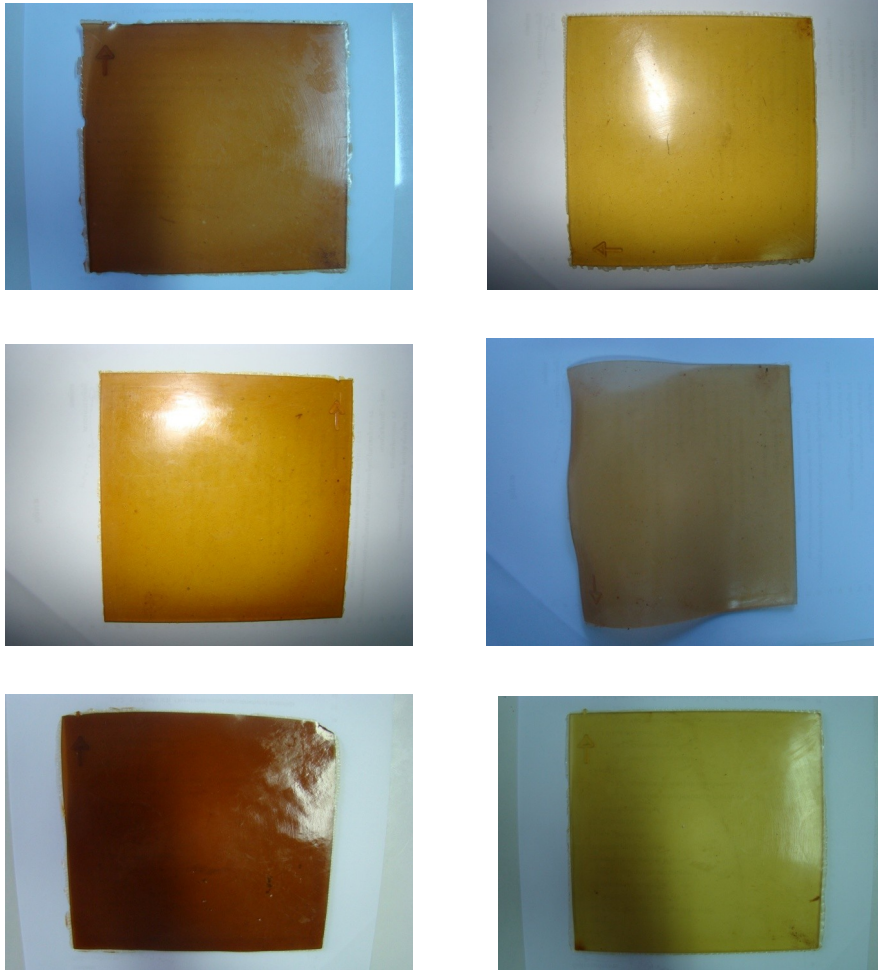
รูปที่ 3.5 แสดงการใส่สารเติมแต่งและขึ้นรูปยางคอมปาวด์

เครื่อง Compression ที่ใช้ในอัดขึ้นรูป



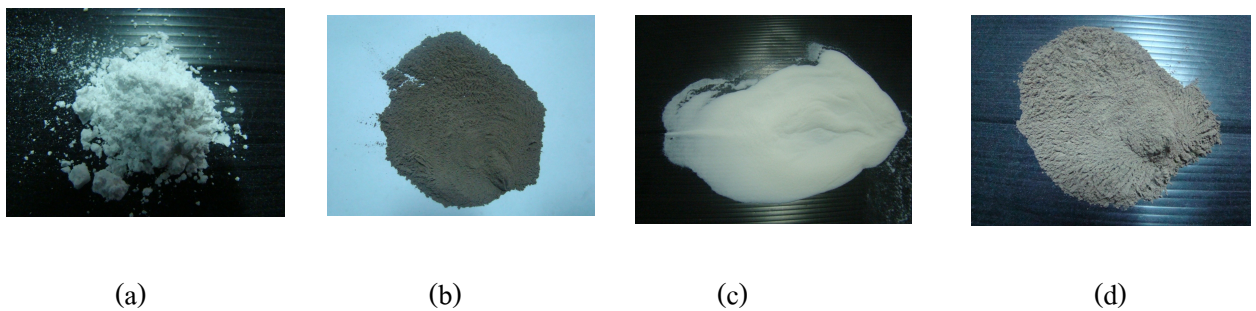
รูปที่ 3.6 แสดงการเครื่องอัดขึ้นรูปยางคอมปาวด์

ตัวอย่างชิ้นงานที่ขึ้นรูปแล้วที่ไม่ใส่ Filler



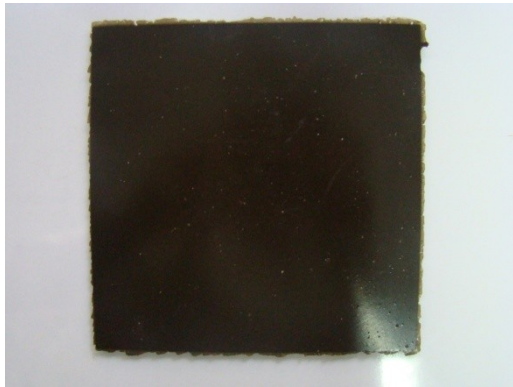
รูปที่ 3.7 แสดงตัวอย่างยางคอมปาวด์ที่ขึ้นรูปที่ไม่ใส่สารตัวเติม

สารตัวเติม (Filler) ที่ใช้ในการดำเนินงาน



รูปที่ 3.8 แสดงสารตัวเติมคือ (a) CaCO_3 , (b) Zeolite, (c) Silica และ (d) Flyash

ตัวอย่างชิ้นงานที่เติม Filler



Zeolite



Flyash



CaCO₃



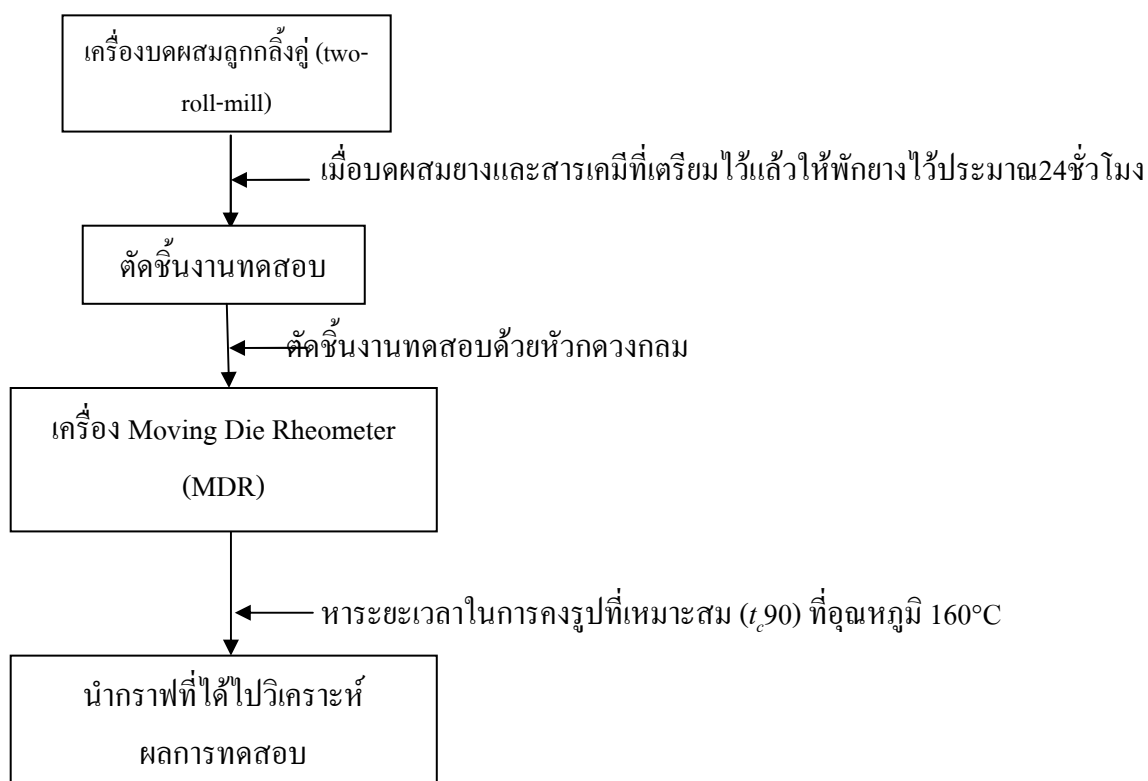
Silica

รูปที่ 3.9 แสดงชิ้นงานตัวอย่างที่เติมสารเติมแต่งต่างๆ

3.3 การทดสอบ

3.3.1 การทดสอบการหาอุณหภูมิและเวลาคงรูปของยาง

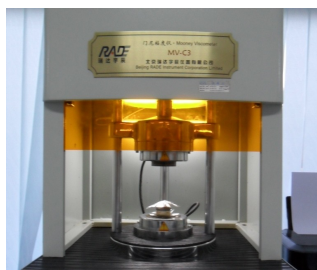
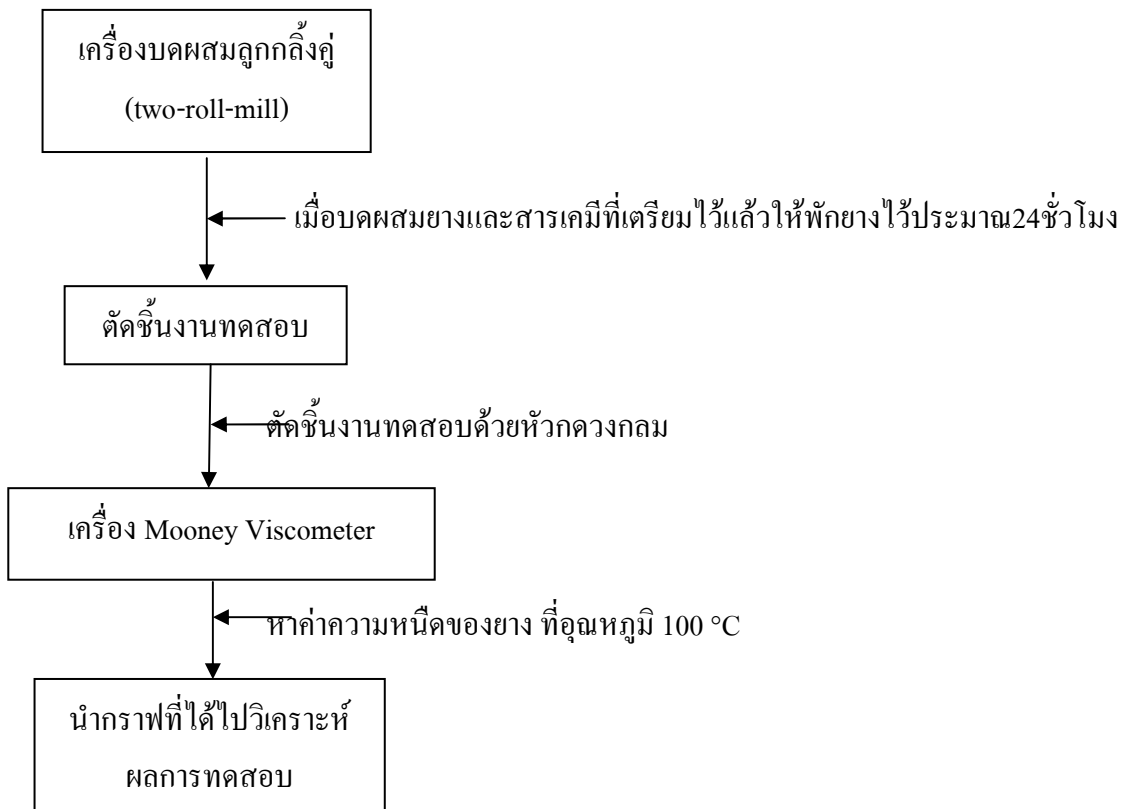
เครื่องหาอุณหภูมิและคงรูปของยาง เป็นเครื่องที่ใช้หาอุณหภูมิและเวลาที่ใช้สำหรับการทำให้ยางคงรูป (Vulcanize หรือ Cure) มีประโยชน์ในการรู้ถึงเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำผลิตภัณฑ์ การรู้ถึงเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำผลิตภัณฑ์ยังก่อให้เกิดการประหยัดค่าใช้จ่าย ลดความเสียหายและลดการสูญเสียชิ้นงานให้น้อยที่สุด



รูปที่ 3.10 แสดงการทดสอบการหาอุณหภูมิและเวลาคงรูปของยางด้วยเครื่อง Moving Die Rheometer

3.3.2 การทดสอบหาความหนืดของยาง

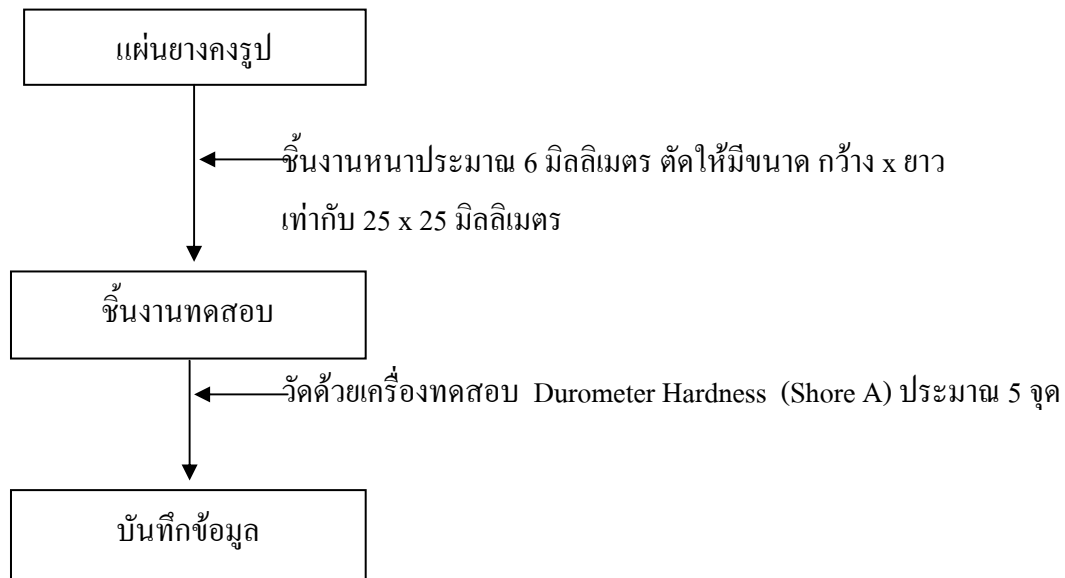
การทดสอบแบบนี้เป็นการทดสอบสมบัติด้านความหนืดของยางผสมก่อนทำการขึ้นรูปจริงเพื่อใช้ในการประเมินความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและความสามารถในการไหลของยางในกระบวนการผลิตนั่นเอง



รูปที่ 3.11 แสดงการทดสอบการหาความหนืดของยาง ด้วยเครื่อง Mooney Viscometer

3.3.3 การทดสอบความแข็ง (Hardness)

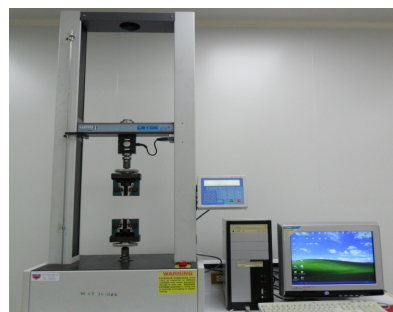
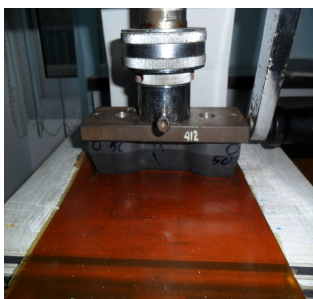
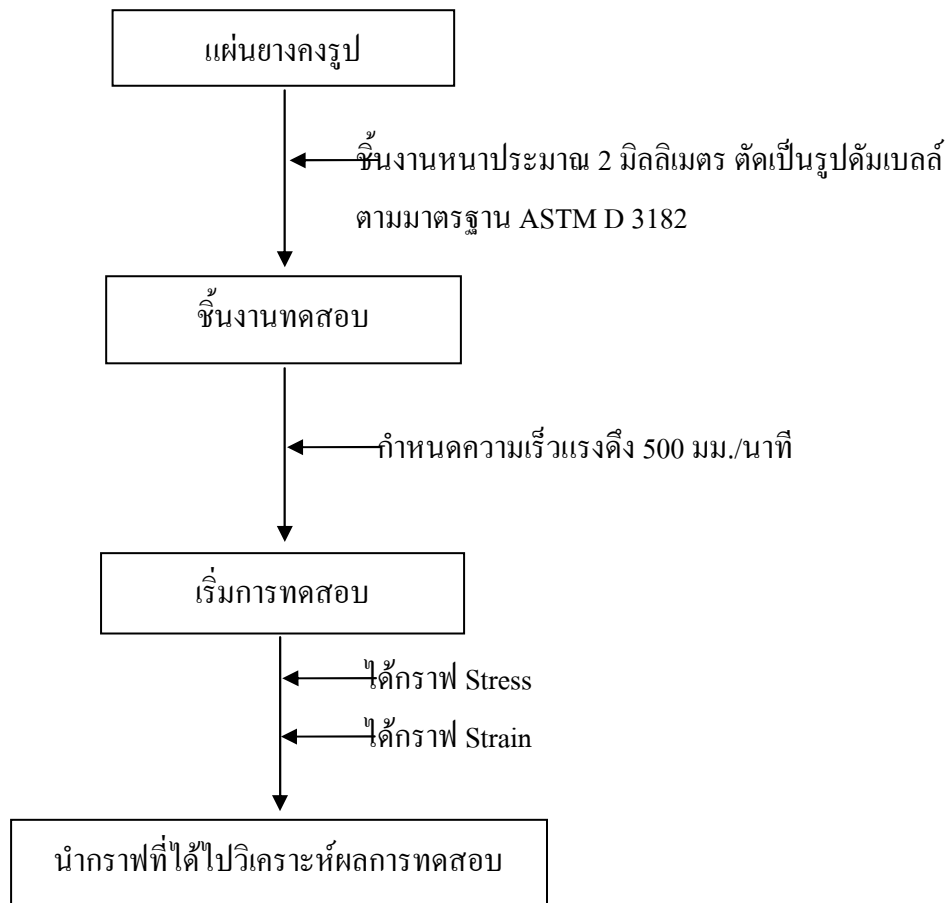
ชิ้นงานที่ใช้สำหรับวัดความแข็งซึ่งค่าความต้านทานต่อแรงกระทำที่กดลงบนผิวหน้าของยางตามมาตรฐาน ASTM D 2240 โดยใช้เครื่อง Durometer Hardness (shore A) เป็นเครื่องมือวัดความแข็งที่เหมาะสมกับวัสดุประเภทยาง โดยชิ้นงานทดสอบที่ใช้มีความหนาประมาณ 6 มม.



รูปที่ 3.12 แสดงเครื่องมือการทดสอบความแข็งแบบ Durometer Hardness (shore A)

3.3.4 การทดสอบแรงดึง (Tensile Testing)

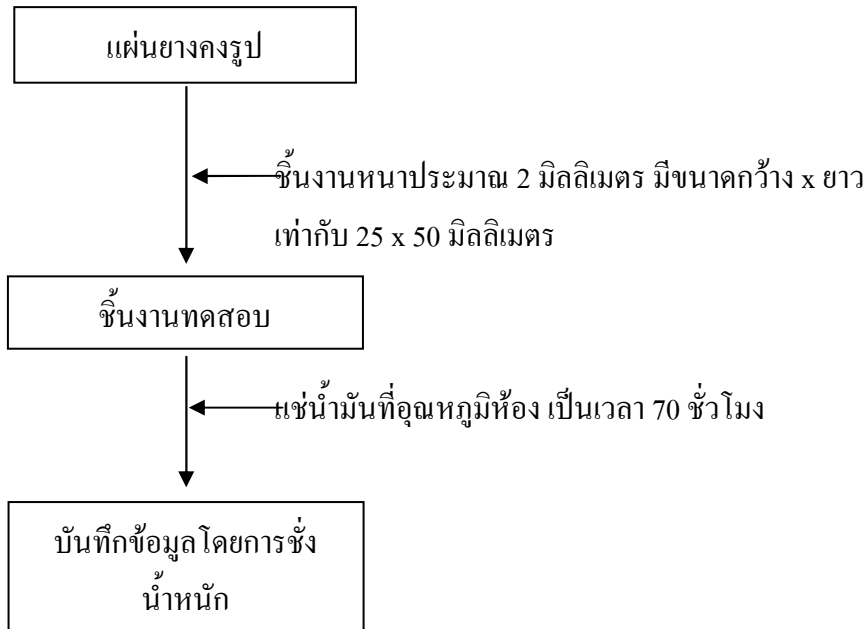
ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 3182 โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง โดยกำหนดอัตราเร็วในการดึงเท่ากับ 500 ± 50 มม./นาที ชิ้นงานทดสอบเป็นรูปดัมเบลล์ (Dumbbell) มีความหนาประมาณ 2 มม.



รูปที่ 3.13 แสดงเครื่องทดสอบแรงดึง Universal Testing

3.3.5 การทดสอบการทนทานต่อของเหลว

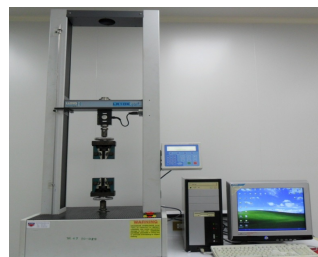
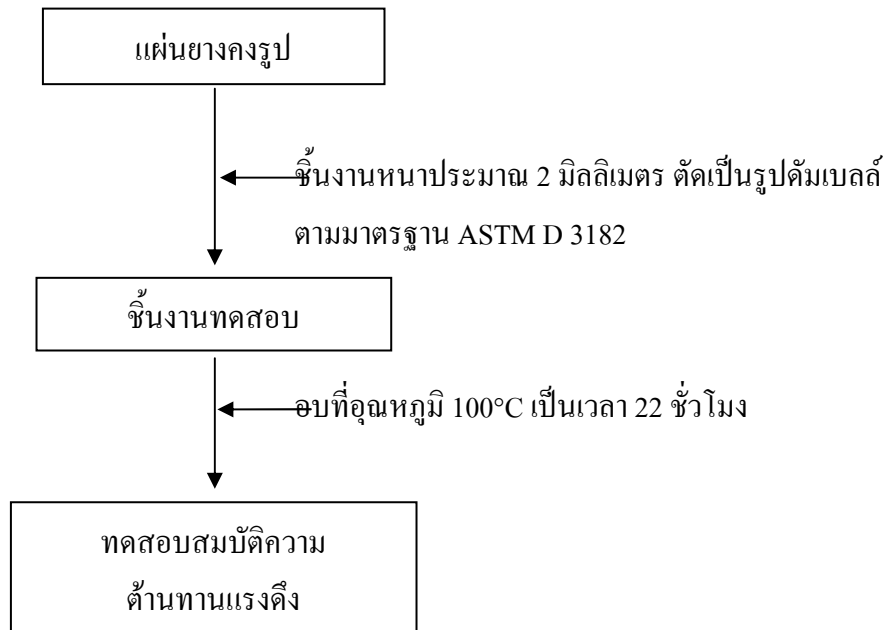
ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 471 โดยนำชิ้นงานทดสอบแช่น้ำมันที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 70 ชั่วโมง โดยทำการชั่งน้ำหนักก่อนและหลังของการแช่น้ำมัน



รูปที่ 3.14 แสดงการทดสอบการบวมตัว

3.3.6 การทดสอบสมบัติการปมเร่ง (Aging Properties)

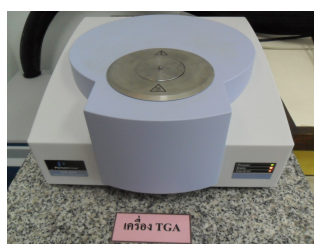
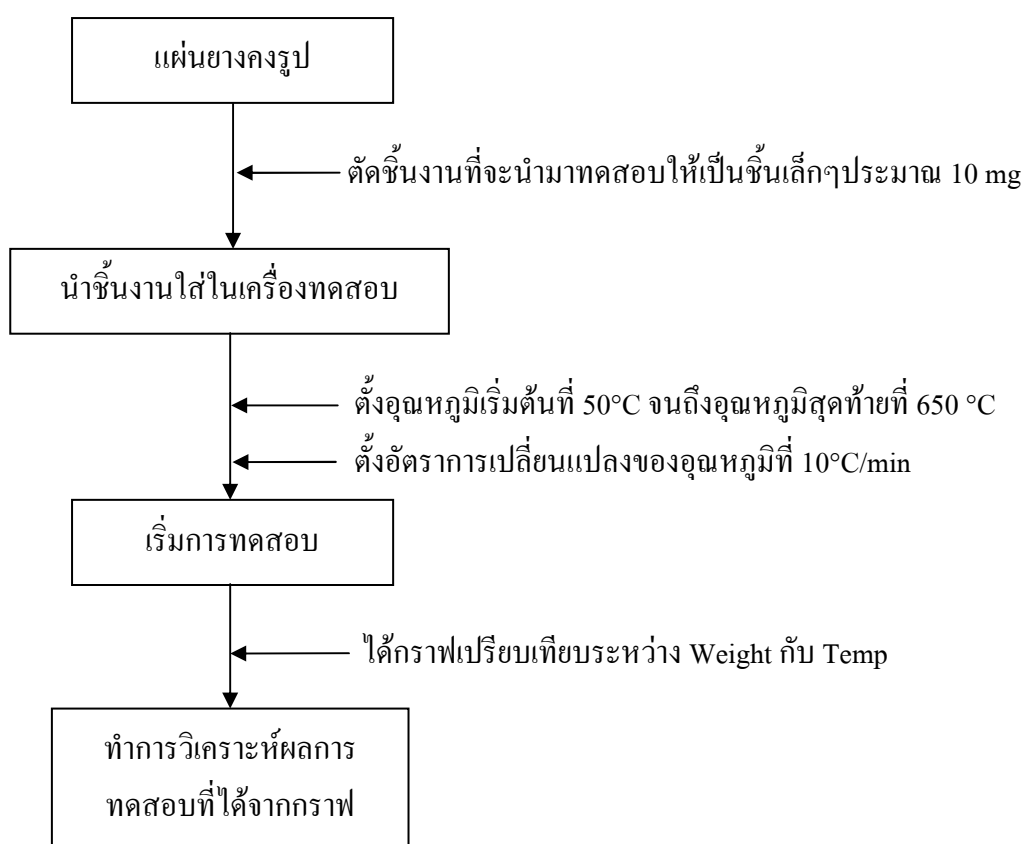
ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D573 โดยนำชิ้นงานทดสอบเป็นรูปคัมเบลล์ (Dumbbell) มีความหนา 2 มม. อบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึง



รูปที่ 3.15 แสดงการทดสอบความทนทานต่อความร้อน

3.3.7 การทดสอบความต้านทานการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน (Thermogravimetric Analyzer, TGA)

เป็นการวิเคราะห์ทางความร้อน โดยการวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิคงที่เทียบกับอุณหภูมิ ซึ่งจะทำการทดสอบด้วยระยะเวลาสั้นๆ ในการทดสอบเริ่มจากการตัดชิ้นงานที่จะนำมาทดสอบให้เป็นชิ้นเล็กๆ ใช้อัดได้ตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 1,500 องศาเซลเซียส โดยการให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ ผลของน้ำหนักของชิ้นงานจะแสดงขึ้นมาที่หน้าจอคอมพิวเตอร์



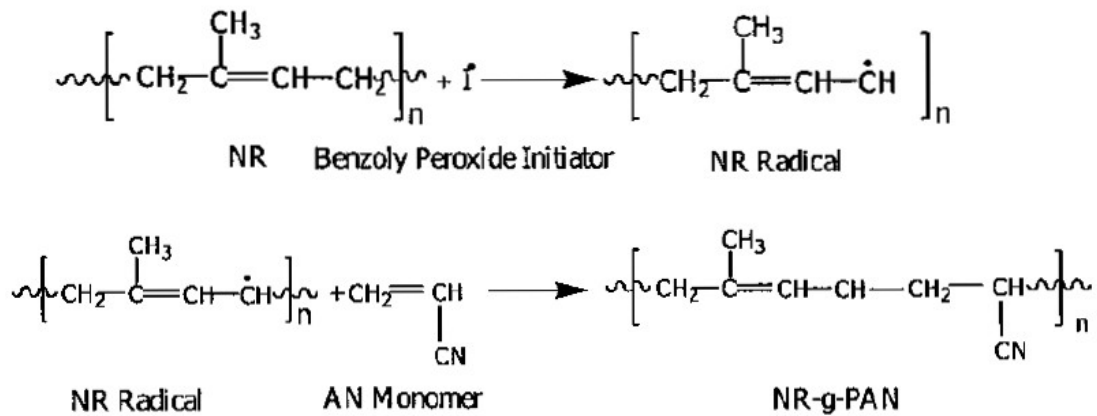
รูปที่ 3.16 แสดงการทดสอบความต้านทานการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน (TGA)

บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

การเตรียมยางธรรมชาติ (NR) ผสมกับยางอะครีโลไนไตรล์บิวตะไดอิน (NBR) ตามอัตราส่วนดังนี้ 100/0, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50, 40/60, 30/70, 20/80 และ 0/100 ตามลำดับ จากนั้นนำยางผสมที่ได้มาทำการทดสอบหาเวลาคงรูปของยาง ทดสอบหาค่าความหนืดของยาง ทดสอบความแข็งแรง ทดสอบสมบัติเชิงกล ทดสอบความต้านทานต่อน้ำมันแก๊สโซฮอล์และ ทดสอบสมบัติทางความร้อนเพื่อนำผลที่ได้มาทำการเปรียบเทียบเพื่อหาสูตรของยางผสมที่มีความสามารถในการต้านทานต่อน้ำมันที่ดีที่สุด จากนั้นจึงนำสูตรยางที่ได้มาผสมกับยางธรรมชาติกราฟท์โพลีอะครีโลไนไตรล์ และเติมด้วยสารเติมแต่งแล้วนำยางผสมที่ได้ไปทำการทดสอบเช่นเดิมเพื่อนำผลการทดสอบมาทำการวิเคราะห์และมีการนำเสนอโดยใช้กราฟในการบรรยายผลการทดสอบ เพื่อให้สามารถเห็นผลได้อย่างชัดเจนขึ้น

4.1 การกราฟท์ยางธรรมชาติกับโพลีอะครีโลไนไตรล์

ในการนำยางธรรมชาติมากราฟท์ด้วยอะครีโลไนไตรล์โมโนเมอร์มีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับยางธรรมชาติซึ่งการเพิ่มความแข็งแรงจะทำให้ยางธรรมชาติสามารถผสมเข้ากับยางอะครีโลไนไตรล์บิวตะไดอินได้ดีขึ้น ซึ่งการกราฟท์ยางธรรมชาติกับอะครีโลไนไตรล์โมโนเมอร์สามารถเตรียมได้จากการนำยางธรรมชาติมาบดด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้งเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำยางที่ได้ไปตัดให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ ใส่ลงในขวดก้นกลมแล้วจึงเติมทูลอีนลงไปกวนให้ยางละลายจนหมด จากนั้นจึงเติมอะครีโลไนไตรล์โมโนเมอร์ลงไปแล้วนำไปต้มใน water bath ที่อุณหภูมิ 80 °C แล้วจึงเติมเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ลงไปกวนตลอดเวลาเป็นเวลา 6 ชั่วโมงภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน จากนั้นนำมาตกตะกอนด้วยอะซีโตนนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปกรองและเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้วจึงชั่งน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่ได้ เมื่อนำน้ำหนักของผลิตภัณฑ์แล้วจึงนำค่าที่ได้มาใช้ในการหาเปอร์เซ็นต์การกราฟท์ยางธรรมชาติกับโพลีอะครีโลไนไตรล์ซึ่งหาได้จากสมการ ได้ปริมาณการกราฟท์สูงถึง 97.29 % โดยแสดงปฏิกิริยาของการกราฟท์ยางธรรมชาติกับโพลีอะครีโลไนไตรล์ดังรูป



รูปที่ 4.1 แสดงปฏิกิริยาของยางธรรมชาติกราฟท์โพลีอะครีโลไนไตรล์

ตารางที่ 4.1 แสดงวิธีการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การกราฟท์

ชนิดสารตั้งต้น	ปริมาณสารตั้งต้น	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ที่ได้ หลังอบที่ 80°C, 24 hrs. (g)	การกราฟท์ (%)
ยางธรรมชาติ	10 g	17.58	97.29
อะครีโลไนไตรล์โมโนเมอร์	10 ml		

จากสูตร

$$\% \text{ Grafting} = (M_1 / M_2) \times 100$$

M_1 = น้ำหนักของกราฟท์โพลิเมอร์

M_2 = น้ำหนักทั้งหมดของผลิตภัณฑ์

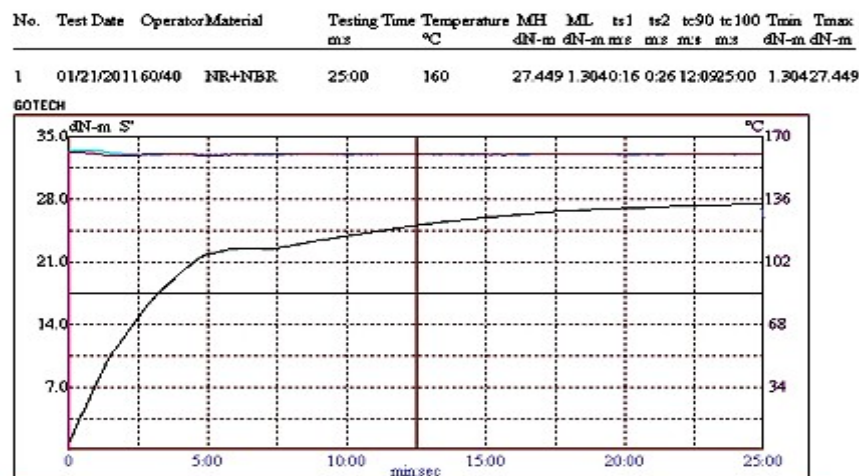
แทนค่า

$$\% \text{Grafting} = \frac{17.58 \text{ g}}{10 \text{ g} + (10 \text{ ml} \times 0.8007 \text{ g/ml})} \times 100$$

$$\% \text{Grafting} = 97.29$$

4.2 การทดสอบการหาเวลาในการคงรูปของยางผสม

การทดสอบการหาเวลาในการคงรูปของยางผสมระหว่าง NR/NBR (60/40)

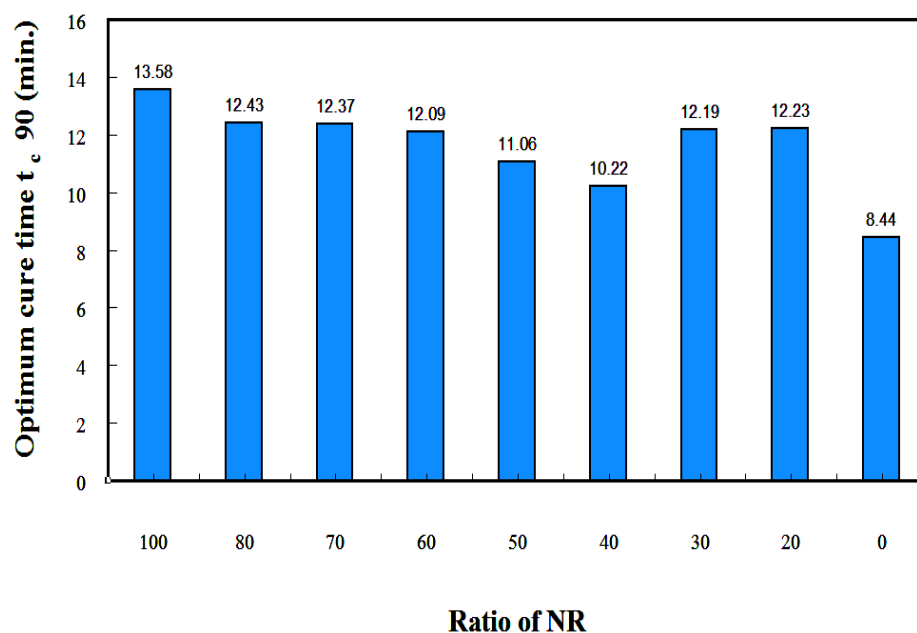


รูปที่ 4.2 แสดงกราฟเวลาคงรูปของ NR / NBR (60/40)

ตารางที่ 4.2 แสดงเวลาที่ใช้ในการคงรูปของยางผสมระหว่าง NR / NBR ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

อัตราส่วน NR / NBR	เวลาที่ใช้ในการคงรูป (นาที)
100/0	13.58
80/20	12.43
70/30	12.37
60/40	12.09
50/50	11.06
40/60	10.22
30/70	12.19
20/80	12.23
0/100	8.44

จากข้อมูลในตารางสามารถนำข้อมูลที่ได้มาทำการเปรียบเทียบโดยการนำเสนอในรูปแบบของแผนภูมิแท่งดังนี้

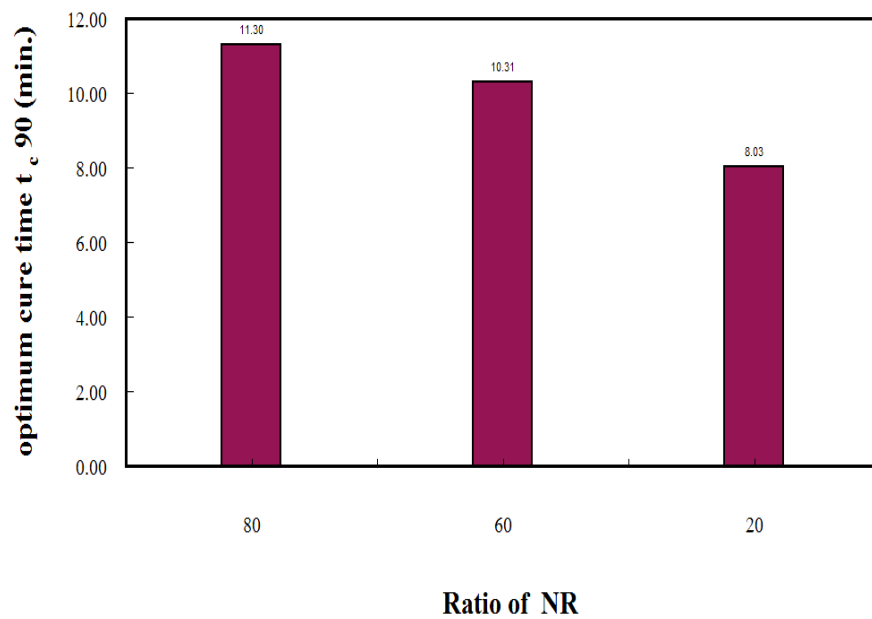


รูปที่ 4.3 แสดงกราฟการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการคงรูปของยางผสม

จากกราฟแสดงให้เห็นว่าเวลาที่ใช้ในการคงรูปของยางผสมมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของยางธรรมชาติลดลงเนื่องจากยางธรรมชาติมีความหนืดสูงมากกว่า จึงส่งผลทำให้สารที่ช่วยให้ยางเกิดการคงรูปนั้น ซึ่งได้แก่ Dicumyl peroxide เข้าไปทำปฏิกิริยากับโครงสร้างของยางธรรมชาติได้ยากจึงทำให้ปฏิกิริยาในการเกิดการเชื่อมโยงของโครงสร้างของยางธรรมชาติเกิดช้าตามไปด้วยและเมื่อนำไปทำการทดสอบจะเห็นได้ว่ายางธรรมชาติใช้เวลาในการคงรูปนานที่สุดคือ 13.58 นาที นั่นเอง ซึ่งเมื่อนำยางผสมมาทำการเติมยาง NR-g-PAN ลงไป แล้วนำไปทำการหาเวลาที่ใช้ในการคงรูปของยางผสมแสดงดังตาราง 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงเวลาที่ใช้ในการคงรูปของยางผสมระหว่าง NR / NBR ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ภายหลังจากเติมยาง NR-g-PAN ลงไปที่ 5 phr

อัตราส่วน NR / NBR	เวลาที่ใช้ในการคงรูป (นาที)
80/20	11.30
60/40	10.31
20/80	8.03

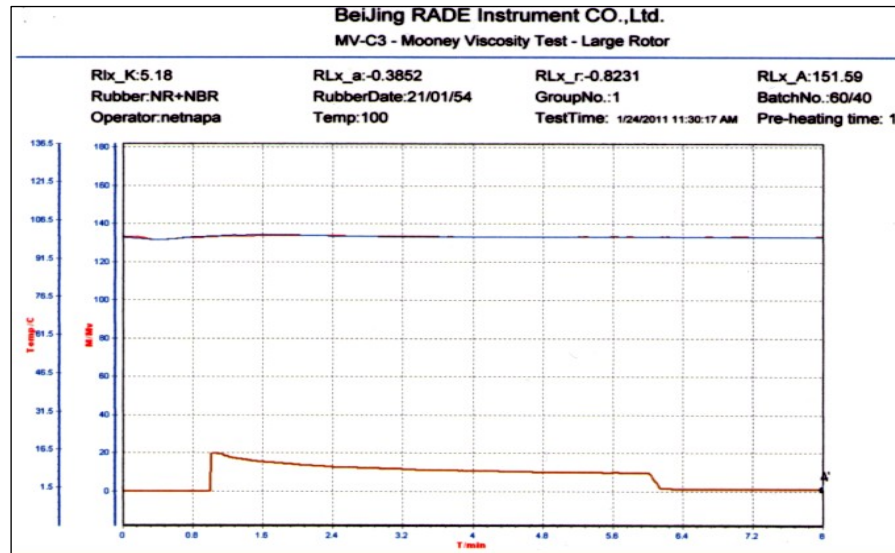


รูปที่ 4.4 กราฟการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการคงรูปของยางผสมภายหลังจากเติมยาง NR-g-PAN

และนำข้อมูลที่ได้มาแสดงผลด้วยแผนภูมิแท่งจะเห็นได้ว่า ยางผสมที่เติมยาง NR-g-PAN ลงไปแล้วส่งผลทำให้ยางผสมใช้เวลาในการคงรูปน้อยลงเป็นผลมาจากยาง NR-g-PAN ที่เติมลงไปนั้นเข้าไปทำให้ยางผสมในส่วนที่เป็นยางธรรมชาติเกิดการทำปฏิกิริยากับสารที่ใช้ในการคงรูปได้ดีขึ้นเนื่องจากการเติมยาง NR-g-PAN จะเข้าไปช่วยทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้วของยางธรรมชาติกับยางอะครีโลไนไตรล์บิวตะไดอินจึงส่งผลทำให้เวลาที่ใช้ในการคงรูปของยางผสมน้อยลงนั่นเอง ซึ่งผลที่ได้จะสอดคล้องกับงานวิจัยของคุณสุวรรณษา เหลือมล้ำ ในเรื่องของพฤติกรรมการณ์การวัลคาไนซ์ของยางผสม

4.3 การทดสอบความหนืดของยางผสม

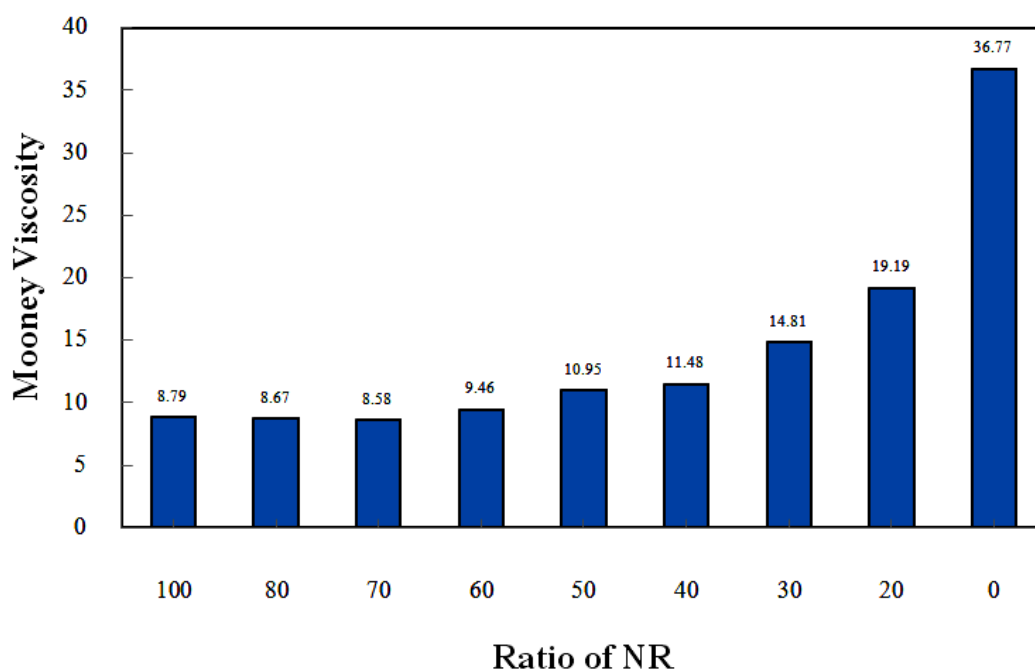
กราฟที่ได้จากการทดสอบความหนืดของยางผสม NR / NBR (60/40)



รูปที่ 4.5 แสดงกราฟการทดสอบความหนืดของ NR / NBR (60/40)

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความหนืดของยางผสมระหว่าง NR / NBR ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

อัตราส่วน NR / NBR	ค่าความหนืดของยางผสม
100/0	8.79
80/20	8.67
70/30	8.58
60/40	9.46
50/50	10.95
40/60	11.48
30/70	14.81
20/80	19.19
0/100	36.77



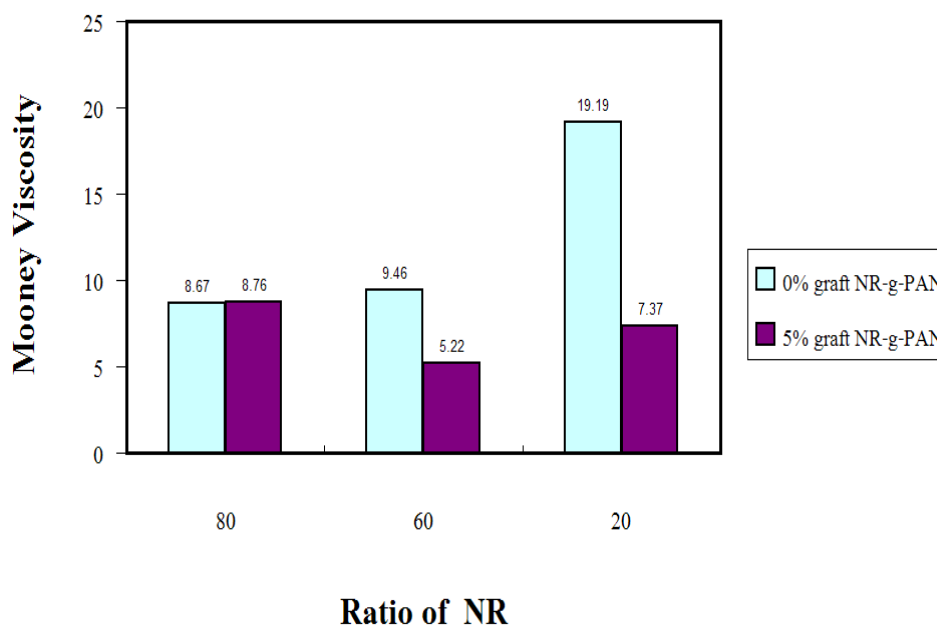
รูปที่ 4.6 แสดงกราฟการเปรียบเทียบค่าความหนืดของยางผสม

จากตารางและแผนภูมิแท่งที่ได้แสดงไว้ จะเห็นได้ว่าค่าความหนืดของยางผสมมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของยางธรรมชาติลดลง ซึ่งค่าความหนืดที่ได้นี้มีค่าน้อยแสดงว่ายางผสมมีความหนืดสูง แต่ถ้าค่าความหนืดที่ได้มีค่ามากแสดงว่ายางผสมมีความหนืดต่ำนั่นเอง และที่ค่าความหนืดของยางผสมมีค่าน้อยลงเมื่อปริมาณของยางธรรมชาติลดลงเป็นผลมาจากในโครงสร้างของยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่เป็นจำนวนมากจึงทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลสูงเมื่อทำการทดสอบค่าความหนืดของยางผสมซึ่งค่าความหนืดของยางผสมจะแปรผันตรงกับปริมาณของยางธรรมชาติคือถ้ามีปริมาณของยางธรรมชาติสูง ยางผสมจะมีค่าความหนืดสูง แต่ถ้าปริมาณของยางธรรมชาติต่ำก็จะทำให้ยางผสมมีค่าความหนืดต่ำตามไปด้วย เพราะปริมาณพันธะคู่ในโครงสร้างของยางธรรมชาติน้อยลงและเมื่อนำยางผสมมาเติมยาง NR-g-PAN ลงไป แสดงผลดังตาราง 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงการหาค่าความหนืดของยางผสมระหว่าง NR / NBR ในอัตราส่วนต่าง ๆ

ภายหลังจากเติมยาง NR-g-PAN ลงไปที่ 5 phr

อัตราส่วน NR / NBR	ค่าความหนืดของยางผสม
80/20	8.76
60/40	5.22
20/80	7.37



รูปที่ 4.7 กราฟการเปรียบเทียบค่าความหนืดของยางผสมภายหลังจากเติมยาง NR-g-PAN

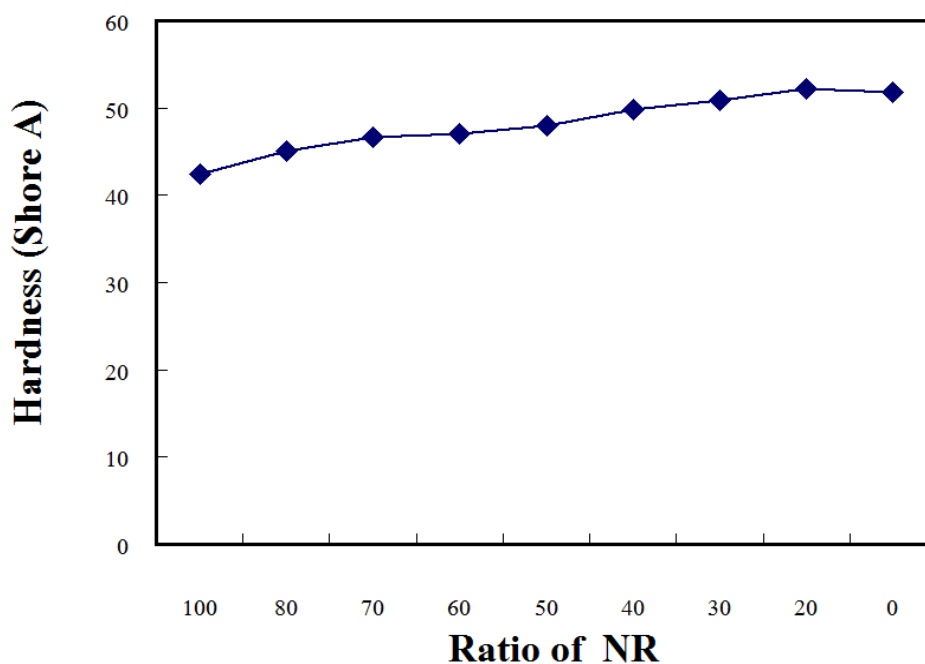
จากกราฟที่ 4.7 แสดงเป็นการเปรียบเทียบยางผสมที่เติมยาง NR-g-PAN กับยางผสมที่ไม่เติมยาง NR-g-PAN จะเห็นได้ว่าค่าความหนืดของยางผสมมีค่าลดลงซึ่งหมายถึงว่ายางผสมมีความหนืดสูงขึ้นเป็นผลมาจากปริมาณพันธะคู่ของยางธรรมชาติมีปริมาณน้อยลงนั่นเอง

4.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล

4.4.1 การทดสอบความแข็งที่ผิว (Hardness)

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความแข็งที่ผิว (Shore A) ของยางผสมระหว่าง NR / NBR ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

อัตราส่วน NR / NBR	ค่าความแข็ง (Shore A)
100/0	42.38
80/20	45.08
70/30	46.62
60/40	47.00
50/50	47.92
40/60	49.76
30/70	50.90
20/80	52.22
0/100	51.80



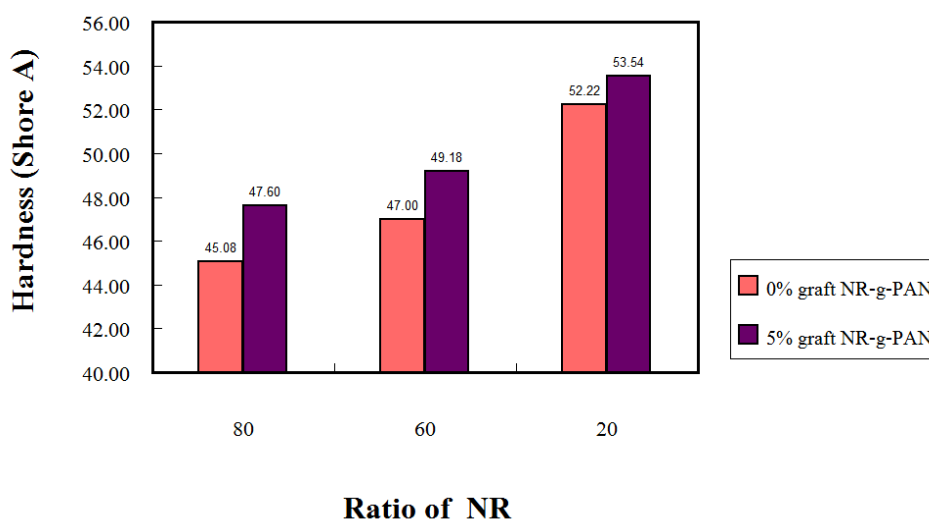
รูปที่ 4.8 แสดงกราฟการเปรียบเทียบค่าความแข็งของยางผสม

จากค่าที่ได้จากตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าค่าความแข็งของยางผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของยางธรรมชาติลดลงเนื่องจากโดยธรรมชาติของยางธรรมชาตินั้นจะมีค่าความยืดหยุ่นสูงมาก จึงทำให้ยางผสมที่มีปริมาณของยางธรรมชาติสูง ๆ มีความแข็งน้อยลงแต่ในทางตรงกันข้ามเมื่อปริมาณของยางธรรมชาติในยางผสมมีอยู่ในปริมาณที่น้อย แสดงว่าในยางผสมนั้นจะมียางอะคริโลไนไตรล์บิวตะไดอินเพิ่มขึ้นจึงส่งผลทำให้ยางผสมที่ได้มีความแข็งมากยิ่งขึ้นเป็นผลมาจากโครงสร้างของยางอะคริโลไนไตรล์บิวตะไดอินมีความเป็นขั้วสูงและยางชนิดนี้เป็นยางสังเคราะห์ซึ่งมีค่าความแข็งมากกว่ายางธรรมชาติอยู่แล้วทำให้เมื่อนำไปผสมกับยางอะคริโลไนไตรล์บิวตะไดอินจึงเข้าไปช่วยทำให้ยางผสมมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นนั่นเอง ซึ่งค่าความแข็งของยางผสมที่สูงที่สุดคือ ที่ NR 20% มีค่าความแข็งอยู่ที่ 52.22 Shore A และเมื่อนำยางผสมไปเติมยาง NR-g-PAN ได้ผลดังตารางข้างล่างนี้

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าความแข็งที่ผิว (Shore A) ของยางผสมระหว่าง NR / NBR ในอัตราส่วนต่าง ๆ ภายหลังจากเติมยาง NR-g-PAN ลงไปที่ 5 phr

อัตราส่วน NR / NBR	ค่าความแข็ง (Shore A)
80/20	47.60
60/40	49.18
20/80	53.54

ซึ่งนำผลจากตารางที่ได้มาทำกราฟการเปรียบเทียบค่าความแข็งของยางผสมที่เติมยาง NR-g-PAN กับยางผสมที่ไม่ได้เติมยาง NR-g-PAN ลงไปได้ผลดังนี้คือ



รูปที่ 4.9 แสดงกราฟการเปรียบเทียบค่าความแข็งของยางผสมภายหลังจากเติมยาง NR-g-PAN

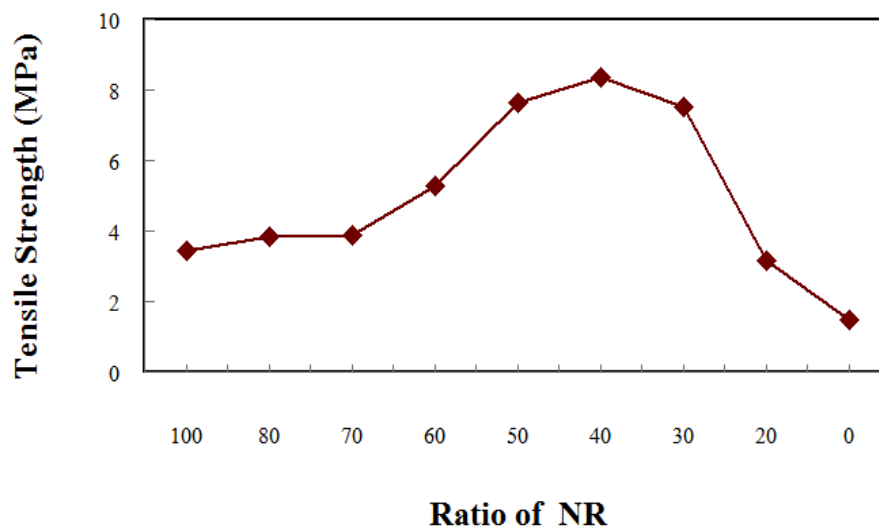
พบว่าค่าความแข็งของยางผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากยาง NR-g-PAN มีส่วนของโพลีอะคริโลไนไตรล์ที่มีความแข็งสูงอยู่แล้วทำให้ส่วนที่เป็นโพลีอะคริโลไนไตรล์เข้าไปเพิ่มความแข็งให้กับยางผสม จึงทำให้อย่างผสมที่เติมยาง NR-g-PAN ลงไปมีค่าความแข็งสูงกว่ายางผสมที่ไม่เติมยาง NR-g-PAN

4.4.2 การทดสอบค่าแรงดึง (Tensile Strength)

4.4.2.1 ค่า Tensile Strength

ตารางที่ 4.8 แสดงค่า Tensile Strength ของยางผสม NR / NBR ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

อัตราส่วน NR / NBR	ค่า Tensile Strength (MPa)
100/0	3.4340
80/20	3.8548
70/30	3.8956
60/40	5.2942
50/50	7.6239
40/60	8.3594
30/70	7.5177
20/80	3.1533
0/100	1.4980

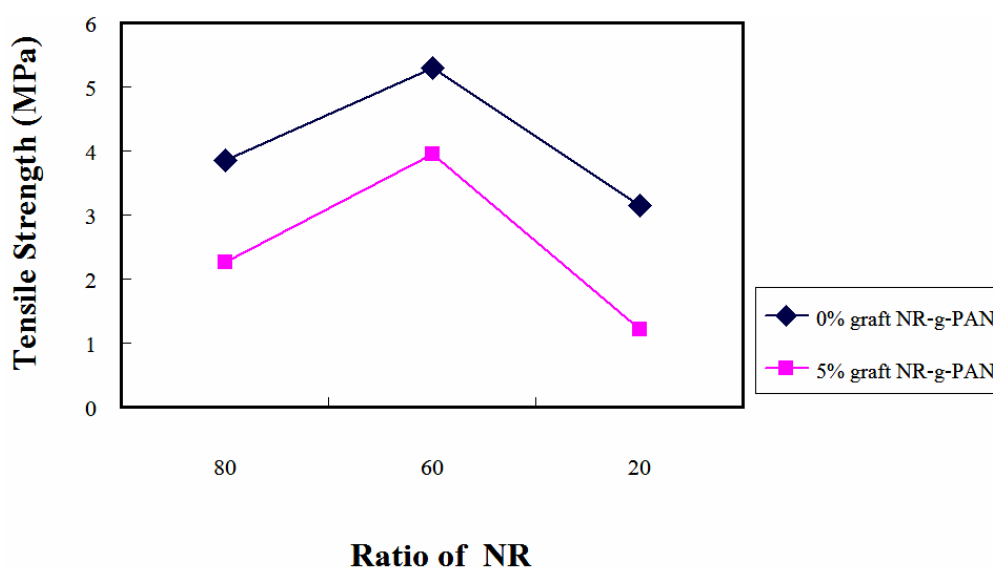


รูปที่ 4.10 แสดงกราฟค่า Tensile Strength ของยางผสม

หลังจากที่ได้ผลการทดสอบดังตารางและกราฟแล้วจะเห็นได้ว่าค่า Tensile Strength มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของยางธรรมชาติลดลงและสูงสุดที่ NR 40% ซึ่งมีค่า Tensile Strength อยู่ที่ 8.3594 MPa หลังจากนั้นค่า Tensile Strength มีแนวโน้มลดลงและต่ำที่สุดในอัตราส่วนที่ NR 0% ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 1.4980 MPa จากผลดังกล่าว ที่ในช่วงแรกของกราฟมีแนวโน้มของค่า Tensile Strength สูงขึ้นเป็นผลมาจากยางผสมมีส่วนของยางธรรมชาติผสมอยู่ในปริมาณที่มาก ซึ่งยางธรรมชาตินั้นมีค่า Tensile Strength สูงกว่ายางอะครีโลไนไตรล์บิวตะไดอินและจากการศึกษาของคุณวิรุทธ คุ่มประเสริฐเกี่ยวกับค่าความต้านทานแรงดึงของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางอะครีโลไนไตรล์บิวตะไดอินพบว่าโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่ที่เชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลอยู่เป็นจำนวนมากและสามารถเกิดผลึกได้เมื่อรับแรงดึงต่างจากยางสังเคราะห์ที่มีความอึดตัวของโครงสร้างสูงจึงเกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลน้อยและเป็นยางที่มีความเป็นขี้สูงซึ่งเมื่อมีแรงมากกระทำจึงยึดตัวสามารถรับแรงได้น้อยซึ่งค่า Tensile Strength ของยางธรรมชาติอยู่ที่ 3.4340 MPa และค่า Tensile Strength ของยางอะครีโลไนไตรล์บิวตะไดอินอยู่ที่ 1.4980 MPa ซึ่งเมื่อนำยางทั้งสองมาผสมกันนั้นคุณสมบัติของยางธรรมชาติจะช่วยให้ยางผสมมีค่า Tensile Strength สูงกว่ายางอะครีโลไนไตรล์บิวตะไดอินเพียงอย่างเดียวนั่นเอง จึงทำให้กราฟในช่วงแรกมีแนวโน้มของค่า Tensile Strength ที่เพิ่มขึ้นแต่หลังจากนั้นค่า Tensile Strength มีค่าลดลงเป็นเพราะยางธรรมชาติที่มีความเป็นขี้ต่ำกับยางอะครีโลไนไตรล์ที่มีความเป็นขี้สูง ๆ นั้นเมื่อนำมาผสมกันในปริมาณที่แตกต่างกันมาก ๆ เช่นในอัตราส่วนที่ NR 40% ส่งผลให้ยางผสมเข้ากันได้ไม่ดี จึงมีผลต่อความสามารถในการรับแรงเนื่องจากการถ่ายทอดแรงไปยังอนุภาคของยางด้วยกันเป็นไปได้น้อยเนื่องจากแต่ละอนุภาคอยู่ห่างกันมากและเมื่อทำการเติมยาง NR-g-PAN ลงไปในยางผสมได้ผลดังตาราง 4.9

ตารางที่ 4.9 แสดงค่า Tensile Strength ของยางผสม NR / NBR ในอัตราส่วนต่าง ๆ
ภายหลังจากเติมยาง NR-g-PAN ลงไปที่ 5 phr

อัตราส่วน NR / NBR	ค่า Tensile Strength (MPa)
80/20	2.2598
60/40	3.9492
20/80	1.2063



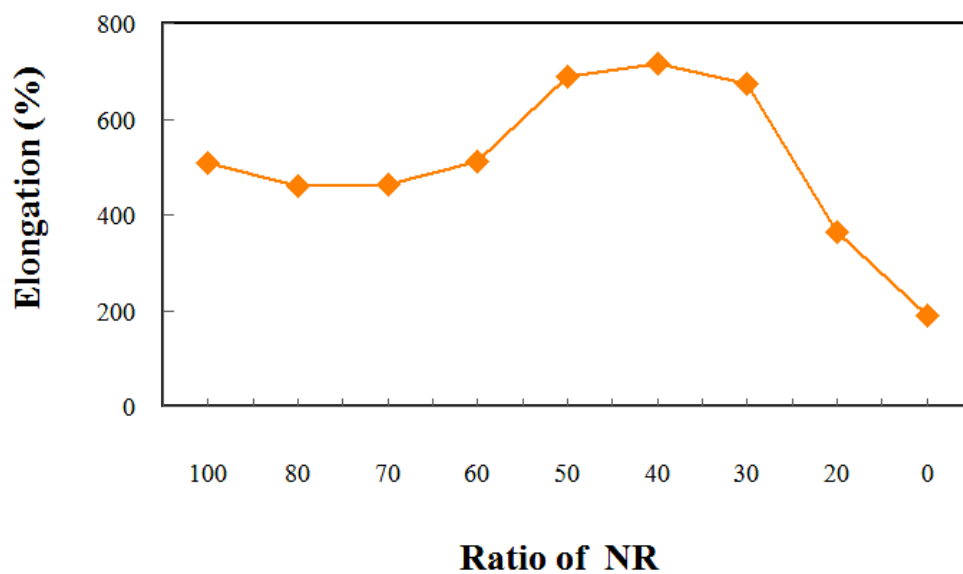
รูปที่ 4.11 กราฟการเปรียบเทียบค่า Tensile Strength ของยางผสมภายหลังจากเติมยาง NR-g-PAN

เมื่อนำผลที่ได้มาทำกราฟเปรียบเทียบยางผสมที่เติมยาง NR-g-PAN กับยางผสมที่ไม่ได้เติมนั้น จะเห็นได้ว่ายางผสมที่เติมยาง NR-g-PAN ลงไปมีค่า Tensile Strength ลดต่ำลงเป็นผลมาจากการเติมยาง NR-g-PAN เข้าไปทำให้ยางธรรมชาติมีความเป็นขั้วสูงขึ้นจึงทำให้ความเข้ากันได้ของยางทั้งสองชนิดดีขึ้นและเนื่องจากยางผสมมีความเป็นขั้วสูงขึ้นทำให้มีลักษณะของความแข็งเปราะเกิดขึ้นได้หรือเนื่องมาจากยาง NR-g-PAN เข้าไปทำให้พันธะคู่ในโครงสร้างของยางผสมลดลง จึงส่งผลต่อการรับแรงของยางผสม

4.4.2.2 ค่า Elongation at break

ตารางที่ 4.10 แสดงค่า Elongation at break ของยางผสมระหว่าง NR / NBR ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

อัตราส่วน NR / NBR	ค่า Elongation (%)
100/0	507.59
80/20	461.25
70/30	461.69
60/40	509.93
50/50	687.80
40/60	717.06
30/70	673.29
20/80	364.02
0/100	190.12

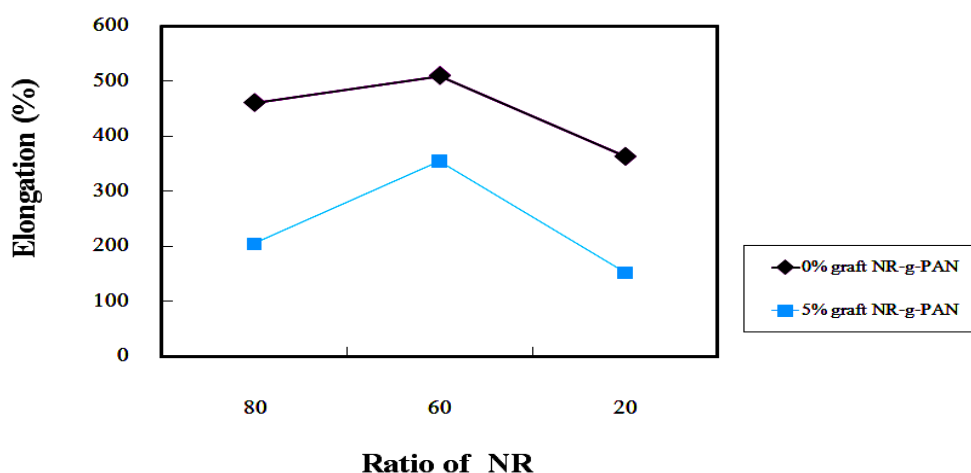


รูปที่ 4.12 แสดงกราฟการเปรียบเทียบค่า Elongation at break ของยางผสม

จากค่าที่แสดงดังตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.12 กราฟเปรียบเทียบแนวโน้มของค่า Elongation at break จะเห็นได้ว่าแนวโน้มของกราฟเป็นไปในทิศทางเดียวกับค่า Tensile Strength คือกราฟมีแนวโน้มของค่า Elongation at break เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของยางธรรมชาติลดลงและสูงสุดที่ NR 40% หลังจากนั้นค่า Elongation at break มีแนวโน้มลดลงตามลำดับและเมื่อนำยางผสมมาทำการเติมยาง NR-g-PAN แสดงค่าดังตาราง 4.11

ตารางที่ 4.11 แสดงค่า Elongation at break ของยางผสมระหว่าง NR / NBR ในอัตราส่วนต่าง ๆ ภายหลังจากเติมเติมยาง NR-g-PAN ที่ 5 phr

อัตราส่วน NR / NBR	ค่า Elongation (%)
80/20	204.71
60/40	355.03
20/80	152.46



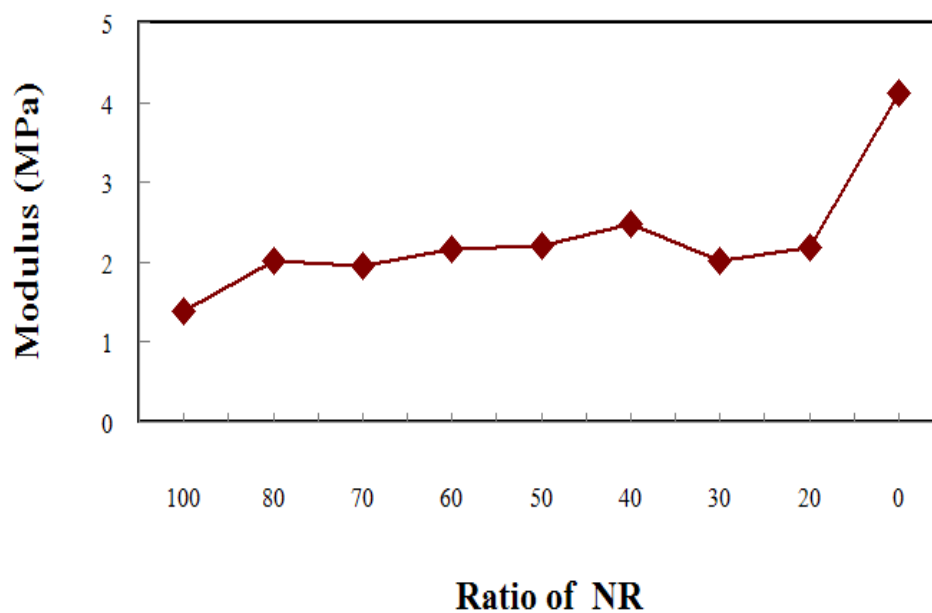
รูปที่ 4.13 กราฟการเปรียบเทียบค่า Elongation at break ของยางผสมภายหลังจากเติมเติมยาง NR-g-PAN

และจากกราฟที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบข้างต้นแสดงให้เห็นว่าค่า Elongation at break ของยางผสมภายหลังจากเติมเติมยาง NR-g-PAN ลงไปแล้วทำให้ค่า Elongation at break ของยางผสมมีแนวโน้มลดลงและมีค่า Elongation at break สูงสุดที่ NR 40% เป็นผลมาจากยาง NR-g-PAN จะมีส่วนของโพลีอะคริโลไนไตรล์ซึ่งตัวโพลีอะคริโลไนไตรล์นั้นจะมีความแข็งแรงมากจึงส่งผลทำให้ยางผสมมีความแข็งแรงและเปราะมากขึ้นซึ่งเมื่อมีแรงดึงมากกระทำส่งผลให้ความสามารถในการยืดตัวของยางผสมนั้นน้อยลงทำให้ค่า Elongation at break จึงมีค่าน้อยลงดังกราฟ

4.4.2.3 ค่า Modulus

ตารางที่ 4.12 แสดงค่า Modulus ของยางผสมระหว่าง NR / NBR ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

อัตราส่วน NR / NBR	ค่า Modulus (MPa)
100/0	1.3965
80/20	2.0105
70/30	1.9505
60/40	2.1619
50/50	2.1962
40/60	2.4691
30/70	2.0195
20/80	2.1828
0/100	4.1221

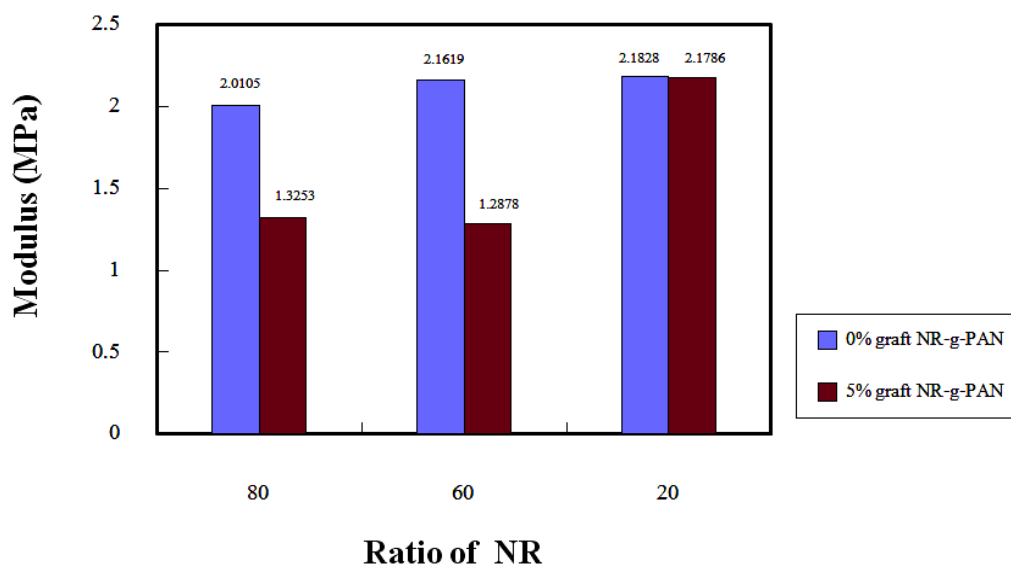


รูปที่ 4.14 แสดงกราฟค่า Modulus ของยางผสม

จากผลการทดสอบและได้ค่า Modulus แสดงดังตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 กราฟพบว่าค่า Modulus ของยางผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของยางธรรมชาติลดลงและที่ NR 40% มีค่า Modulus สูงที่สุด จากงานวิจัยของคุณสุวรรณา เหลือมล้ำ กล่าวว่า ที่ยางผสมมีค่า Modulus สูงกว่ายางธรรมชาติเพียงอย่างเดียวเป็นเพราะว่ายางผสมมีส่วนของยางอะคริโลไนไตรล์บิวตะไดอินที่มีความเป็นขี้วและความแข็งมากกว่ายางธรรมชาติจึงส่งผลทำให้ยางผสมมีค่า Modulus สูงขึ้นแต่ยังน้อยกว่ายางอะคริโลไนไตรล์บิวตะไดอินเพียงอย่างเดียวและเมื่อนำยางผสมมาเติมยาง NR-g-PAN ลงไปได้ผลดังตาราง 4.13

ตารางที่ 4.13 แสดงค่า Modulus ของยางผสมระหว่าง NR / NBR ในอัตราส่วนต่าง ๆ
ภายหลังจากเติมยาง NR-g-PAN ลงไปที่ 5 phr

อัตราส่วน NR / NBR	ค่า Modulus (MPa)
80/20	1.3253
60/40	1.2878
20/80	2.1786



รูปที่ 4.15 แสดงกราฟการเปรียบเทียบค่า Modulus ของยางผสมภายหลังจากเติมยาง NR-g-PAN

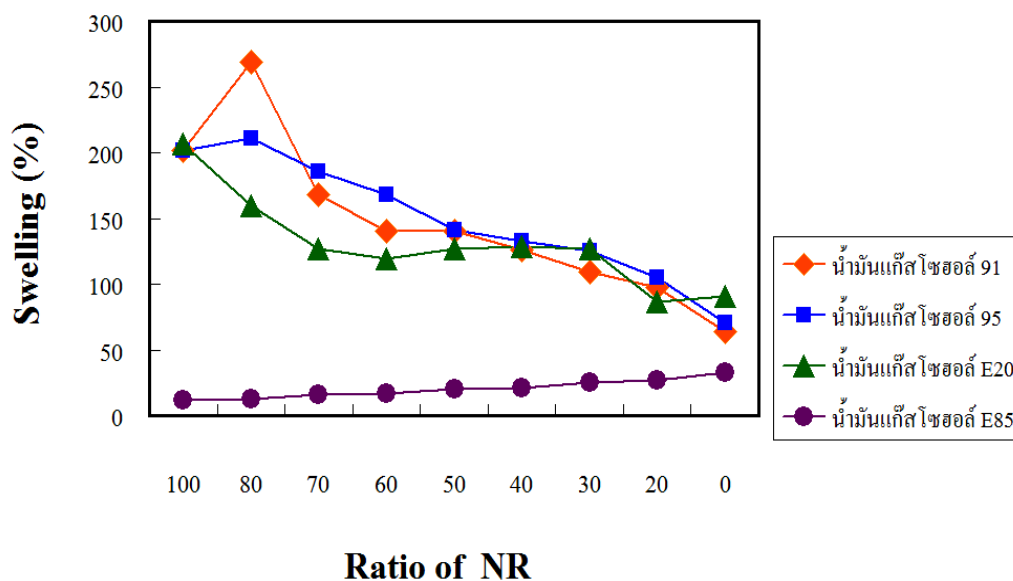
จากผลการเปรียบเทียบของยางผสมที่เติมยาง NR-g-PAN กับยางผสมที่ไม่ได้เติมยาง NR-g-PAN พบว่าค่า Modulus ของยางผสมมีค่าลดลงเป็นผลมาจากเมื่อเติมยาง NR-g-PAN ลงไปเป็นตัวประสานนั้นเข้าไปเพิ่มความเป็นขี้วให้กับยางผสมส่งผลทำให้ยางผสมมีความแข็งเพิ่มขึ้นและมีความเปราะมากขึ้นทำให้ความสามารถในการรับแรงที่มากระทำจึงลดลงจึงส่งผลต่อค่า Modulus ของยางผสมนั่นเอง

4.5 การทดสอบความทนทานต่อของเหลว

4.5.1 การทดสอบการบวมตัวต่อน้ำมัน

ตารางที่ 4.14 แสดงค่าการบวมตัวของยางผสมระหว่าง NR / NBR ภายหลังจากแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

อัตราส่วน NR / NBR	% การบวมตัว			
	น้ำมันแก๊ส โซฮอล์ 91	น้ำมันแก๊ส โซฮอล์ 95	น้ำมันแก๊ส โซฮอล์ E20	น้ำมันแก๊ส โซฮอล์ E85
100/0	201.98	201.31	207.14	11.85
80/20	268.61	210.58	159.53	12.69
70/30	168.40	185.83	126.60	15.69
60/40	140.23	168.37	119.69	16.78
50/50	140.06	141.22	127.07	20.43
40/60	125.87	132.38	128.38	20.88
30/70	109.65	124.92	126.68	25.28
20/80	97.51	105.45	86.96	26.66
0/100	63.80	70.79	91.09	32.81

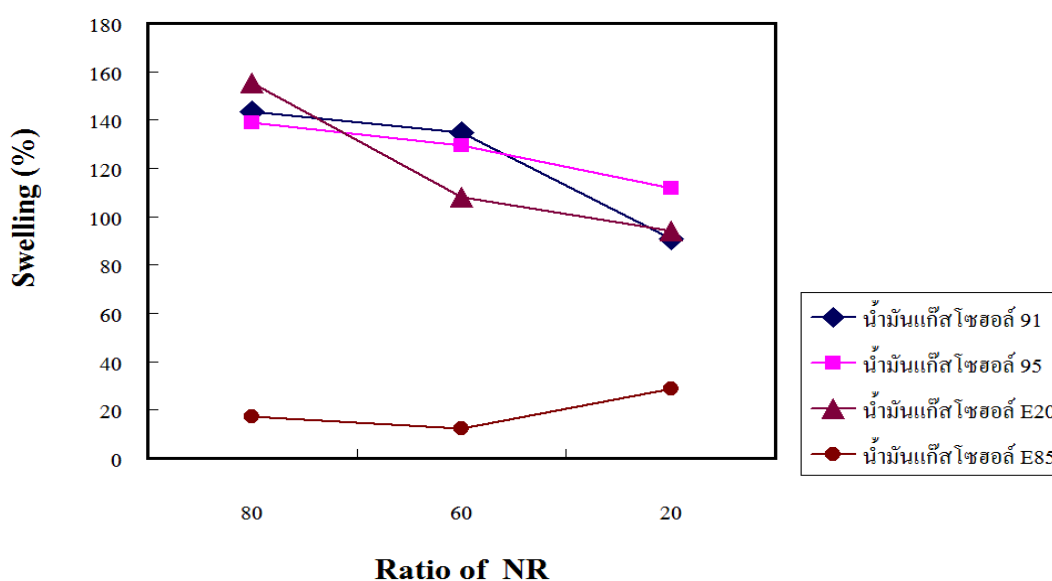


รูปที่ 4.16 กราฟการเปรียบเทียบค่าการบวมตัวของยางผสมภายหลังแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์

จากผลการทดสอบการบวมตัวของยางผสมที่แสดงเป็นตารางและกราฟพบว่า การบวมตัวของยางผสมในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ 91, 95 และ E 20 ค่าการบวมตัวของยางผสมมีค่าลดลงเมื่อปริมาณยางธรรมชาติลดลงทั้งที่เราต้องการที่จะนำยางธรรมชาติมาผสมเพื่อลดความเป็นขี้วให้กับยางอะครีโลไนไตรล์บิวตะไดอินซึ่งจะส่งผลทำให้ยางตัวนี้สามารถต้านทานต่อน้ำมันแก๊สโซฮอล์ได้ดีขึ้นเป็นผลมาจากน้ำมันแก๊สโซฮอล์ 91, 95 และ E 20 มีปริมาณแอลกอฮอล์ผสมอยู่ในปริมาณที่น้อยส่งผลให้น้ำมันแก๊สโซฮอล์ 91, 95 และ E 20 มีความเป็นขี้วน้อยมากเมื่อเทียบกับน้ำมันแก๊สโซฮอล์ E 85 ที่มีปริมาณของแอลกอฮอล์อยู่ถึง 85% ส่งผลทำให้ยางผสมมีค่าการบวมตัวในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิดนี้ มีแนวโน้มมากขึ้นเมื่อปริมาณของยางธรรมชาติลดลงนั่นเอง ซึ่งค่าการบวมตัวที่ได้จากการทดสอบนี้มีค่าการบวมตัวมากแสดงว่าความสามารถในการต้านทานต่อน้ำมันแก๊สโซฮอล์ต่ำและถ้าค่าการบวมตัวในน้ำมันแก๊สโซฮอล์มีค่าน้อยแสดงว่าความสามารถในการต้านทานน้ำมันแก๊สโซฮอล์สูงและเมื่อนำยางผสมมาเติมยาง NR-g-PAN ลงไปแสดงผลดังตาราง 4.15

ตารางที่ 4.15 แสดงค่าการบวมตัวของยางผสมระหว่าง NR / NBR ภายหลังจากแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์
ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ภายหลังจากเติมยาง NR-g-PAN ลงไปที่ 5 phr

อัตราส่วน NR / NBR	% การบวมตัว			
	น้ำมันแก๊ส โซฮอล์ 91	น้ำมันแก๊ส โซฮอล์ 95	น้ำมันแก๊ส โซฮอล์ E20	น้ำมันแก๊ส โซฮอล์ E85
80/20	143.27	138.94	155.18	17.37
60/40	134.91	129.48	108.03	12.39
20/80	90.82	111.69	94.14	28.79



รูปที่ 4.17 แสดงกราฟการเปรียบเทียบค่าการบวมตัวของยางผสมภายหลังจากแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์
ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ภายหลังจากเติมยาง NR-g-PAN

ผลการทดสอบยางผสมที่เติมยาง NR-g-PAN ลงไปแล้วพบว่าค่าการบวมตัวในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ 91, 95, E20 และ E85 มีแนวโน้มของค่าการบวมตัวเช่นเดียวกับค่าการบวมตัวของยางผสมที่ไม่ได้เติมยาง NR-g-PAN ลงไป แต่ค่าการบวมตัวของยางผสมที่เติมยาง NR-g-PAN ลงไปมีค่าการบวมตัวลดลงสามารถเปรียบเทียบได้ดังตาราง 4.17 ต่อไปนี้

ตารางที่ 4.17 แสดงการเปรียบเทียบค่าการบวมตัวของยางผสมที่อัตราส่วนต่าง ๆ

อัตราส่วน NR / NBR / NR-g-PAN	% การบวมตัว			
	น้ำมันแก๊ส โซฮอล์ 91	น้ำมันแก๊ส โซฮอล์ 95	น้ำมันแก๊ส โซฮอล์ E20	น้ำมันแก๊ส โซฮอล์ E85
80/20/0	268.61	210.58	159.53	12.69
80/20/5	143.27	138.94	155.18	17.37
60/40/0	140.23	168.37	119.69	16.78
60/40/5	134.91	129.48	108.03	12.39
20/80/0	97.51	105.45	86.96	26.66
20/80/5	90.82	111.69	94.14	28.79

ซึ่งจากผลที่เปรียบเทียบกันนั้นแสดงให้เห็นว่าการที่เติมยาง NR-g-PAN ลงไปในยางผสม เข้าไปช่วยทำให้ยางผสมมีความสามารถในการต้านทานต่อน้ำมันแก๊สโซฮอล์ได้ดีขึ้นเนื่องจากยาง NR-g-PAN เข้าไปช่วยทำให้ส่วนของยางธรรมชาติมีความเป็นขี้วมากยิ่งขึ้นดังนั้นเมื่อนำยางผสมไปแช่ในน้ำมันแก๊สโซฮอล์จึงทำให้ยางผสมสามารถต้านทานต่อน้ำมันแก๊สโซฮอล์ได้ดีขึ้น

4.5.2 การทดสอบการบวมตัวต่อน้ำมันไบโอดีเซล

ตารางที่ 4.18 แสดงค่าการบวมตัวของยางผสมระหว่าง NR / NBR ภายหลังแช่น้ำมันไบโอดีเซลที่อัตราส่วนต่าง ๆ

อัตราส่วน NR / NBR	% การบวมตัว			
	น้ำมัน B0	น้ำมัน B5	น้ำมัน B40	น้ำมัน B100
100/0	141.59	137.34	140.42	145.82
80/20	120.11	110.56	117.13	115.47
70/30	97.47	94.42	95.56	91.64
60/40	55.89	58.98	61.09	55.93
50/50	47.27	51.45	46.42	44.23
40/60	22.07	19.46	16.78	24.20
30/70	10.14	13.33	14.74	13.63
20/80	8.46	8.00	9.84	14.84
0/100	7.27	7.37	9.09	11.53

จากผลการทดสอบการบวมตัวของยางผสมที่แสดงเป็นตารางที่ 4.18 พบว่าการบวมตัวของยางธรรมชาติมีค่ามากที่สุด และการบวมตัวของยาง NBR มีค่าน้อยที่สุด และยางผสมระหว่าง NR/NBR ค่าการบวมตัวของยางผสมแช่น้ำมันไบโอดีเซล มีค่าลดลงเมื่อปริมาณยางธรรมชาติลดลง ซึ่งค่าการบวมตัวที่ได้จากการทดสอบนี้มีค่าการบวมตัวมากแสดงว่าความสามารถในการต้านทานต่อน้ำมันต่ำและถ้าค่าการบวมตัวในน้ำมันมีค่าน้อยแสดงว่าความสามารถในการต้านทานน้ำมันสูง ทั้งนี้เนื่องมาจากความเป็นขั้วนั่นเอง ยาง NR ไม่มีความเป็นขั้วทำให้สมบัติในการต้านทานน้ำมันที่ไม่มีขั้ว (น้ำมันดีเซล) ต่ำ โดยสามารถจัดเรียงความเป็นขั้วคือ NBR > NR/NBR / NR นั่นคือ ยางที่มีความเป็นขั้วสูงจะมีความสามารถในการต้านทานต่อน้ำมันดีเซลสูง จากนั้นเราทดสอบการบวมตัวในน้ำมันโดยนำยางผสมมาเติมยาง NR-g-PAN ลงไปแสดงผลดังตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.19 แสดงค่าการบวมตัวของยางผสมระหว่าง NR / NBR ภายหลังแช่น้ำมัน

ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ภายหลังจากเติมยาง NR-g-PAN ลงไปที่ 5 phr

อัตราส่วน NR / NBR/NR-g-NBR	% การบวมตัว			
	น้ำมัน B0	น้ำมัน B5	น้ำมัน B40	น้ำมัน B100
80/20	89.11	84.56	88.21	87.74
60/40	36.54	40.73	39.94	41.42
20/80	4.15	4.67	5.78	6.59

ผลการทดสอบยางผสมที่เติมยาง NR-g-PAN ลงไป 5 phr แล้วพบว่าค่าการบวมตัวในน้ำมันไบโอดีเซลและดีเซล มีแนวโน้มของค่าการบวมตัวลดลงเมื่อเทียบกับยางผสมที่ไม่ได้เติมยาง NR-g-PAN ลงไป ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเติมยาง NR-g-PAN สามารถเข้าไปช่วยประสานการเข้ากันได้ของยาง NR และ NBR ได้มากขึ้น

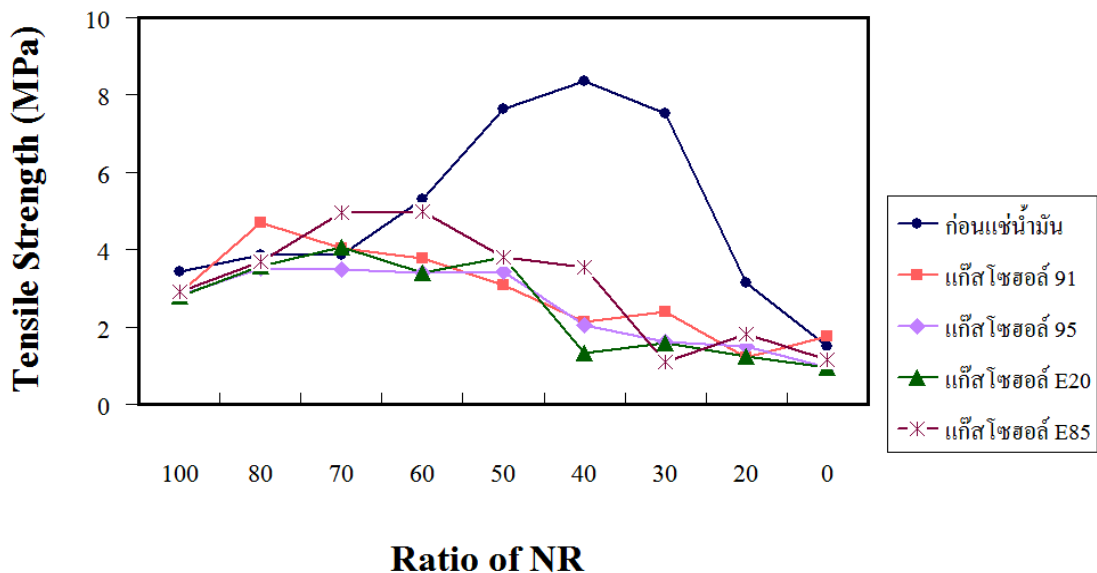
โดยในการทดสอบพบว่าการบวมตัวของยางธรรมชาติ ยางอะคลิโนไนไตรล์และยางผสม NR/NBR นั้นมีแนวโน้มคล้ายกัน และจะทดสอบสมบัติทางกลของยางหลังการแช่น้ำมันเฉพาะแก๊สโซฮอล์ต่อไป

4.5.3 การทดสอบสมบัติเชิงกลของยางผสมภายหลังแช่น้ำมัน

4.5.3.1 ผลการทดสอบค่า Tensile Strength

ตารางที่ 4.20 แสดงค่า Tensile Strength ของยางผสมระหว่าง NR / NBR ภายหลังแช่น้ำมัน

อัตราส่วน NR / NBR	ค่า Tensile Strength (MPa)			
	น้ำมัน แก๊สโซฮอล์ 91	น้ำมัน แก๊สโซฮอล์ 95	น้ำมัน แก๊สโซฮอล์ E20	น้ำมัน แก๊สโซฮอล์ E85
100/0	2.8688	2.8252	2.7981	2.9026
80/20	4.7006	3.5297	3.5594	3.6603
70/30	4.0425	3.4884	4.0666	4.9452
60/40	3.7817	3.3955	3.3947	4.9977
50/50	3.0748	3.4435	3.8049	3.7912
40/60	2.1318	2.0526	1.3181	3.5460
30/70	2.3915	1.6204	1.5765	1.0819
20/80	1.2147	1.4937	1.2249	1.8034
0/100	1.7465	0.9443	0.9579	1.1511



รูปที่ 4.18 แสดงกราฟค่า Tensile Strength ของยางผสมภายหลังแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์

จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าค่า Tensile Strength ของยางผสมภายหลังแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์พบว่าค่า Tensile Strength มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของยางธรรมชาติลดลงและเมื่อเทียบกับค่า Tensile Strength ของยางผสมที่ไม่ได้ผ่านการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์จะเห็นได้ว่าค่า Tensile Strength

ของยางผสมที่ผ่านการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ส่วนใหญ่มีค่า Tensile Strength ลดลงเป็นผลมาจากน้ำมันแก๊สโซฮอล์เข้าไปแทรกอยู่ในโมเลกุลของยางธรรมชาติทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของยางมีค่าลดลงจึงส่งผลต่อสมบัติของยางผสมคือค่า Tensile Strength ของยางผสมมีค่าลดลงเมื่อเติมยาง NR-g-PAN ลงไปสามารถเปรียบเทียบค่า Tensile Strength ดังตาราง 4.21

ตารางที่ 4.21 แสดงค่าความต้านทานแรงดึงของยางผสมภายหลังแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์หลังจากเติมยาง NR-g-PAN ลงไปที่ 5 phr

อัตราส่วน NR / NBR / NR-g-PAN	ค่า Tensile Strength (MPa)			
	น้ำมันแก๊ส โซฮอล์ 91	น้ำมันแก๊ส โซฮอล์ 95	น้ำมันแก๊ส โซฮอล์ E20	น้ำมันแก๊ส โซฮอล์ E85
80/20/0	4.7006	3.5297	3.5594	3.6603
80/20/5	0.9073	1.0201	1.1598	2.9368
60/40/0	3.7817	3.3955	3.3947	4.9977
60/40/5	0.9924	0.8929	1.1629	2.0139
20/80/0	1.2147	1.4937	1.2249	1.8034
20/80/5	0.7019	0.5179	0.5008	0.6604

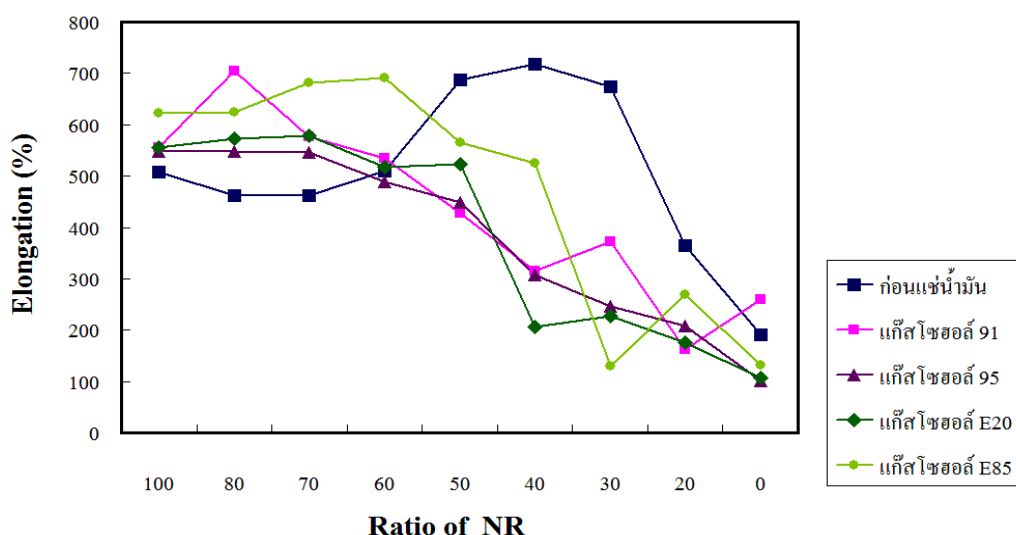
จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่า Tensile Strength ของยางผสมที่เติมยาง NR-g-PAN ลงไปมีค่าลดลงทั้งที่สามารถต้านทานต่อน้ำมันแก๊สโซฮอล์ได้ดีกว่ายางผสมที่ไม่ได้เติมยาง NR-g-PAN จากการทดสอบการบวมตัวที่ผ่านมาเป็นผลมาจากยางผสมที่เติมยาง NR-g-PAN ลงไปมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นจึงมีความเปราะมากขึ้นด้วยทำให้ความสามารถในการต้านทานแรงดึงจึงต่ำลง

4.5.3.2 ผลการทดสอบค่า Elongation

ตารางที่ 4.22 แสดงค่า Elongation ของยางผสมระหว่าง NR / NBR ภายหลังแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์

อัตราส่วน NR / NBR	ค่า Elongation at break (%)			
	น้ำมัน แก๊สโซฮอล์ 91	น้ำมัน แก๊สโซฮอล์ 95	น้ำมัน แก๊สโซฮอล์ E20	น้ำมัน แก๊สโซฮอล์ E85
100/0	554.71	548.79	555.14	622.65
80/20	705.35	548.39	572.77	624.71
70/30	576.75	545.75	579.37	681.39
60/40	535.24	489.35	516.81	691.18

50/50	427.57	448.86	523.44	565.41
40/60	315.98	307.81	206.09	525.44
30/70	371.55	246.66	228.11	130.24
20/80	162.28	208.61	175.73	269.11
0/100	259.49	100.38	106.36	132.15



รูปที่ 4.19 แสดงกราฟค่า Elongation ของยางผสมภายหลังแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์

จากผลการทดสอบข้างต้นพบว่าค่า Elongation at break ของยางผสมมีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่า Tensile Strength คือ ค่า Elongation at break ส่วนใหญ่ของยางผสมมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของยางธรรมชาติลดลงเป็นผลมาจากยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูงมากจึงส่งผลทำให้ยางผสมที่มียางธรรมชาติผสมอยู่ในปริมาณมาก ๆ จึงมีค่า Elongation at break สูงตามไปด้วยแต่จากกราฟจะเห็นได้ว่าค่า Elongation at break ของยางผสมภายหลังแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์มีค่าน้อยกว่ายางผสมที่ไม่ผ่านการแช่น้ำมันเป็นผลมาจากน้ำมันแก๊สโซฮอล์เข้าไปแทรกอยู่ในโครงสร้างหรืออนุภาคของยางส่งผลให้สมบัติของยางผสมเกิดการเปลี่ยนแปลงคือมีความเปราะมากขึ้นและเมื่อนำยางผสมมาเติมยาง NR-g-PAN ลงไปและนำค่า Elongation at break มาเปรียบเทียบกับยางผสมที่ไม่ได้เติมยาง NR-g-PAN ภายหลังจากแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์แสดงดังตาราง

ตารางที่ 4.23 แสดงค่า Elongation at break ของยางผสมภายหลังแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ภายหลังจากเติมยาง NR-g-PAN ลงไปที่ 5 phr

อัตราส่วน NR / NBR / NR-g-PAN	ค่า Elongation at break (%)			
	น้ำมัน แก๊สโซฮอล์ 91	น้ำมัน แก๊สโซฮอล์ 95	น้ำมัน แก๊สโซฮอล์ E20	น้ำมัน แก๊สโซฮอล์ E85
80/20/0	705.35	548.39	572.77	624.71
80/20/5	177.49	226.65	223.12	498.12
60/40/0	535.24	489.35	516.81	691.18
60/40/5	131.37	150.33	198.58	341.14
20/80/0	162.28	208.61	175.73	269.11
20/80/5	82.87	46.03	57.39	62.62

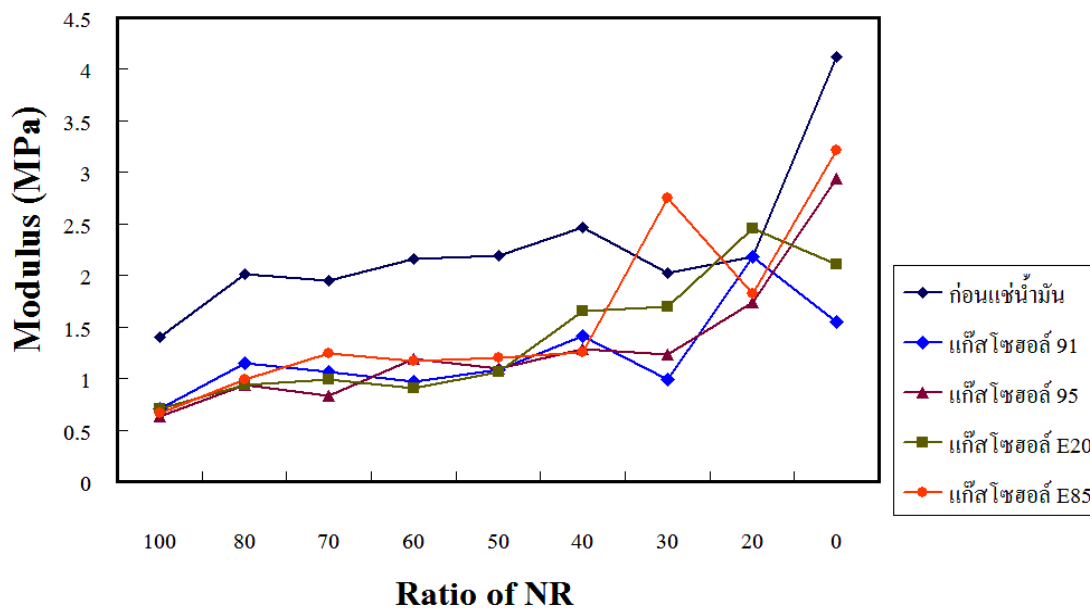
พบว่าค่า Elongation ของยางผสมที่เติมยาง NR-g-PAN ลงไปทำให้ยางผสมมีค่า Elongation at break ลดลงเป็นผลมาจากยางผสมที่เติมยาง NR-g-PAN ลงไปมีความแข็งมากยิ่งขึ้นและมีความเป็นขี้วมมากขึ้น เมื่อนำไปแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ก็ทำให้สมบัติของยางผสมมีความแข็งเพิ่มขึ้นไปอีกทำให้เมื่อมีแรงเข้ามากระทำยางผสมจึงเปราะและแตกง่ายกว่าปกติดังนั้นค่า Elongation at break จึงลดลงตามลำดับ

4.5.3.3 ผลการทดสอบค่า Modulus

ตารางที่ 4.24 แสดงค่า Modulus ของยางผสมระหว่าง NR / NBR ภายหลังแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

อัตราส่วน NR / NBR	ค่า Modulus (MPa)			
	น้ำมัน แก๊สโซฮอล์ 91	น้ำมัน แก๊สโซฮอล์ 95	น้ำมัน แก๊สโซฮอล์ E20	น้ำมัน แก๊สโซฮอล์ E85
100/0	0.7103	0.6319	0.7032	0.6656
80/20	1.1446	0.9373	0.9341	0.9923
70/30	1.0626	0.8294	0.9880	1.2438
60/40	0.9711	1.1891	0.9106	1.1652
50/50	1.0829	1.0916	1.0671	1.2006

40/60	1.4091	1.2857	1.6579	1.2546
30/70	0.9875	1.2330	1.6989	2.7492
20/80	2.1841	1.7434	2.4508	1.8255
0/100	1.5513	2.9366	2.1113	3.2126



รูปที่ 4.20 แสดงกราฟค่า Modulus ของยางผสมภายหลังแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์

จากการทดสอบค่า Modulus ของยางผสมภายหลังแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์และเปรียบเทียบกับยางผสมที่ไม่ผ่านการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์พบว่าค่า Modulus ของยางผสมส่วนใหญ่ภายหลังแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์มีค่าน้อยกว่าค่า Modulus ของยางผสมที่ไม่ผ่านการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์แต่แนวโน้มของค่า Modulus ของยางผสมภายหลังแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของยางธรรมชาติลดลงเนื่องจากยางผสมในส่วนของยางอะคริโลไนไตรล์บิวตะไดอินจะเป็นยางที่มีความแข็งสูงทำให้เกิดการเสียรูปร่างได้ยากเมื่อมีแรงมากระทำ ส่งผลทำให้ยางผสมที่มียางอะคริโลไนไตรล์บิวตะไดอินผสมอยู่ในปริมาณมาก ๆ จึงทำให้มีค่า Modulus สูงตามไปด้วย ซึ่งเมื่อนำยางผสมมาเติมยาง NR-g-PAN ลงไปได้ผลดังตารางข้างล่าง

ตารางที่ 4.25 แสดงค่า Modulus ของยางผสมภายหลังแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ
 ภายหลังจากเติมยาง NR-g-PAN ลงไปที่ 5 phr

อัตราส่วน NR / NBR / NR-g-PAN	ค่า Modulus (MPa)			
	น้ำมัน แก๊สโซฮอล์ 91	น้ำมัน แก๊สโซฮอล์ 95	น้ำมัน แก๊สโซฮอล์ E20	น้ำมัน แก๊สโซฮอล์ E85
80/20/0	1.1446	0.9373	0.9341	0.9923
80/20/5	0.9564	0.8793	1.0184	1.0122
60/40/0	0.9711	1.1891	0.9106	1.1652
60/40/5	1.2471	1.0041	1.0663	1.2349
20/80/0	2.1841	1.7434	2.4508	1.8255
20/80/5	1.4638	1.6956	2.0022	1.5090

พบว่าค่า Modulus ของยางผสมที่เติม NR-g-PAN มีค่าลดลงเป็นผลมาจากยาง NR-g-PAN
 เข้าไปเพิ่มความแข็งให้กับยางผสมส่งผลให้ยางผสมมีความเปราะมากขึ้นจึงทำให้รับแรงได้น้อยลง
 ดังนั้นค่า Modulus จึงมีค่าน้อยตามไปด้วย

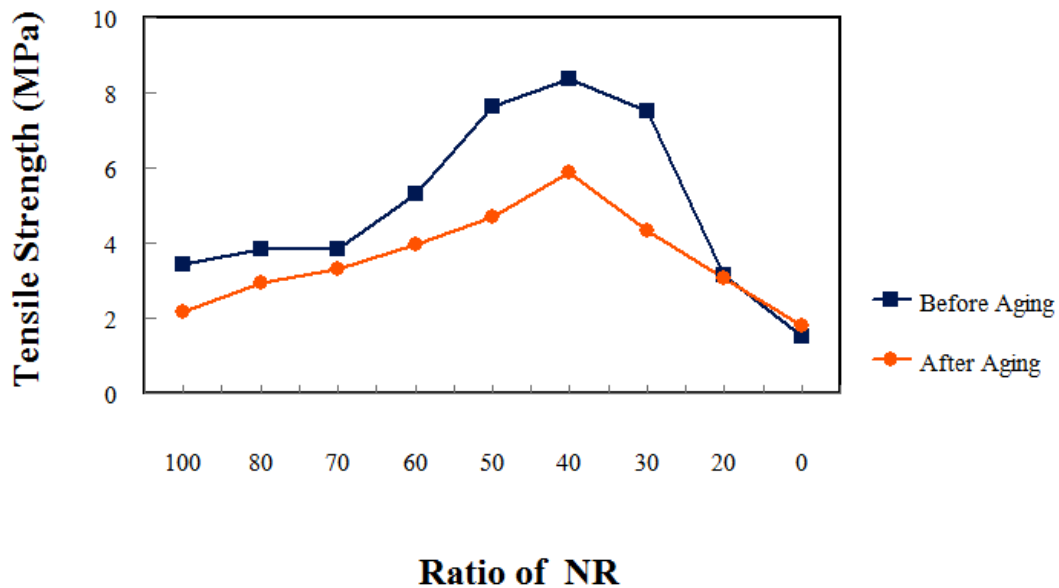
4.6 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

4.6.1 การทดสอบ Aging Properties

4.6.1.1 ผลการทดสอบค่า Tensile Strength หลังการบ่มเร่ง

ตารางที่ 4.26 แสดงค่าความต้านทานแรงดึงหลังการบ่มเร่งของยางผสมระหว่าง NR / NB

อัตราส่วน NR / NBR	ค่าความต้านทานแรงดึง (MPa)
100/0	2.1613
80/20	2.9373
70/30	3.2969
60/40	3.9504
50/50	4.6798
40/60	5.8664
30/70	4.3354
20/80	3.0656
0/100	1.8112

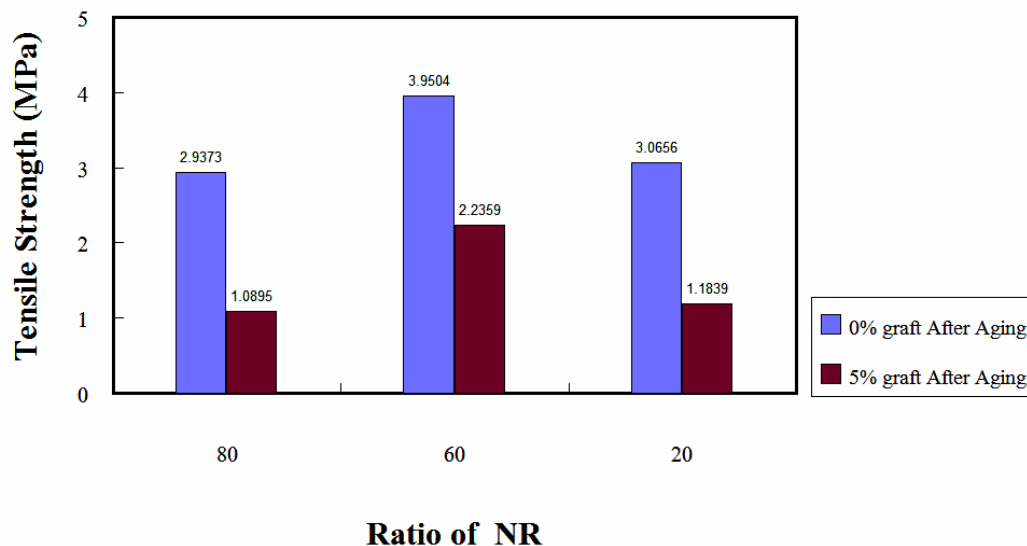


รูปที่ 4.21 แสดงกราฟค่า Tensile Strength ของยางผสม

จากผลการทดสอบพบว่าค่า Tensile Strength ของยางผสมหลังการบ่มเร่งมีค่าลดลงกว่าค่า Tensile Strength ของยางที่ไม่ผ่านการบ่มเร่งเป็นผลมาจากในโครงสร้างของยางผสมมีส่วนที่เป็นยางธรรมชาติอยู่ซึ่งในโครงสร้างของยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่เป็นจำนวนมาก เมื่อได้รับความร้อนจึงไม่เสถียรต่อความร้อนทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ได้ง่ายโดยสังเกตได้จากกราฟในอัตราส่วนที่ NR 20%หรือที่ NR 0% พบว่าค่า Tensile Strength ของยางผสมที่ผ่านการบ่มเร่งมีค่าใกล้เคียงกับค่า Tensile Strength ของยางผสมที่ไม่ผ่านการบ่มเร่งแต่มีแนวโน้มของค่า Tensile Strength เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของยางธรรมชาติลดลงและมีค่าสูงที่สุดที่ NR 40% และเมื่อนำยางผสมมาเติมยาง NR-g-PAN ลงไปแสดงผลดังตาราง 4.27

ตารางที่ 4.27 แสดงค่าความต้านทานแรงดึงหลังการบ่มเร่งของยางผสมระหว่าง NR / NBR ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ภายหลังจากเติมยาง NR-g-PAN ลงไปที่ 5 phr

อัตราส่วน NR / NBR	ค่าความต้านทานแรงดึง (MPa)
80/20	1.0895
60/40	2.2359
20/80	1.1839



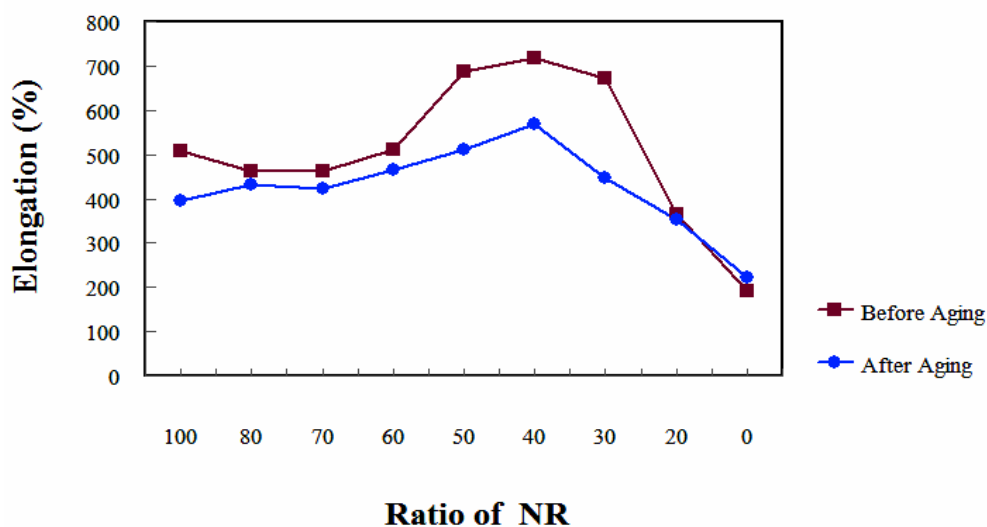
รูปที่ 4.22 แสดงกราฟการเปรียบเทียบค่า Tensile Strength ของยางผสม

จากผลการทดสอบค่า Tensile Strength หลังการบ่มเร่งมาเปรียบเทียบกันระหว่างยางผสมที่เติม NR-g-PAN กับยางผสมที่ไม่เติม NR-g-PAN พบว่า ค่า Tensile Strength ของยางผสมที่เติมยาง NR-g-PAN มีค่าลดลงเป็นผลมาจากยาง NR-g-PAN เข้าไปเพิ่มความแข็งให้กับยางผสมส่งผลให้ยางผสมมีความเปราะมากขึ้นได้ดังนั้นจึงสามารถรับแรงได้น้อยทำให้ค่า Tensile Strength ออกมาน้อยตามไปด้วย

4.6.1.2 ผลการทดสอบค่า Elongation at break

ตารางที่ 4.28 แสดงค่า Elongation at break หลังการบ่มเร่งของยางผสมระหว่าง NR / NBR

อัตราส่วน NR / NBR	ค่า Elongation at break (%)
100/0	395.00
80/20	431.50
70/30	421.69
60/40	464.16
50/50	510.52
40/60	569.44
30/70	446.54
20/80	354.16
0/100	220.88

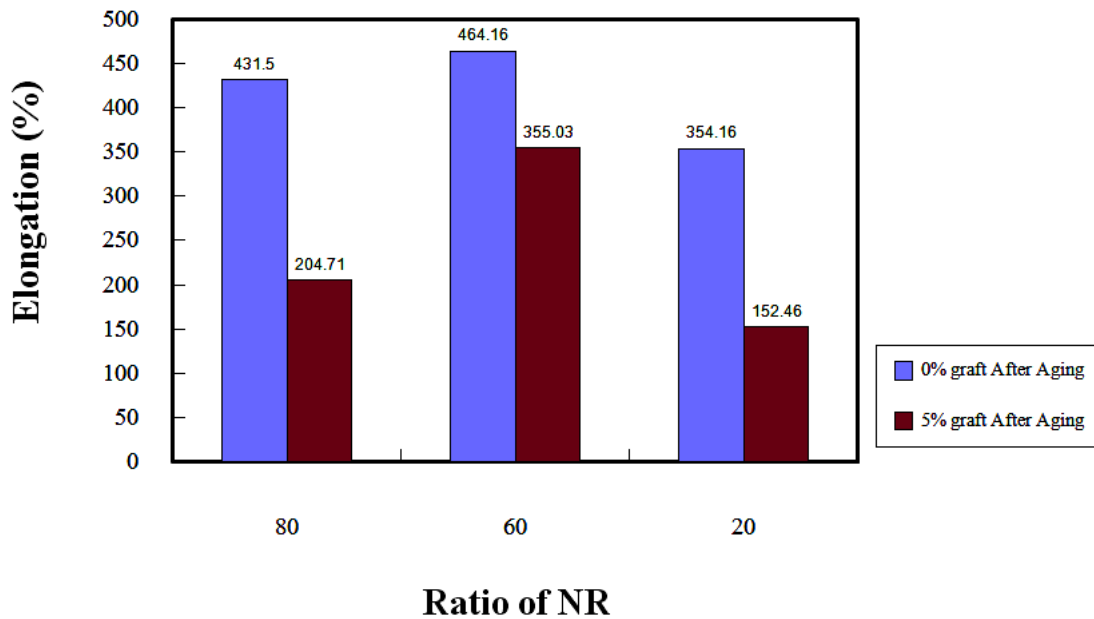


รูปที่ 4.23 แสดงกราฟค่า Elongation at break ของยางผสม

จากผลการทดสอบจะได้ค่า Elongation at break ของยางผสมภายหลังการบ่มเร่งมีค่าลดลงกว่าค่า Elongation at break ของยางผสมที่ไม่ผ่านการบ่มเร่งเป็นผลมาจากความไม่เสถียรต่อความร้อนของยางธรรมชาติในโครงสร้างของยางผสมจึงส่งผลต่อค่า Elongation at break ของยางผสม และเมื่อเติมยาง NR-g-PAN ลงไปได้ผลดังตาราง

ตารางที่ 4.29 แสดงค่า Elongation at break หลังการบ่มเร่งของยางผสมระหว่าง NR / NBR ในอัตราส่วนต่าง ๆ ภายหลังจากเติมยาง NR-g-PAN ลงไปที่ 5 phr

อัตราส่วน NR / NBR	ค่า Elongation (%)
80/20	204.71
60/40	355.03
20/80	152.46



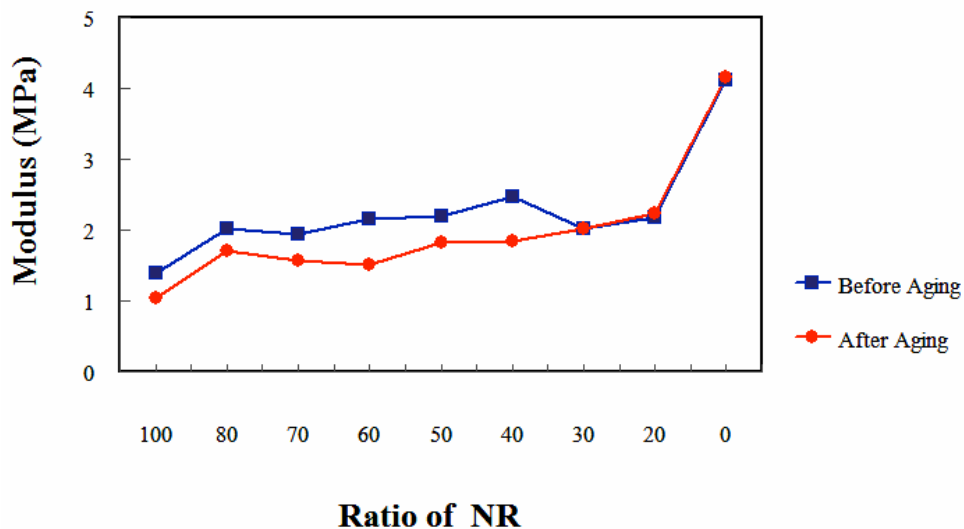
รูปที่ 4.24 แสดงกราฟการเปรียบเทียบค่า Elongation ของยางผสม

และจากการนำค่าที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกันนั้นพบว่าค่า Elongation at break ของยางผสมที่เติม NR-g-PAN ลงไปมีค่าลดลงกว่าค่า Elongation at break ของยางผสมที่ไม่ได้เติมยาง NR-g-PAN จากงานวิจัยของคุณวิรุทธ ตุ่มประเสริฐกล่าวว่าที่ค่า Elongation at break มีค่าลดลงเป็นผลมาจากยางผสมมีความแข็งเพิ่มขึ้นและมีความเป็นฉนวนเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ยางผสมมีความเปราะยิ่งขึ้นจึงสามารถยืดตัวได้น้อยลงเพราะเกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลน้อยเป็นผลมาจากเกิดกลไกการเพิ่มความเหนียวได้น้อยลงซึ่งกลไกการเพิ่มความเหนียว ได้แก่ Energy Absorption คือการถ่ายทอดแรงไปยังอนุภาคของยาง ซึ่งมีความยืดหยุ่นตัวสูงและจะสามารถดูดซับพลังงานที่มากระทำไว้ได้มากและ Matrix Crazing คืออนุภาคของยางที่กระจายตัวทั่วไปบนยางผสมจะเป็นจุดรวมแรงและทำให้เกิดรอยแยก โดยรอยแยกจะเป็นตัวกระจายแรงให้เกิดสมาธิรับแรงได้มากขึ้น

4.6.1.3 ผลการทดสอบค่า Modulus

ตารางที่ 4.30 แสดงค่า Modulus หลังการบ่มแรงของยางผสมระหว่าง NR / NBR ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

อัตราส่วน NR / NBR	ค่า Modulus (MPa)
100/0	1.0401
80/20	1.6990
70/30	1.5645
60/40	1.5177
50/50	1.8149
40/60	1.8398
30/70	2.0294
20/80	2.2354
0/100	4.1536

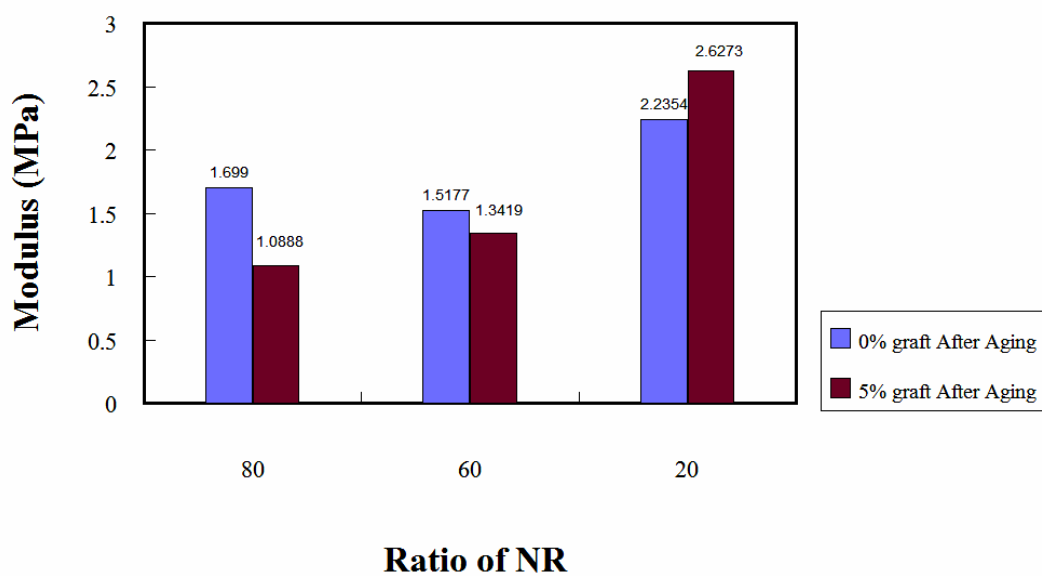


รูปที่ 4.25 แสดงกราฟค่า Modulus ของยางผสม

จากผลการทดสอบค่า Modulus ของยางผสมภายหลังการบ่มแรงเปรียบเทียบกับยางผสมก่อนการบ่มแรงพบว่าค่า Modulus มีค่าลดลงเป็นผลมาจากพันธะคู่ในโครงสร้างของยางธรรมชาติถูกทำลายด้วยความร้อนเพราะพันธะคู่จะไม่เสถียรต่อความร้อนทำให้ค่าที่ทดสอบออกมามีค่าลดลงแต่อย่างไรก็ตามแนวโน้มของค่า Modulus ก็เป็นไปในทิศทางเดียวกันคือมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของยางธรรมชาติลดลงตามลำดับและเมื่อเติมยาง NR-g-PAN ลงไปแสดงผลดังตาราง

ตารางที่ 4.31 แสดงค่า Modulus หลังการบ่มเร่งของยางผสมระหว่าง NR / NBR ในอัตราส่วนต่าง ๆ ภายหลังจากเติมยาง NR-g-PAN ลงไปที่ 5 phr

อัตราส่วน NR / NBR	ค่า Modulus (MPa)
80/20	1.0888
60/40	1.3419
20/80	2.6273



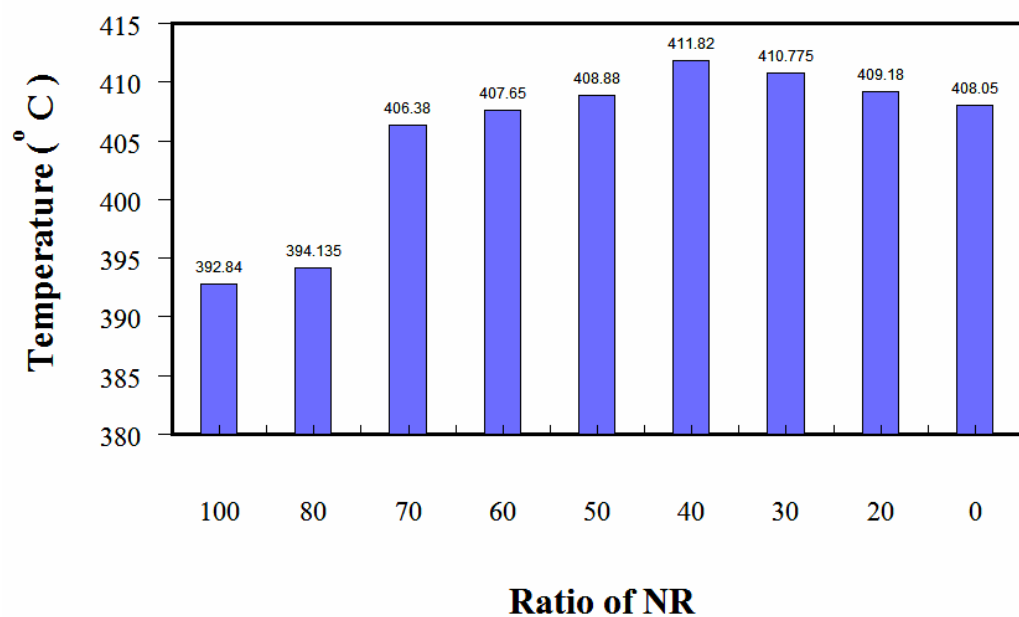
รูปที่ 4.26 แสดงกราฟการเปรียบเทียบค่า Modulus ของยางผสม

พบว่าค่า Modulus ยางผสมที่เติม NR-g-PAN นั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของยางธรรมชาติลดลงเป็นผลมาจากโครงสร้างในส่วนonyางอะครีโลไนไตรล์บิวตะไดอินมีความแข็งแรงกว่าจึงทำให้ยางผสมมีความคงรูปได้มากกว่าเมื่อมีแรงมากระทำนั่นเอง

4.6.2 ผลการทดสอบ Thermogravimetric Analyzer (TGA)

ตารางที่ 4.32 แสดงค่าความต้านทานการเสื่อมสภาพด้วยความร้อนของยางผสมระหว่าง NR / NBR

อัตราส่วน NR / NBR	ค่าความต้านทานการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน (° C)
100/0	392.84
80/20	394.135
70/30	406.38
60/40	407.65
50/50	408.88
40/60	411.82
30/70	410.775
20/80	409.18
0/100	408.05

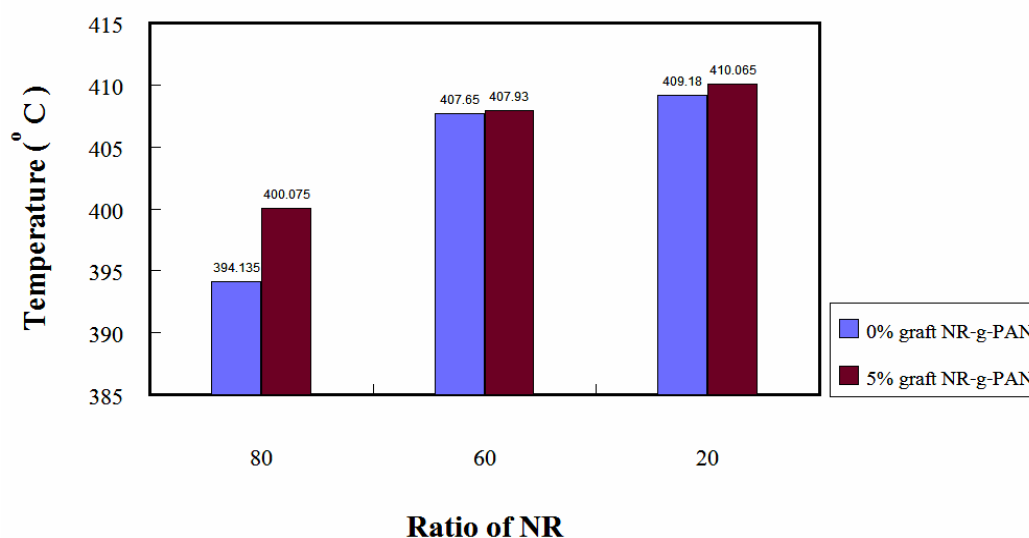


รูปที่ 4.27 แสดงกราฟค่าความต้านทานการเสื่อมสภาพด้วยความร้อนของยางผสม

จากตารางและกราฟที่แสดงผลการทดสอบพบว่ายางผสมมีแนวโน้มของค่าความต้านทานการเสื่อมสภาพด้วยความร้อนที่สูงขึ้นเมื่อปริมาณของยางธรรมชาติลดลงและมีค่าสูงที่สุดที่ NR 40% ก็สามารถทนอุณหภูมิได้ถึง 411.82 °C เป็นผลมาจากยางธรรมชาติและยางอะคริโลไนไตรล์บิวตะไดอินสามารถกระจายตัวได้ดีที่สุดในโครงสร้างของยางผสมและเมื่อนำยางผสมมาเติมยาง NR-g-PAN ลงไปแสดงผลดังตาราง

ตารางที่ 4.33 แสดงค่าความต้านทานการเสื่อมสภาพด้วยความร้อนของยางผสมระหว่าง NR / NBR ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ภายหลังจากเติมยาง NR-g-PAN ลงไปที่ 5 phr

อัตราส่วน NR / NBR	ค่าความต้านทานการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน (°C)
80/20	400.075
60/40	407.930
20/80	410.065



รูปที่ 4.28 แสดงกราฟค่าความต้านทานการเสื่อมสภาพด้วยความร้อนของยางผสมที่อัตราส่วนต่าง ๆ ภายหลังจากเติมยาง NR-g-PAN ลงไปที่ 5 phr

พบว่าภายหลังจากที่เติมยาง NR-g-PAN ลงไปทำให้ยางผสมมีค่าความต้านทานการเสื่อมสภาพด้วยความร้อนเพิ่มสูงขึ้น เป็นผลมาจากยาง NR-g-PAN เข้าไปเพิ่มความเป็นขั้วให้กับยางธรรมชาติส่งผลให้ยางธรรมชาติสามารถผสมเข้ากับยางอะคริโลไนไตรล์บิวตะไดอินได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยาง NR-g-PAN ยังมีส่วนของโพลีอะคริโลไนไตรล์ที่สามารถทนความร้อนได้สูงเข้ามาช่วยทำให้ยางผสมสามารถทนความร้อนได้สูงเพิ่มขึ้นอีกจึงทำให้ค่าที่ออกมามีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามลำดับ

4.7 การทดสอบยางคอมปาวด์หลังเติมสารเติมแต่ง

4.7.1 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties)

ตาราง 4.34 แสดงสมบัติทางกลของตัวอย่าง C1, C2, C3, C4, C5 และ C6

สมบัติ	ตัวอย่างทดสอบ						ค่าความไม่แน่นอน	วิธีทดสอบ
	C1	C2	C3	C4	C5	C6		
ความแข็ง (Shore A)	39	37	37	39	40	35	-	ASTM D 2240
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 100 (MPa)	0.8	0.7	0.7	0.8	0.8	0.6	-	ISO 37 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 200 (MPa)	1.2	1.2	1.1	1.2	1.2	0.9	-	ISO 37 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 300 (MPa)	-	1.8	1.5	1.7	1.8	1.3	-	ISO 37 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 500 (MPa)	-	-	5.8	-	6.4	-	-	ISO 37 (Type 1)
การต้านแรงดึง (MPa)	1.9	4.9	6.4	3.8	7.2	3.5	-	ISO 37 (Type 1)
การทนต่อแรงยืดจนขาด (%)	271	454	521	407	518	486	-	ISO 37 (Type 1)
การบ่มแรงที่ 100 °C, 22 ชม.								
ความแข็ง (Shore A)	31	35	36	38	40	35	-	ASTM D 2240
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 100 (MPa)	0.5	0.7	0.7	0.8	0.8	0.6	-	ISO 37 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 200 (MPa)	0.8	1.0	1.1	1.3	1.3	1.0	-	ISO 37 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 300 (MPa)	1.0	1.5	1.5	1.8	2.0	1.5	-	ISO 37 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 500 (MPa)	2.4	-	5.9	-	5.8	-	-	ISO 37 (Type 1)
การต้านแรงดึง (MPa)	4.6	4.4	6.8	4.3	436	3.9	-	ISO 37 (Type 1)
การทนต่อแรงยืดจนขาด (%)	587	473	515	422		446	-	ISO 37 (Type 1)

หมายเหตุ: C1-C6 เป็นสัญลักษณ์ของแต่ละสูตรดังตารางที่ 3.1

ตาราง 4.35 แสดงสมบัติทางกลของตัวอย่าง C7, C8, C9, C10, C11 และ C12

สมบัติ	ตัวอย่างทดสอบ						ค่าความ ไม่ แน่นอน	วิธีทดสอบ
	C7	C8	C9	C10	C11	C12		
ความแข็ง (Shore A)	40	39	37	35	45	45	-	ASTM D 2240
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 100 (MPa)	0.7	0.7	0.6	0.6	1.0	1.0	-	ISO 37 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 200 (MPa)	1.1	1.1	0.9	0.7	1.4	1.5	-	ISO 37 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 300 (MPa)	1.6	1.6	1.2	0.9	2.1	-	-	ISO 37 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 500 (MPa)	-	-	3.5	1.5	-	-	-	ISO 37 (Type 1)
การต้านแรงดึง (MPa)	5.4	4.9	6.2	5.0	4.0	1.8	-	ISO 37 (Type 1)
การทนต่อแรงยืดจนขาด (%)	483	447	557	728	409	277	-	ISO 37 (Type 1)
การบ่มแรงที่ 100 °C, 22 ชม.								
ความแข็ง (Shore A)	39	39	36	32	46	46	-	ASTM D 2240
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 100 (MPa)	0.8	0.8	0.6	0.6	1.0	1.0	-	ISO 37 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 200 (MPa)	1.2	1.2	0.9	0.7	1.4	1.5	-	ISO 37 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 300 (MPa)	-	-	1.2	0.9	1.9	-	-	ISO 37 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 500 (MPa)	-	-	3.3	1.6	-	-	-	ISO 37 (Type 1)
การต้านแรงดึง (MPa)	1.6	1.5	6.0	3.6	2.3	1.7	-	ISO 37 (Type 1)
การทนต่อแรงยืดจนขาด (%)	261	288	545	639	335	287	-	ISO 37 (Type 1)

หมายเหตุ: C7-C12 เป็นสัญลักษณ์ของแต่ละสูตรดังตารางที่ 3.1

ตาราง 4.36 แสดงสมบัติทางกลของตัวอย่าง C13, C14, C15 และ C16

สมบัติ	ตัวอย่างทดสอบ				ค่าความ ไม่ แน่นอน	วิธีทดสอบ
	C13	C14	C15	C16		
ความแข็ง (Shore A)	47	43	34	47	-	ASTM D 2240
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 100 (MPa)	0.9	0.8	0.6	1.0	-	ISO 37 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 200 (MPa)	1.3	1.0	1.0	1.6	-	ISO 37 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 300 (MPa)	-	1.2	1.4	2.3	-	ISO 37 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 500 (MPa)	-	-	4.0	-	-	ISO 37 (Type 1)
การต้านแรงดึง (MPa)	1.5	1.4	5.9	2.7	-	ISO 37 (Type 1)
การทนต่อแรงยืดจนขาด (%)	230	359	543	328	-	ISO 37 (Type 1)
การบ่มแรงที่ 100 °C, 22 ชม.						
ความแข็ง (Shore A)	46	49	29	48	-	ASTM D 2240
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 100 (MPa)	1.0	1.1	0.5	1.0	-	ISO 37 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 200 (MPa)	-	-	0.7	1.5	-	ISO 37 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 300 (MPa)	-	-	0.9	2.3	-	ISO 37 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 500 (MPa)	-	-	2.0	-	-	ISO 37 (Type 1)
การต้านแรงดึง (MPa)	1.2	1.4	3.7	2.8	-	ISO 37 (Type 1)
การทนต่อแรงยืดจนขาด (%)	172	176	580	348	-	ISO 37 (Type 1)

หมายเหตุ: C13-C16 เป็นสัญลักษณ์ของแต่ละสูตรดังตารางที่ 3.1

ตาราง 4.37 แสดงสมบัติทางกลของตัวอย่างที่เติมด้วย MG 30

สมบัติ	ตัวอย่างทดสอบ			ค่าความ ไม่ แน่นอน	วิธีทดสอบ
	C MG 30 1	C MG 30 2	C MG 30 3		
ความแข็ง (Shore A)	37	40	40	-	ISO 37 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 100 (MPa)	0.7	0.8	0.8	-	ISO 37 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 200 (MPa)	1.0	1.3	1.1	-	ISO 37 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 300 (MPa)	1.5	1.9	1.7	-	ISO 37 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 500 (MPa)	4.7	-	7.3	-	ISO 37 (Type 1)
การต้านแรงดึง (MPa)	6.0	7.0	9.7	-	ISO 37 (Type 1)
การทนต่อแรงยืดจนขาด (%)	525	455	525	-	ISO 37 (Type 1)
การบ่มเร่งที่ 100 °C, 22 ชม.					
ความแข็ง (Shore A)	37	39	41	-	ISO 37 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 100 (MPa)	0.7	0.8	0.8	-	ISO 37 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 200 (MPa)	1.0	1.2	1.3	-	ISO 37 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 300 (MPa)	1.5	1.8	1.9	-	ISO 37 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 500 (MPa)	-	-	-	-	ISO 37 (Type 1)
การต้านแรงดึง (MPa)	4.6	6.5	7.1	-	ISO 37 (Type 1)
การทนต่อแรงยืดจนขาด (%)	467	467	451	-	ISO 37 (Type 1)

หมายเหตุ : ชื่อตัวอย่างการทดสอบนี้เป็นสูตรที่เติม NR/PMMA graft copolymer (MG30)

สูตรที่ 1-3 ดังตารางที่ 3.1

ตาราง 4.38 แสดงสมบัติทางกลของตัวอย่างที่เติมด้วย MG 30

สมบัติ	ตัวอย่างทดสอบ				ค่า ความ ไม่ แน่นอน	วิธีทดสอบ
	C MG 30 4	C MG 30 5	C MG 30 15	C MG 30 16		
ความแข็ง (Shore A)	41	43	35	50	-	ISO 37 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 100 (MPa)	0.8	0.9	0.6	1.5	-	ISO 37 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 200 (MPa)	1.2	1.2	1.0	2.7	-	ISO 37 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 300 (MPa)	1.8	1.8	1.3	-	-	ISO 37 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 500 (MPa)	6.9	5.9	-	-	-	ISO 37 (Type 1)
การต้านแรงดึง (MPa)	8.7	8.4	1.4	2.9	-	ISO 37 (Type 1)
การทนต่อแรงยืดจนขาด (%)	505	535	369	229	-	ISO 37 (Type 1)
การบ่มเร่งที่ 100 °C, 22 ชม.						
ความแข็ง (Shore A)	40	41	35	48	-	ISO 37 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 100 (MPa)	0.8	0.8	0.7	1.3	-	ISO 37 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 200 (MPa)	1.2	1.2	1.1	2.4	-	ISO 37 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 300 (MPa)	1.6	1.7	1.6	-	-	ISO 37 (Type 1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 500 (MPa)	5.7	-	-	-	-	ISO 37 (Type 1)
การต้านแรงดึง (MPa)	5.7	6.0	4.2	3.0	-	ISO 37 (Type 1)
การทนต่อแรงยืดจนขาด (%)	503	466	469	280	-	ISO 37 (Type 1)

หมายเหตุ: ชื่อตัวอย่างการทดสอบนี้เป็นสูตรที่เติม NR/PMMA graft copolymer (MG30)

สูตรที่ 4,5,15,16 ดังตารางที่ 3.1

4.7.2 ผลการทดสอบสมบัติทางกลของยางคอมปาว์ที่เติมสารเติมแต่ง (Filler)

ตาราง 3.39 แสดงสมบัติทางกลของตัวอย่าง S6, S7, S8 และ S9

สมบัติ	ตัวอย่างทดสอบ				ค่าความ ไม่ แน่นอน	วิธีทดสอบ
	S6	S7	S8	S9		
ความแข็ง (Shore A)	51	71	73	55	-	ISO 37 (Type1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 100 (MPa)	1.3	3.4	2.8	1.9	-	ISO 37 (Type1)
การต้านแรงดึง (MPa)	9.5	11.5	9.6	7.6	-	ISO 37 (Type1)
การทนต่อแรงยืดจนขาด (%)	500	380	360	340	-	ISO 37 (Type1)
การบ่มเร่งที่ 100 °C, 22 ชม.						
ความแข็ง (Shore A)	50	72	80	56	-	ISO 37 (Type1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 100 (MPa)	1.2	4.0	4.0	1.9	-	ISO 37 (Type1)
การต้านแรงดึง (MPa)	6.6	11.6	8.2	7.2	-	ISO 37 (Type1)
การทนต่อแรงยืดจนขาด (%)	440	340	240	360	-	ISO 37 (Type1)

ตาราง 3.40 แสดงสมบัติทางกลของตัวอย่าง S10, S11, S12, S13 และ S14

สมบัติ	ตัวอย่างทดสอบ					ค่าความ ไม่ แน่นอน	วิธีทดสอบ
	S10	S11	S12	S13	S14		
ความแข็ง (Shore A)	69	79	59	64	71	-	ISO 37 (Type1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 100 (MPa)	3.2	3.9	1.9	2.2	3.8	-	ISO 37 (Type1)
การต้านแรงดึง (MPa)	8.0	9.7	8.5	8.9	12.1	-	ISO 37 (Type1)
การทนต่อแรงยืดจนขาด (%)	280	320	360	380	360	-	ISO 37 (Type1)
การบ่มเร่งที่ 100 °C,22 ชม.							
ความแข็ง (Shore A)	73	82	59	67	82	-	ISO 37 (Type1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 100 (MPa)	3.4	5.0	2.1	2.5	4.5	-	ISO 37 (Type1)
การต้านแรงดึง (MPa)	9.8	10.5	7.7	7.3	10.6	-	ISO 37 (Type1)
การทนต่อแรงยืดจนขาด (%)	340	260	320	300	300	-	ISO 37 (Type1)

หมายเหตุ : 1. S6-S14 อัตราส่วนที่เติม Silica เป็นสารตัวเติม

การทดสอบแรงดึงไม่สามารถที่จะทดสอบการยืดที่มากกว่าร้อยละ 100 (MPa) เนื่องจาก
 ยางคงรูปที่นำไปทดสอบมีลักษณะการยืดตัวต่ำ

ตาราง 3.41 แสดงสมบัติทางกลของตัวอย่าง F6, F7, F8 และ F9

สมบัติ	ตัวอย่างทดสอบ				ค่าความ ไม่ แน่นอน	วิธีทดสอบ
	F6	F7	F8	F9		
ความแข็ง (Shore A)	43	46	47	44	-	ISO 37 (Type1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 100 (MPa)	0.9	1.0	1.0	0.9	-	ISO 37 (Type1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 200 (MPa)	1.3	1.4	1.4	1.3	-	ISO 37 (Type1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 300 (MPa)	1.9	1.9	1.9	1.7	-	ISO 37 (Type1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 500 (MPa)	-	-	-	-	-	
การต้านแรงดึง (MPa)	6.9	6.3	6.1	5.5	-	ISO 37 (Type1)
การทนต่อแรงยืดจนขาด (%)	474	472	473	473	-	ISO 37 (Type1)

ตาราง 3.42 แสดงสมบัติทางกลของตัวอย่าง F10, F11, F12, F13 และ F14

สมบัติ	ตัวอย่างทดสอบ					ค่าความ ไม่ แน่นอน	วิธีทดสอบ
	F10	F11	F12	F13	F14		
ความแข็ง (Shore A)	47	49	44	46	45	-	ISO 37 (Type1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 100 (MPa)	1.0	1.0	0.8	0.9	0.8	-	ISO 37 (Type1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 200 (MPa)	1.3	1.3	1.1	1.2	1.1	-	ISO 37 (Type1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 300 (MPa)	1.8	1.8	1.5	1.7	1.4	-	ISO 37 (Type1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 500 (MPa)	-	-	5.4	-	4.5	-	
การต้านแรงดึง (MPa)	5.9	5.0	7.2	6.0	5.1	-	ISO 37 (Type1)
การทนต่อแรงยืดจนขาด (%)	456	447	529	483	514	-	ISO 37 (Type1)

หมายเหตุ : 1. F6-F14 อัตราส่วนที่เติม Flyash เป็นสารตัวเติม

ตาราง 3.43 แสดงสมบัติทางกลของตัวอย่าง Z6, Z7, Z8 และ Z9

สมบัติ	ตัวอย่างทดสอบ				ค่าความ ไม่ แน่นอน	วิธีทดสอบ
	Z6	Z7	Z8	Z9		
ความแข็ง (Shore A)	40	36	38	41	-	ASTM D 2240
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 100 (MPa)	0.8	0.7	0.7	0.8	-	ISO 37 (Type1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 200 (MPa)	1.2	1.0	1.0	1.2	-	ISO 37 (Type1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 300 (MPa)	1.9	1.3	1.4	1.7	-	ISO 37 (Type1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 500 (MPa)	-	3.7	-	61	-	ISO 37 (Type1)
การต้านแรงดึง (MPa)	5.1	4.8	3.1	7.7	-	ISO 37 (Type1)
การทนต่อแรงยืดจนขาด (%)	453	539	466	515	-	ISO 37 (Type1)

ตาราง 3.44 แสดงสมบัติทางกลของตัวอย่าง Z10, Z11, Z12, Z13 และ Z14

สมบัติ	ตัวอย่างทดสอบ					ค่าความ ไม่ แน่นอน	วิธีทดสอบ
	Z10	Z11	Z12	Z13	Z14		
ความแข็ง (Shore A)	42	40	43	38	39	-	ASTM D 2240
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 100 (MPa)	0.9	0.8	0.9	0.7	0.7	-	ISO 37 (Type1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 200 (MPa)	1.3	1.1	1.2	1.0	1.0	-	ISO 37 (Type1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 300 (MPa)	2.0	1.6	1.8	1.3	1.3	-	ISO 37 (Type1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 500 (MPa)	5.4	4.6	-	3.0	2.6	-	ISO 37 (Type1)
การต้านแรงดึง (MPa)	4.2	5.0	3.3	5.5	4.1	-	ISO 37 (Type1)
การทนต่อแรงยืดจนขาด (%)	422	517	529	609	601	-	ISO 37 (Type1)

หมายเหตุ : 1. Z6-Z14 อัตราส่วนที่เติม Zeolite เป็นสารตัวเติม

ตาราง 3.45 แสดงสมบัติทางกลของตัวอย่าง C6, C7, C8 และ C9

สมบัติ	ตัวอย่างทดสอบ				ค่าความ ไม่ แน่นอน	วิธีทดสอบ
	C 6	C7	C8	C9		
ความแข็ง (Shore A)	36	44	47	43	-	ASTM D 2240
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 100 (MPa)	0.7	0.8	1.0	0.9	-	ISO 37 (Type1)
การต้านแรงดึง (MPa)	7.5	7.1	5.2	6.1	-	ISO 37 (Type1)
การทนต่อแรงยืดจนขาด (%)	660	640	460	460	-	ISO 37 (Type1)
การบ่มแรงที่ 100 °C, 22 ชม.						
ความแข็ง (Shore A)	23	38	-	40	-	ISO 37 (Type1)
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 100 (MPa)	0.4	0.7	-	0.9	-	ISO 37 (Type1)
การต้านแรงดึง (MPa)	2.4	2.7	-	4.2	-	ISO 37 (Type1)
การทนต่อแรงยืดจนขาด (%)	580	500	-	440	-	ISO 37 (Type1)

ตาราง 3.46 แสดงสมบัติทางกลของตัวอย่าง C10, C11, C12, C13 และ C14

สมบัติ	ตัวอย่างทดสอบ					ค่า ความ ไม่ แน่นอน	วิธีทดสอบ
	C10	C11	C12	C13	C14		
ความแข็ง (Shore A)	39	39	40	43	48	-	ASTM D 2240
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 100 (MPa)	0.8	0.8	0.7	0.8	0.8	-	ISO 37 (Type1)
การต้านแรงดึง (MPa)	8.8	7.7	8.6	6.7	4.4	-	ISO 37 (Type1)
การทนต่อแรงยืดจนขาด (%)	700	580	660	540	480	-	ISO 37 (Type1)
การบ่มแรงที่ 100 °C, 22 ชม.							ISO 37 (Type1)
ความแข็ง (Shore A)	-	33	32	46	43	-	
ความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 100 (MPa)	-	0.7	0.5	0.8	0.7	-	
การต้านแรงดึง (MPa)	-	4.7	5.3	2.1	2.5	-	
การทนต่อแรงยืดจนขาด (%)	-	540	740	465	440	-	ISO 37 (Type1)

หมายเหตุ : 1. อัตราส่วนที่เติม Calcium carbonate เป็นสารตัวเติม

4.7.3 ผลการทดสอบ % Swelling ของยางคอมปาว์ที่เติมสารเติมแต่ง (Filler) ในน้ำมันไบโอดีเซลและแก๊สโซฮอล์

ตารางที่ 4.47 แสดง % swelling ในน้ำมันของยาง NR/NBR ที่ไม่เติมสารเติมแต่ง

	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3	สูตรที่ 4	สูตรที่ 5	สูตรที่ 15	สูตรที่ 16
B100	60.34	49.63	52.13	49.64	44.19	60.96	17
B40	68.18	59.58	54.8	43.27	50.19	68.66	16
B0	63.34	57.76	52.82	55.01	48.16	65.07	4.87
B5	62.93	53.52	61.24	54.75	46.22	65.33	5.92
แก๊สโซฮอล์ 91	52.1	49.33	46.95	48.67	41.7	48.8	23.97
แก๊สโซฮอล์ 95	40.86	46.78	39.57	36.23	35.78	41.2	23.15

ตารางที่ 4.48 แสดง % swelling ในน้ำมันของยาง NR/NBR ที่เติมสารเติมแต่งเป็น CaCO_3

	สูตรที่ 6	สูตรที่ 7	สูตรที่ 8	สูตรที่ 9	สูตรที่ 10	สูตรที่ 11	สูตรที่ 12	สูตรที่ 13	สูตรที่ 14
B100	57.24	53.04	50	53.92	52.75	46.12	45.64	42.25	44.49
B40	55.66	59.28	55.36	58.62	56.17	50.63	48.1	46.98	48.08
B0	61.68	58.98	39.87	56.12	52.79	51.13	46.12	48.26	45.99
B5	63.66	53.33	54.73	58.8	55.9	47.43	44.71	46.09	48.41
แก๊สโซฮอล์ 91	47.08	42.02	45.88	46.01	43.66	43.55	47.28	43.16	36.11
แก๊สโซฮอล์ 95	45.79	42.56	41.19	46.48	43.53	40.2	43.85	40.18	34.46

ตารางที่ 4.49 แสดง % swelling ในน้ำมันของยาง NR/NBR ที่เติมสารเติมแต่งเป็น Zeolite

	สูตรที่ 6	สูตรที่ 7	สูตรที่ 8	สูตรที่ 9	สูตรที่ 10	สูตรที่ 11	สูตรที่ 12	สูตรที่ 13	สูตรที่ 14
B100	31.21	33.76	52.98	46.19	52.88	46.46	43.41	59.01	26.63
B40	50.72	47.55	62.17	51.35	56.43	50.66	48.01	63.12	40
B0	46.11	51.98	59.71	50.25	52.63	49.51	44.88	46.87	35.88
B5	19.85	36	56.57	47.28	52.63	43.97	39.37	59.58	33.96
แก๊สโซฮอล์ 91	45.41	37	22.82	48.2	47.61	45.5	63.73	60.98	46.57
แก๊สโซฮอล์ 95	45.6	54.22	50.81	59.75	38.86	55.41	52.63	51.29	17.44

ตารางที่ 4.50 แสดง % swelling ในน้ำมันของยาง NR/NBR ที่เติมสารเติมแต่งเป็น Silica

	สูตรที่ 6	สูตรที่ 7	สูตรที่ 8	สูตรที่ 9	สูตรที่ 10	สูตรที่ 11	สูตรที่ 12	สูตรที่ 13	สูตรที่ 14
B100	54.74	43.36	45.48	51.09	44.34	37.81	40.46	43.57	37.83
B40	36.68	50.6	47.77	50.86	51.54	41.12	23	45.49	41.76
B0	57.02	52	51.04	52.77	48.74	42.5	38.59	46.51	25.92
B5	59.48	50	51.63	55.62	48.78	42.66	46.19	44.62	41.86
แก๊สโซฮอล์ 91	43.95	46.8	45.09	48.31	46.96	44.83	37.34	42.17	36.5
แก๊สโซฮอล์ 95	50.69	45.8	34.88	49.79	40.42	40.93	41.71	43.04	42.21

ตารางที่ 4.51 แสดง % swelling ในน้ำมันของยาง NR/NBR ที่เติมสารเติมแต่งเป็น Flyash

	สูตรที่ 6	สูตรที่ 7	สูตรที่ 8	สูตรที่ 9	สูตรที่ 10	สูตรที่ 11	สูตรที่ 12	สูตรที่ 13	สูตรที่ 14
B100	52.82	58.01	66.35	51.02	54.39	54.35	49.77	51.56	46.19
B40	63.45	67.55	45.89	58.11	57.19	60.35	54	50.77	68.38
B0	18.85	65.28	60.66	55.81	49.18	62	51.75	45.14	48.07
B5	62.23	68.9	54.87	54.18	58.05	56.69	54.41	50	47.64
แก๊สโซฮอล์ 91	50	52.15	48.07	47.24	50.2	50.76	44.67	47.31	50.25
แก๊สโซฮอล์ 95	54.77	51.91	48.66	55.59	45.02	50.63	71.13	55.41	40

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาความสามารถของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางอะครีโลไนไตรล์ บิวตะไดอินทั้งที่ทำการเติมยาง NR-g-PAN และไม่เติมที่มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ สามารถสรุปสาระสำคัญได้ดังนี้

5.1.1 ผลการกราฟที่ยางธรรมชาติกับโพลีอะครีโลไนไตรล์ (NR-g-PAN)

จากผลที่ได้ทำการคำนวณ % Grafting มีค่าสูงถึง 97.29 % เป็นผลมาจากการประยุกต์ใช้เงื่อนไขในการสังเคราะห์ยาง NR-g-PAN ที่ได้มีผู้ทำวิจัยมาแล้ว ได้แก่ คุณสิริยา อางนันทน์ และคุณวิรัช คุ้มประเสริฐ ซึ่งเงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์ได้แก่ ใช้เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ที่ 5 phr ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

5.1.2 เวลาที่ใช้ในการผสมยาง

เวลาที่ใช้ในการผสมยางนั้นได้มีผู้ทำการวิจัยแล้วว่าเวลาที่ใช้ในการผสมยางไม่ควรเกิน 25 นาที เพราะส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลของยางผสมตกลงมากซึ่งผู้ที่ทำการวิจัยได้แก่คุณชาคริต และคณะฯ ดังนั้นจึงได้มีการตัดสินใจกำหนดเวลาที่ใช้ในการผสมยางเพียง 20 นาที

5.1.3 การหาเวลาที่ใช้ในการคงรูปของยางผสม

จากการหาเวลาที่ใช้ในการคงรูปของยางผสมก่อนการเติมยาง NR-g-PAN พบว่าเวลาที่ใช้ในการคงรูปของยางผสมมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของยางธรรมชาติลดลงเป็นผลจากยางธรรมชาติมีความหนืดสูงและภายหลังที่เติมยาง NR-g-PAN ลงไปช่วยทำให้ยางผสมใช้เวลาในการคงรูปน้อยลงและอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปคือ 160 °C

5.1.4 การหาค่าความหนืดของยางผสม

ค่าความหนืดของยางผสมก่อนเติมยาง NR-g-PAN มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของยางธรรมชาติลดลงเนื่องจากยางธรรมชาติมีความหนืดสูงและเมื่อทำการเติมยาง NR-g-PAN ลงไปส่งผลให้ค่าความหนืดของยางผสมมีค่าลดลง

5.1.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล

การทดสอบความแข็งของยางผสมก่อนเติมยาง NR-g-PAN พบว่าค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของยางธรรมชาติลดลง ค่าความแข็งของยางผสมสูงที่สุดคือ ที่ NR 20% มีค่าความแข็งอยู่ที่ 52.22 Shore A และภายหลังเติมยาง NR-g-PAN ลงไปพบว่าค่าความแข็งของยางผสมมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเป็น 53.54 Shore A เนื่องจากมีส่วนของโพลีอะครีโลไนไตรล์มาช่วยเสริมทำให้ค่าความแข็งของยางเพิ่มสูงขึ้น

การทดสอบค่า Tensile Strength และค่า Elongation ซึ่งค่าของทั้ง 2 นี้ในยางผสมก่อนเติมยาง NR-g-PAN มีแนวโน้มคล้ายกันคือ ค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของยางธรรมชาติลดลงจนมีค่าสูงสุดที่ NR 40% หลังจากนั้นค่าทั้งสองชนิดก็มีแนวโน้มลดลงตามลำดับและภายหลังที่เติมยาง NR-g-PAN ลงไปแล้วพบว่ายาง NR-g-PAN ทำให้ค่าทั้งสองชนิดมีค่าลดลงเป็นผลมาจากยางผสมมีความเปราะมากขึ้น

การทดสอบค่า Modulus ของยางผสมก่อนเติมยาง NR-g-PAN พบว่าค่า Modulus มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณของยางธรรมชาติลดลงและภายหลังเติมยาง NR-g-PAN ลงไปพบว่าค่า Modulus มีค่าลดลงแต่มีแนวโน้มของค่า Modulus เช่นเดียวกันกับยางผสมก่อนเติมยาง NR-g-PAN

5.1.6 การต้านทานต่อของเหลว

การทดสอบการบวมตัวของยางผสมในน้ำมันไบโอดีเซลและแก๊สโซฮอล์พบว่ายาง NR มีการบวมตัวในน้ำมันทั้งสองชนิดได้มากกว่ายาง NBR และการยางผสมระหว่าง NR/NBR ค่าการบวมตัวจะลดลงเมื่อปริมาณของยาง NR ลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากความเป็นขี้ผึ้ง กล่าวคือยาง NR ไม่มีขี้ผึ้งทำให้สามารถบวมตัวในน้ำมันที่ไม่มีขี้ผึ้งอย่างไบโอดีเซลได้ดี และการผสมด้วย NBR ความเป็นขี้ผึ้งจะเพิ่มมากขึ้นทำให้การบวมตัวลดลง และอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดคือ NR/NBR ที่ 20/80 และหลังจากการเติมยาง NR-g-PAN ลงไปในยางผสมแล้วนำไปทดสอบการบวมตัวพบว่ายางผสมมีความสามารถในการต้านทานต่อน้ำมันไบโอดีเซลและน้ำมันแก๊สโซฮอล์ได้ดีขึ้น

5.1.7 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

5.1.7.1 การทดสอบ Aging Properties

การทดสอบ Aging Properties เป็นการทดสอบสมบัติเชิงกลอีกอย่างหนึ่งซึ่งค่าที่ได้ประกอบไปด้วยค่า Tensile Strength, ค่า Elongation และค่า Modulus ซึ่งค่า Tensile Strength และค่า Elongation ของยางผสมที่เติมยาง NR-g-PAN มีแนวโน้มลดลงแต่ค่า Modulus มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

5.1.7.2 การทดสอบ Thermogravimetric Analyzer (TGA)

ผลการทดสอบ Thermogravimetric Analyzer (TGA) ของยางผสมที่เติมยาง NR-g-PAN ลงไปพบว่ายางผสมสามารถต้านทานการเสื่อมสภาพด้วยความร้อนได้สูงขึ้นเพราะส่วนที่เป็นโพลีอะคริโลไนไตรล์ในยาง NR-g-PAN เข้ามาเสริมทำให้ยางผสมสามารถทนความร้อนได้สูงขึ้นนั่นเอง

5.1.8 การทดสอบสมบัติทางกลและการทนน้ำมันของยางที่เติมด้วยสารเติมแต่ง

พบว่าสามารถให้สมบัติทางกลได้ดีขึ้นและทนต่อการบวมตัวในน้ำมันทั้งสองชนิดได้มากโดยเฉพาะการเติมด้วย zeolite จะให้ผลการทนต่อน้ำมันได้ดีที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ก่อนที่จะนำยางผสมไปทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีด ควรนำยางผสมที่ได้ไปทำการทดสอบการหาระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสม (Optimum cure time, t_c 90) ด้วยเครื่อง Moving Die Rheometer (MDR)

5.2.2 การเลือกใช้งานของยางผสม ควรศึกษาสมบัติของยางผสมก่อน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามสมบัติที่ต้องการใช้งาน

เอกสารอ้างอิง

- [1] คู่มือการจัดการสารเคมีอันตรายสูง อะคริไลไนไตรด์, กรมโรงงานอุตสาหกรรม, โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2551, 79 หน้า
- [2] พงษ์ธร แซ่ฮุย, ชาคิต สิริสิงห, ยาง : กระบวนการผลิตและการทดสอบ, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ, 2550, 170 หน้า
- [3] พงษ์ธร แซ่ฮุย, สารเคมียาง, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพฯ, 2550, 150 หน้า
- [4] พงษ์ธร แซ่ฮุย, ชนิด สมบัติ และการใช้งานของยาง, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพฯ, 2548, 125 หน้า
- [5] เสาวนีย์ ก่ออุทัยรังสี, สำนักวิทยบริการ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพฯ, 2543, 236 หน้า
- [6] น้ำมันแก๊สโซฮอล์ 95 แตกต่างจากน้ำมันเบนซิน 95 อย่างไร. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://www.energy.go.th/th/knowledgeDetail.asp?id=90> สืบค้น 14 มีนาคม 2553.
- [7] น้ำมันแก๊สโซฮอล์มีข้อดีอย่างไร. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://www.eppo.go.th/encon/gasohol/gasohol-factsheet.html> สืบค้น 14 มีนาคม 2553.
- [8] วารุณี อริยะวิริยะนันท์, **Instrumental Analysis of Plastics** (การวิเคราะห์พลาสติก), ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- [9] วีรยุทธ คุ้มประเสริฐ, “สมบัติเชิงกลและการต้านทานน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซลของการผสมยางธรรมชาติกราฟท์โพลิอะไครโลไนไตรด์กับยางอะไครโลไนไตรด์บิวตะไดอิน” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก http://202.28.199.3/tdc/browse.php?option=show&browse_type=title&titleid=26929&display=list_subject&q=ยาง สืบค้น 3 มกราคม 2553.
- [10] สุเมธ กิตติภูมิ, ปราณี ภิญโญชีพ และ นิตยา รัตนโสม, “การเตรียมฟิล์มยางทนน้ำมันโดยจุ่มเคลือบยางธรรมชาติอีพอกซีไคซ์บนฟิล์มยางธรรมชาติ”, มหาวิทยาลัยมหิดล [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก http://www.scisoc.or.th/stt/31/sec_e/paper/stt31_E0169.pdf สืบค้น 3 มกราคม 2553
- [11] สวรรษา เหลือมล้ำ, “การศึกษาอิทธิพลของสารเพิ่มความเข้ากันได้ต่อสมบัติการทนน้ำมันและสมบัติเชิงกลของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทธิลีน” , มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก http://202.28.199.4/tdc/browse.php?option=show&browse_type=subject&subjid=45351&doc_type=0&display=list_subject&q=%C2%D2 สืบค้น 3 มกราคม 2553.

- [12] สิริยา อางนันทน์ “ยางธรรมชาติผสมยางไนไตรล์เสริมความเข้ากันได้ด้วยกราฟต์โคพอลิเมอร์ของสไตรีนและอะครีโลไนไตรล์บนยางธรรมชาติ”, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://thesis.grad.chula.ac.th/abstracts/docs/4972527223.doc> สืบค้น 15 มกราคม 2554.
- [13] Chatchawan Kantala, Ekachai Wimolmala, Narongrit Sombatsompop and Chakrit Sirisinha, “อิทธิพลของสารช่วยประสานต่อสมบัติการไหล ความหนาแน่นของพันธะข้าม และสมบัติเชิงกลของยางผสมระหว่างยาง NR กับ NBR” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก http://digital.lib.kmutt.ac.th/journal/loadfile.php?A_ID=331 สืบค้น 15 มกราคม 2554.
- [14] Jonh A. Manson and Leslie H. Sperling. Polymer Blends and Compositcs. United States of America : A Division of Plenum Publishing Corporation, 1928
- [15] Table 14, Nitrile Dry Rubber (NBR), *IISRP Synthetic Rubber Manual, 13th Edition*, (1995)

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยในหัวข้อการเตรียมยางทนน้ำมันไบโอดีเซลและน้ำมันแก๊สโซฮอล์ จากยางธรรมชาติ ผสมยางอะไครโลไนไตรบิวตะไดอินสำหรับทำยางโอริงและยางปะเก็นสามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือและความอนุเคราะห์ จากองค์กรบุคคลต่างๆดังนี้

1. ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องจักรและเครื่องทดสอบต่างๆ เป็นอย่างดี

2. ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่คุมเครื่องทดสอบ TGA ของสถาบันวิจัยเคมี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทดสอบเป็นอย่างดี

3. ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยประจำปีงบประมาณ 2554 ในครั้งนี้

คณะผู้วิจัย

ภาคผนวก

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

1. **Ariyawiriyanan, W.**, Kunyawut, C. and Srinonchat, J. “ Preparation of Biodiesel and Gasohol Resistance Rubber from NR/NBR blend for O-ring and Gasket Applications” *Preparations to submit the proceeding of 10th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium, Ubon ratchathani, Thailand, December 5-8. 2012.*