



อิทธิพลของสภาวะในการผสมต่อสมบัติของยางผสมระหว่าง ยางธรรมชาติ (NR) และยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (EPDM) Effects of Mixing Condition on Properties of NR/EPDM Blends

อุทัย เทพสุวรรณ^{1,2} พงษ์ธร แซ่อู่^{1,2} ชากริต สิริสิงห์^{2,3} และภูษงค์ ทับทอง^{1,2}

¹ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ 114 อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ถนนพหลโยธิน ต.คลองหนึ่ง

อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

²หน่วยเทคโนโลยียางมหิดล-เอ็มเทค คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ต.ศาลายา อ.พุทธมณฑล

จ.นครปฐม 73170

³ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ถ. พระราม 6 ราชเทวี พญาไท กรุงเทพฯ 10400

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของสภาวะในการผสมต่อสมบัติของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ (NR) และยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (EPDM) โดยได้ดำเนินการทดลองด้วยการนำยางธรรมชาติไปผสมกับยาง EPDM ที่สัดส่วนการผสมระหว่าง NR/EPDM 60/40 ในเครื่องผสมระบบปิด ซึ่งในระหว่างการผสมได้ทำการปรับเปลี่ยนระยะเวลาในการผสมและความเร็วรอบในการหมุนของโรเตอร์ จากนั้น จึงนำยางคอมพาวด์ที่ผสมได้ส่วนหนึ่งไปทดสอบสมบัติความสามารถในการขึ้นรูปและนำยางคอมพาวด์ส่วนที่เหลือไปขึ้นรูป และคงรูปเพื่อทดสอบสมบัติต่าง ๆ ต่อไป จากการศึกษาพบว่า การปรับเพิ่มระยะเวลาในการผสมและความเร็วรอบในการหมุนของโรเตอร์ต่างก็ส่งผลทำให้ความหนืดของยางลดต่ำลง อย่างไรก็ตาม เป็นที่น่าแปลกใจที่ผลการทดลองบ่งชี้ว่าทั้งระยะเวลาในการผสม (5-17 นาที) และความเร็วรอบในการหมุนของโรเตอร์ (30-50 รอบต่อนาที) ไม่ส่งผลกระทบต่อลักษณะการคงรูปของยาง สมบัติความทนทานต่อการฉีกขาด สมบัติการกระเดิงกระดอน รวมถึงสมบัติการเสียรูปหลังกดอัดอย่างมีนัยสำคัญ จากการทดลองยังพบว่าความทนทานต่อแรงดึงของยางผสมมีค่าสูงสุดเมื่อใช้ระยะเวลาในการผสมเท่ากับ 11 นาทีและใช้ความเร็วรอบในการหมุนของโรเตอร์เท่ากับ 40 รอบต่อนาที จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของยางผสม พบว่าการปรับเปลี่ยนระยะเวลาในการผสมและความเร็วในการหมุนของ โรเตอร์ไม่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของยางผสมอย่างมีนัยสำคัญ ด้วยเหตุนี้การปรับเปลี่ยนตัวแปรทั้งสองดังกล่าวจึงส่งผลน้อยมากต่อสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพของยาง



Abstract

The influence of mixing conditions on properties of natural rubber (NR)/ethylene propylene diene rubber (EPDM) blend was investigated. NR was blended with EPDM in an internal mixer at the blend ratio of 60/40 NR/EPDM. During mixing, both mixing time and rotor speed were varied. A portion of the rubber compound was subsequently used for the processability determination. The rest of the compound was then shaped and vulcanized for further tests. The results revealed that increasing either mixing time or rotor speed gave rise to the reduction of compound viscosity. Surprisingly, the results indicated that both mixing time (5-17 minutes) and rotor speed (30-50 rpm) had no significant effects on many properties of the rubber blend such as cure characteristics, tear strength, rebound resilience as well as compression set. The results also elucidated that the maximum tensile strength was achieved when the mixing time and rotor speed were set at 11 minutes and 40 rpm, respectively. As the results revealed that the variations in mixing time and rotor speed had no significant effect on blend morphology, the aging resistance of the blend was therefore little affected when these two mixing parameters were changed.

คำสำคัญ (Keywords): Natural rubber, Blend, Mixing condition, Mechanical properties, Aging resistance

1. บทนำ

แม้ว่ายางธรรมชาติจะเป็นยางที่มีสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงพลวัตที่ดี แต่เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นยางที่มีปริมาณพันธะคู่อยู่ในโมเลกุลสูง ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงมีข้อด้อยอยู่หลายประการ โดยเฉพาะสมบัติความทนทานต่อความร้อนและความทนทานต่อโอโซนที่ค่อนข้างต่ำ จึงส่งผลทำให้การประยุกต์ใช้งานของยางธรรมชาติมีข้อจำกัด เช่น ไม่สามารถนำไปใช้งานกลางแจ้งหรือในที่ที่มีอุณหภูมิสูงมาก ๆ ได้ ปัจจุบัน การผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสมบัติความทนทานต่อความร้อนและโอโซนจำเป็นต้องผสมกับยางสังเคราะห์เป็นวัตถุดิบในการผลิต ซึ่งต้องนำเข้าจากต่างประเทศทั้งสิ้น ด้วยเหตุนี้ การพัฒนาเทคโนโลยีต่าง ๆ เพื่อปรับปรุงข้อด้อยของยางธรรมชาติจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้ผู้ประกอบการของไทยสามารถนำยางธรรมชาติไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่ทนความร้อนและโอโซนได้และลดการนำเข้ายางสังเคราะห์จากต่างประเทศ



ปัจจุบัน ได้มีการศึกษาเพื่อปรับปรุงสมบัติความทนทานต่อความร้อนและโอโซนของยางธรรมชาติมากมายโดยการนำเทคโนโลยียางผสมมาประยุกต์ใช้ โดยเฉพาะการนำยางธรรมชาติไปผสมกับยางที่มีปริมาณพันธะคู่อยู่ในโมเลกุลต่ำ เช่น ยาง EPDM อย่างไรก็ดี เนื่องจากความแตกต่างของปริมาณพันธะคู่ที่มีอยู่ในโมเลกุล ยางผสมที่ได้ส่วนใหญ่จึงมีสมบัติเชิงกลที่ค่อนข้างต่ำเพราะเกิดความไม่สมดุลของการคงรูประหว่างวัฏภาค [1] ปัจจุบัน จึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆ เพื่อปรับปรุงความไม่สมดุลของการคงรูปโดยการนำยาง EPDM ไปดัดแปรเพื่อให้มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาของรูปด้วยกำมะถันสูงขึ้นก่อนที่จะนำไปผสมกับยางธรรมชาติ [2-5] รวมถึงการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อให้เกิดการคงรูปร่วมระหว่างวัฏภาคของยางธรรมชาติและยาง EPDM โดยการใช้ระบบการคงรูปด้วยกำมะถันร่วมกับเพอร์ออกไซด์ [6-7] นอกจากระบบการคงรูปแล้ว ยังมีปัจจัยอีกหลายอย่างส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมทั่ว ๆ ไป เช่น สัดส่วนของการผสม [8] สภาพะในการผสม [9-10] ลักษณะสัณฐานวิทยา [9-11] รวมถึงการกระจายตัว (Distribution) ของสารเคมีในแต่ละวัฏภาคอีกด้วย [12-13]

เนื่องจากสมบัติของยางผสมขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างดังที่ได้กล่าวข้างต้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเน้นศึกษาอิทธิพลของสภาพะในการผสม (ระยะเวลาในการผสม และความเร็วรอบในการหมุนของโรเตอร์) ต่อสมบัติของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ (NR) และยางเอทธิลีนโพรพิลีนไดอีน (EPDM) ที่ได้รับการเสริมแรงด้วยเขม่าดำ โดยในการทดลองนี้ได้เลือกทำการศึกษายางผสมที่มีสัดส่วนของการผสมของ NR/EPDM เท่ากับ 60/40 เพราะยางผสมที่สัดส่วนดังกล่าวมีสมบัติเชิงกลและความทนทานต่อความร้อนและโอโซนอยู่ในเกณฑ์ที่ดี [14]

2. วิธีการวิจัย

2.1 วัสดุ

ยางธรรมชาติเกรด STR 5L ผลิตโดยบริษัทยูเนี่ยนรับเบอร์โปรดักส์ จำกัด ยาง EPDM เกรดที่เลือกนำมาใช้ในการศึกษาคือ Nordel 4640 ซึ่งผลิตโดยบริษัท DuPont Dow Elastomers ยาง EPDM เกรดนี้มีค่าความหนืดมูนนี้เท่ากับ 40-ML(1+4)@125 °C และมีปริมาณไดอีน (ENB) เท่ากับ 4.9% โดยน้ำหนัก สารเคมีชนิดอื่น ๆ ที่ใช้เป็นองค์ประกอบในการเตรียมยางคอมพาวด์ ได้แก่ เขม่าดำ (carbon black) เกรด N330 ซึ่งผลิตโดยบริษัท ไทยคาร์บอนโปรดักส์ จำกัด ซิงก์ออกไซด์ (ZnO) กรดสเตียริก (Stearic acid) และกำมะถัน (S₈) ได้รับจากบริษัทเคมิมินคอร์ปอเรชัน จำกัด ส่วนสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำมาใช้ คือ บิวทิล-2-เบนโซโธอะซิลซัลฟิโนไมด์ (TBBS) ซึ่งได้รับจากบริษัทรีไลแอนซ์ เทคโนโลยี (Flexsys) จำกัด



2.2 การเตรียมและทดสอบสมบัติของยางคอมพาวด์

งานวิจัยนี้ได้ทำการผสมยางคอมพาวด์ตามสูตรที่แสดงในตารางที่ 1 โดยใช้เครื่องผสมระบบปิด (Haake Rheomix 3000p) ในระหว่างการผสม ได้ทำการตั้งอุณหภูมิเริ่มต้นของห้องผสมที่ 60°C fill factor เท่ากับ 0.7 และทำการปรับเปลี่ยนตัวแปรที่ใช้ในการผสม 2 ตัวแปรคือระยะเวลาในการผสมและความเร็วรอบในการหมุนของโรเตอร์ โดยในการศึกษาผลของระยะเวลาในการผสมนั้น ได้กำหนดความเร็วรอบในการหมุนของโรเตอร์คงที่ที่ 40 รอบต่อนาทีและทำการปรับเปลี่ยนระยะเวลาในการผสมจาก 5 ถึง 17 นาที แต่ในส่วนของการศึกษาผลของความเร็วยรอบในการหมุนของโรเตอร์นั้น ได้ทำการผสมยางโดยกำหนดให้ระยะเวลาในการผสมคงที่ที่ 11 นาที และทำการปรับเปลี่ยนความเร็วรอบในการหมุนของโรเตอร์จาก 30 ถึง 50 รอบต่อนาที เมื่อผสมยางคอมพาวด์เรียบร้อยแล้ว จึงนำยางคอมพาวด์ที่ได้ไปรีดให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้งท้ายสุดจึงแบ่งยางคอมพาวด์ที่ผสมได้ออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกนำไปวัดค่าความหนืดมูนนี้ตามมาตรฐาน ASTM D1646 ด้วยเครื่อง Mooney viscometer (viscTech+) ที่อุณหภูมิ 125°C ส่วนที่ 2 นำไปหาระยะเวลาสกอร์ช (scorch time, t_2) และระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสม (optimum cure time, t_{90}) ด้วยเครื่อง Moving Die Rheometer (MDR TechPRO MD+) ที่อุณหภูมิ 160°C และส่วนที่ 3 นำไปขึ้นรูปสำหรับทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของยางคงรูปต่อไป

2.3 การเตรียมและทดสอบสมบัติของยางคงรูป

นำยางคอมพาวด์ไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกที่อุณหภูมิ 160°C ตามระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสมของยาง จากนั้นจึงนำยางคงรูปที่ได้ไปทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ สมบัติความแข็งตามมาตรฐาน ASTM D2240 สมบัติแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D412 คาย C สมบัติความทนทานต่อการฉีกขาดตามมาตรฐาน ASTM D624 สมบัติการเลื่อยรูปหลังการกดอัดตามมาตรฐาน ASTM D395 (method B) โดยทำการทดสอบทั้งที่อุณหภูมิห้อง (23°C) และที่อุณหภูมิ 100°C เป็นระยะเวลา 22 ชั่วโมง สมบัติการกระเดื่องกระดอนตามมาตรฐาน BS 903 : Part A8 (method A) สมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพตามมาตรฐาน ASTM D573 โดยนำขึ้นทดสอบไปทำการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 100°C เป็นระยะเวลา 22 ชั่วโมง ในงานวิจัยนี้ได้แสดงสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพของยางในรูปของสมบัติสัมพัทธ์ซึ่งก็คืออัตราส่วนของสมบัติของยางหลังการบ่มเร่งต่อสมบัติของยางก่อนการบ่มเร่งนั่นเอง นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาโดยใช้เครื่อง Atomic Force Microscope (AFM, Multimode Nanoscope IIIA) และศึกษาระดับการแตกตัวของเขม่าดำด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM)



3. ผลการวิจัยและวิจารณ์

3.1 พฤติกรรมการผสม (Mixing behavior) ความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) และลักษณะการคงรูป (Cure characteristics)

ตารางที่ 2 แสดงผลของสภาวะการผสมต่อพฤติกรรมการผสม ความหนืดมูนนี่ (ML 1+4@ 125 °C) และลักษณะการคงรูปของยางผสม จากตารางพบว่า การเพิ่มระยะเวลาในการผสมหรือการเพิ่มความเร็วยรอบในการหมุนของโรเตอร์ส่งผลทำให้ค่าพลังงานที่ใช้ในการผสมมีแนวโน้มสูงขึ้น ในขณะที่ความหนืดมูนนี่ของยางกลับมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้ การลดลงของความหนืดดังกล่าวคาดว่าจะเกิดจากหลายสาเหตุเพราะการปรับเพิ่มระยะเวลาในการผสมหรือความเร็วยรอบในการหมุนของโรเตอร์นั้นจะส่งผลทำให้ 1) เกิดการตัดขาดของสายโซ่โมเลกุลยางมากขึ้น 2) เขม่าดำที่มีอยู่ในยางเกิดการแตกตัว (Dispersion) ได้ดียิ่งขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ และ 3) แรงเฉือนและการขัดสีที่เกิดขึ้นในระหว่างการผสมก็จะสูงขึ้น ส่งผลต่อเนื้อทำให้อุณหภูมิของยางสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้ ความหนืดของยางจึงมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาในการผสมและความเร็วยรอบในการหมุนของโรเตอร์

เมื่อพิจารณาถึงผลของสภาวะในการผสมต่อลักษณะการคงรูปของยาง พบว่าการปรับเพิ่มระยะเวลาในการผสมไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อลักษณะการคงรูปของยาง เนื่องจากในการทดลองได้ทำการเติมสารเคมีในกลุ่มที่ทำให้ยางคงรูป เช่น กำมะถัน และสารตัวเร่งปฏิกิริยา ในช่วง 2 นาทีสุดท้ายก่อนที่จะนำยางออกมาจากเครื่องผสมเหมือนกันหมด จึงทำให้ยางผสมที่ได้ทั้งหมดมีค่าระยะเวลาสกอรัช ค่าระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสม และค่าผลต่างของแรงบิดที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองบ่งชี้ว่าการเพิ่มความเร็วยรอบในการหมุนของโรเตอร์ส่งผลทำให้ยางผสมที่ได้มีค่าระยะเวลาสกอรัชและระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสมลดลงที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการเพิ่มความเร็วยรอบในการหมุนของโรเตอร์จะทำให้อุณหภูมิของยางในระหว่างการผสมมีค่าสูงขึ้นค่อนข้างมาก (อุณหภูมิของยางในช่วงท้ายของการผสมมีค่าเท่ากับ 98°C 110°C และ 121°C ที่ความเร็วยรอบในการหมุนของโรเตอร์เท่ากับ 30 40 และ 50 รอบต่อนาที ตามลำดับ) ความหนืดของยางจะลดลง ดังนั้นเมื่อเติมสารเคมีกลุ่มที่ทำให้ยางคงรูปไป สารเคมีเหล่านี้ก็จะกระจายตัวในยางได้ดีขึ้นและพร้อมที่จะแตกตัวและทำปฏิกิริยาต่อไปได้อย่างรวดเร็ว ด้วยเหตุนี้ทั้งระยะเวลาสกอรัชและระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสมจึงมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มความเร็วยรอบในการหมุนของโรเตอร์ เป็นที่น่าแปลกใจที่ผลการทดลองยังบ่งชี้ว่านอกจากระยะเวลาสกอรัชและระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสมแล้ว การปรับเพิ่มความเร็วยรอบในการหมุนของโรเตอร์ยังส่งผลต่อระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงของยางอีกด้วย เพราะผลการทดลองในตารางที่ 2 บ่งชี้ว่าค่าผลต่างของแรงบิด (MH-ML) ซึ่งเป็นค่าที่แปรผันโดยตรงกับระดับของการคงรูปของยางมีแนวโน้มสูงขึ้นตามการเพิ่มความเร็วยรอบในการหมุนของโรเตอร์



3.2 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

รูปที่ 3 แสดงผลของระยะเวลาในการผสมต่อค่าความแข็งและค่าความทนทานต่อแรงดึงของยาง จากรูปพบว่าค่าความแข็งของยางมีแนวโน้มลดลงอย่างช้า ๆ ตามระยะเวลาที่ใช้ในการผสม ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากการตัดขาดของสายโซ่โมเลกุลที่มากขึ้นและการแตกตัวที่ดีขึ้นของเขม่าดำนั่นเอง เมื่อพิจารณาผลของระยะเวลาในการผสมต่อสมบัติความทนทานต่อแรงดึงกลับพบว่าค่าความทนทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างช้า ๆ ตามการเพิ่มระยะเวลาในการผสม จนกระทั่งถึงจุดสูงสุดที่ระยะเวลาในการผสมเท่ากับ 11 นาที หลังจากนั้นค่าความทนทานต่อแรงดึงก็จะเริ่มลดลง ทั้งนี้ การเพิ่มขึ้นของค่าความทนทานต่อแรงดึงในช่วงแรกนั้นคาดว่าน่าจะเป็นผลมาจากการแตกตัวที่ดีขึ้นของเขม่าดำทำให้เขม่าดำสามารถเสริมแรงให้แก่ยางได้ดียิ่งขึ้น ยางคงรูปที่ได้จึงมีค่าความทนทานต่อแรงดึงที่สูงขึ้น แต่เมื่อเขม่าดำเกิดการแตกตัวได้เต็มที่แล้วก็ยังคงดำเนินการผสมต่อไป ค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางก็จะเริ่มลดลงเนื่องจากผลของการตัดขาดของสายโซ่โมเลกุลยางและผลจากการเสื่อมสภาพเพราะยางได้รับอนุมูลอิสระสูงนานเกินไปในระหว่างกระบวนการผสม

รูปที่ 4 แสดงผลของความเร็วยานในการหมุนของโรเตอร์ต่อค่าความแข็งและค่าความทนทานต่อแรงดึงของยาง จากรูปพบว่าค่าความแข็งและค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางมีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อย หลังจากนั้นค่าความแข็งและค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางก็จะเริ่มคงที่ การเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งของยางในช่วงแรกนั้นคาดว่าน่าจะเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของการเชื่อมโยง แต่เมื่อเพิ่มความเร็วยานในการหมุนของโรเตอร์ให้สูงกว่า 40 รอบต่อนาทีก็จะพบว่าค่าความแข็งของยางเริ่มไม่เปลี่ยนแปลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยง ได้ถูกหักล้างโดยผลของการตัดขาดของสายโซ่โมเลกุลนั่นเอง ส่วนการเพิ่มขึ้นของค่าความทนทานต่อแรงดึงในช่วงแรกนั้นคาดว่าน่าจะเป็นผลมาจากการแตกตัวที่ดีขึ้นของเขม่าดำและการเพิ่มขึ้นของระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงของยาง แต่เมื่อเพิ่มความเร็วยานในการหมุนของโรเตอร์ให้สูงกว่า 40 รอบต่อนาที ก็จะพบว่าค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางกลับมีแนวโน้มคงที่ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการใช้ความเร็วยานในการหมุนของโรเตอร์ที่สูงเกินไปแม้ว่าจะทำให้เขม่าดำแตกตัวได้ดีขึ้นและยางมีระดับของการคงรูปสูงขึ้น แต่การผสมยางที่สภาวะดังกล่าวก็ส่งผลในทางลบต่อสมบัติของยางผสมที่ได้เช่นกัน เพราะการใช้ความเร็วยานในการหมุนของโรเตอร์ที่สูงเกินไปนอกจากจะทำให้ยางได้รับแรงเฉือนที่มากขึ้นแล้ว (ทำให้เกิดการตัดขาดของสายโซ่โมเลกุลสูงขึ้น) ยังทำให้อุณหภูมิของยางในระหว่างการผสมสูงขึ้นอีกด้วย (ทำให้ยางผสมเกิดการเสื่อมสภาพได้เร็วขึ้น)

ตารางที่ 3 แสดงผลของสภาวะการผสมต่อความทนทานต่อการฉีกขาด การเสียรูปหลังการกดอัด และการกระเด็นกระดอน เนื่องจากค่าการกระเด็นกระดอนของยางแปรผันโดยตรงกับระดับของความยืดหยุ่น จากตารางพบว่าระยะเวลาในการผสมไม่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อทั้งสมบัติความทนทานต่อการฉีกขาด การเสียรูปหลังการกดอัด และการกระเด็นกระดอนของยาง ที่เป็นเช่นนี้ คาดว่าน่าจะเกิดจากการหักล้างกันของผลการแตกตัวที่ดีขึ้นของเขม่าดำและผลของการตัดขาดของสายโซ่โมเลกุล เพราะเป็นที่ทราบกันดีว่าการเพิ่ม



ระยะเวลาในการผสมจะส่งผลทำให้เขม่าดำเกิดการแตกตัวได้ดียิ่งขึ้นจึงควรที่จะทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลและมีความยืดหยุ่นสูงขึ้น แต่ในเวลาเดียวกัน การเพิ่มระยะเวลาในการผสมก็ส่งผลทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางเกิดการตัดขาดมากขึ้นด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ การใช้ระยะเวลาในการผสมที่นานเกินไปยังทำให้ยางมีโอกาสเสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพสูงขึ้นอีกด้วย ซึ่งผลกระทบแบบหลังนี้ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลและความยืดหยุ่นที่ต่ำลง

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบสมบัติการเสีรูปลหลังการกดอัดที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูง (ที่สภาวะการผสมเดียวกัน) จะพบว่าการเสีรูปลหลังการกดอัดที่อุณหภูมิสูงมีค่าสูงกว่าการเสีรูปลหลังการกดอัดที่อุณหภูมิห้องค่อนข้างมาก ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากยางผสม NR/EPDM ที่สัดส่วนการผสม 60/40 จะมีวิฤภาคของยางธรรมชาติซึ่งมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนต่ำเป็นเมทริกซ์ ดังนั้น เมื่อยางผสมได้รับการบ่มเร่งด้วยความร้อนในระหว่างการทดสอบ ยางจึงเกิดการเสื่อมสภาพได้อย่างรวดเร็วส่งผลทำให้ยางมีความยืดหยุ่นด้อยลง จึงส่งผลต่อเนื่องทำให้การเสีรูปลหลังการกดอัดที่อุณหภูมิสูงมีค่าค่อนข้างสูง

ผลการทดลองในตารางที่ 3 ยังแสดงให้เห็นว่าการปรับเปลี่ยนความเร็วรอบในการหมุนของโรเตอร์ก็ไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความทนทานต่อการฉีกขาด การเสีรูปลหลังการกดอัด และการกระเด็นกระดอนของยาง แม้ว่าการปรับเพิ่มความเร็วรอบในการหมุนของโรเตอร์อาจส่งผลทำให้เขม่าดำเกิดการแตกตัวได้ดีขึ้นและทำให้ยางมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่สูงขึ้นเล็กน้อย แต่ในเวลาเดียวกัน การปรับเพิ่มความเร็วรอบในการหมุนของโรเตอร์ก็ส่งผลทำให้โมเลกุลของยางเกิดการตัดขาดมากขึ้น และทำให้อุณหภูมิของยางในระหว่างการผสมมีค่าสูงขึ้นค่อนข้างมาก จึงทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพมากขึ้นตามไปด้วย

3.3 ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ (Aging resistance)

จากการศึกษาผลของสภาวะการผสมต่อสมบัติความทนทานต่อความร้อนของยางที่แสดงในรูปของสมบัติสัมพัทธ์ พบว่าการปรับเปลี่ยนระยะเวลาในการผสมและความเร็วรอบในการหมุนของโรเตอร์ไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความทนทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์ ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดสัมพัทธ์ และค่า 100% โมดูลัสสัมพัทธ์ (ดังแสดงในตารางที่ 4) ผลการทดลองดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากผลการศึกษาลักษณะวิทยาของยางผสมเพราะเป็นที่ทราบกันดีว่าตัวแปรหลัก ๆ ที่ควบคุมสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพของยางผสมก็คือลักษณะวิทยา รูปที่ 5 และ 6 แสดงผลที่ได้จากการศึกษาลักษณะวิทยาของยางด้วยเครื่อง AFM จากรูปพบว่า การปรับเพิ่มระยะเวลาในการผสมหรือความเร็วรอบในการหมุนของโรเตอร์ส่งผลกระทบต่อลักษณะวิทยาของยางผสมน้อยมาก ที่เป็นเช่นนี้เพราะแม้ว่าการปรับเพิ่มระยะเวลาในการผสมหรือการปรับเพิ่มความเร็วรอบในการหมุนของโรเตอร์ควรจะส่งผลทำให้วิฤภาคกระจายตัวมีขนาดเล็กลงเพราะยางจะได้รับแรงเฉือนในระหว่างการผสมสูงขึ้น แต่ในเวลาเดียวกัน การปรับเพิ่มตัวแปรในการผสมดังกล่าวก็ส่งผลทำให้ยางผสมมีอุณหภูมิสูงขึ้น ความหนืดของยางผสมจึงลดต่ำลง ซึ่งการลดต่ำลงของความหนืดดังกล่าวจะส่งผลทำให้วิฤภาคกระจายตัวมีโอกาสที่จะกลับเข้ามารวมตัวกัน (coalescence) เกิดเป็นวิฤภาคที่มีขนาดใหญ่มากขึ้นด้วยเช่นกัน



4. สรุปผลการทดลอง

ภายใต้เงื่อนไขการทดลองนี้พบว่าค่าการเพิ่มระยะเวลาในการผสม (5-17 นาที) และความเร็วรอบในการหมุนของโรเตอร์ (30-50 รอบต่อนาที) ส่งผลทำให้ความหนืดของยางลดต่ำลง ในขณะที่การเพิ่มระยะเวลาไม่ส่งผลต่อลักษณะการคงรูปของยางอย่างมีนัยสำคัญ แต่การเพิ่มความเร็วรอบในการหมุนของโรเตอร์จะส่งผลให้ยางที่ได้มีค่าระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสมลดลง ในส่วนของสมบัติเชิงกลพบว่าค่าการปรับเปลี่ยนระยะเวลาในการผสมและความเร็วรอบในการหมุนของโรเตอร์ไม่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติเชิงกลต่างๆ ของยาง เช่น ความทนทานต่อการฉีกขาด การเสียรูปหลังการกดอัด และการกระด้างกระดอง ยกเว้นสมบัติแรงดึงของยางที่พบว่า ค่าความทนทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อยตามการเพิ่มระยะเวลาในการผสม (หรือตามการเพิ่มความเร็วรอบในการหมุนของโรเตอร์) จนกระทั่งถึงจุดสูงสุดหลังจากนั้นค่าความทนทานต่อแรงดึงก็จะเริ่มลดลง โดยในการทดลองนี้ พบว่ายางผสมจะมีค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดเมื่อใช้ระยะเวลาในการผสมเท่ากับ 11 นาที และใช้ความเร็วรอบในการหมุนของโรเตอร์เท่ากับ 40 รอบต่อนาที อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการปรับเปลี่ยนตัวแปรในการผสมทั้งสองดังกล่าวไม่ส่งผลกระทบต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางผสมอย่างมีนัยสำคัญ ด้วยเหตุนี้ ในการทดลองนี้จึงพบว่าสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอื่นเนื่องมาจากความร้อนของยางไม่ขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการผสมและความเร็วรอบในการหมุนของโรเตอร์

เอกสารอ้างอิง

- [1] Tinker, A.J. and Jones, K.P. "Blends of Natural Rubber", Chapman & Hall, Chapter 1, 1998.
- [2] Morrissey, R.T. "Halogenation of ethylene propylene diene rubbers" **Rub. Chem. Tech.**, 1971, 44(4), 1025-1042.
- [3] Baranwal, K.C. and Son, P.N. "Co-curing of EPDM and diene rubbers by grafting accelerators onto EPDM" **Rub. Chem. Tech.**, 1974, 47(1), 88-99.
- [4] Hopper, R.J. "Improved co-cure of EPDM-polydiene blends by conversion of EPDM into macromolecular cure retarder" **Rub. Chem. Tech.**, 1976, 49(1), 341-352.
- [5] Coran, A.Y. "Making rubber blends of diene rubber and EPR or EPDM", Monsanto Company, St. Louis, 1987, US Patent no. 4687810.
- [6] Tobing and Singa, D. "Co-curing of NR/EPDM rubber blends", 1990, US patent no. 4931508.
- [7] Tobing and Singa, D. "Co-curing of NR/EPDM rubber blends", 1989, US patent no. 4882387.
- [8] Sirisinha, C., Sae-oui, P. and Guaysomboon, J. "Mechanical properties, Oil resistance and thermal aging properties in CPE/NR blends" **J. App. Polym. Sci.**, 2002, 84, 22-28.



- [9] Sirisinha, C., Sae-oui, P. and Guaysomboon, J. "Relationship among phase morphology, oil resistance and thermal aging properties in CPE/NR blends: Effect of blending conditions" **J. App. Polym. Sci.**, 2003, 90, 4038-4046.
- [10] Sirisinha, C., Baulek-Limcharoen, S. and Thunyarittikorn, J. "Relationships among blending conditions, size of dispersed phase and oil resistance in natural rubber and nitrile rubber blends" **J. App. Polym. Sci.**, 2001, 82, 1232-1237.
- [11] Sirisinha, C., Limcharoen, S. and Thunyarittikorn, J. "Oil resistance controlled by phase morphology in natural rubber/nitrile rubber blends" **J. App. Polym. Sci.**, 2003, 87, 83-89.
- [12] Sirisinha, C., Thunyarittikorn, J. and Yartpakdee, S. "A study of carbon black distribution in BR/NBR blends, based on damping properties: Effect of some grades of carbon black Plastics" **Rub. Compos. Process. App.**, 1998, 27, 373-375.
- [13] Sirisinha, C. and Prayoonchatphan, N. "Study of carbon black distribution in BR/NBR blends: Influences of carbon black particle size, filler and rubber polarity" **J. App. Polym. Sci.**, 2001, 81, 3198-3203.
- [14] พงษ์ธร แซ่อู๋, ชาคริต สิริสิงห, อุทัย เทพสุวรรณ, ภูษงค์ ทับทอง ผลของปริมาณ ไดอินและสัดส่วนการผสมต่อสมบัติของยางผสมระหว่าง ยางธรรมชาติ (NR) และยางเอทรีลีนโพรพิลีนไดอิน (EPDM). **วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง**, 2550, 16(1), 15-32



ตารางที่ 1 สูตรการผสมเคมีของยางคอมพาวด์

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (phr)	เวลาที่เติมลงไปนเครื่องผสม (นาที)					
		0	0	0	0	0	0
ยางธรรมชาติ (STR 5L)	60.0	0	0	0	0	0	0
ยางเอทธิลีน โพรพิลีน ไดอีน EPDM (Nordel 4640)	40.0	0	0	0	0	0	0
ZnO	5.0	0	0	0	0	0	0
Stearic acid	2.0	0	0	0	0	0	0
Carbon black (N330)	30.0	2	2	2	2	2	2
TBBS*	1.0	3	5	7	9	11	15
S _x	1.8	3	5	7	9	11	15
ระยะเวลารวมที่ใช้ในการผสม		5	7	9	11	13	17

*บิวทิล-2-เบนโซโรอะซิลซัลฟิโนไมด์

ตารางที่ 2 ผลของสภาวะในการผสมต่อพฤติกรรมการผสม ความหนืดมูนี และลักษณะการคงรูปของยางผสม

สภาวะในการผสม	พลังงาน ในการผสม ($\times 10^3$ J)	ความหนืด มูนี* (MU)	ลักษณะการคงรูป			
			ระยะเวลา สกอรัช (นาที)	ระยะเวลาในการ คงรูปที่เหมาะสม (นาที)	ผลต่างของ แรงบิด (dN.m)	
ระยะเวลาในการผสม (นาที)	5	1.68	53.93	2.21	5.63	0.96
	7	2.28	52.10	2.09	4.97	0.99
	9	2.91	48.09	2.15	5.02	0.99
	11	3.57	47.72	2.17	5.13	1.01
	13	4.09	47.18	2.27	4.98	0.99
	17	5.18	42.33	2.29	5.03	1.01
ความเร็วรอบในการ หมุนของโรเตอร์ (รอบต่อนาที)	30	2.5	52.1	2.29	5.11	0.87
	40	3.2	48.1	2.28	5.10	0.94
	50	4.0	47.7	2.25	5.05	0.95

*(ML 1+4@ 125 °C)

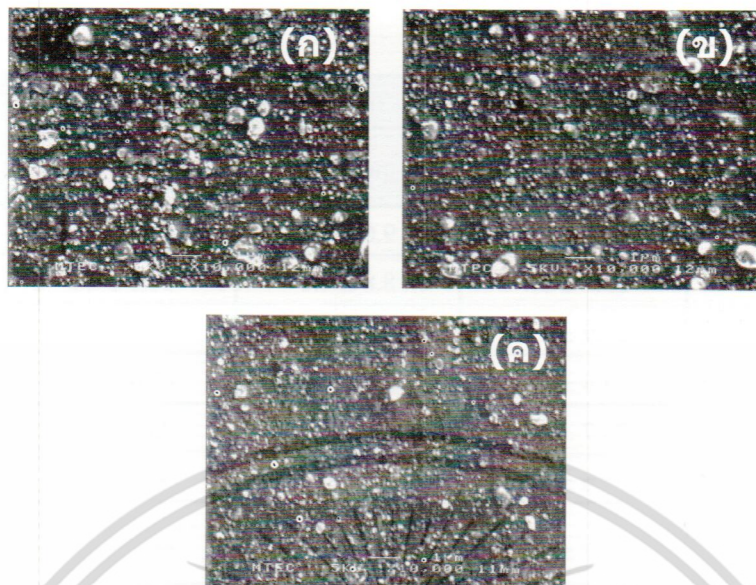


ตารางที่ 3 ผลของสภาวะในการผสมต่อความทนทานต่อการฉีกขาด การเสียรูปหลังการกดอัด และการกระเด็น
กระดอน

สภาวะในการผสม	ความทนทานต่อ การฉีกขาด (N/mm)	การเสียรูปหลังการกดอัด (%)		การกระเด็น กระดอน (%)	
		ณ อุณหภูมิห้อง	ณ อุณหภูมิ 100 °C		
ระยะเวลาในการผสม (นาที)	5	26.5 ± 0.5	9.6 ± 0.3	66.1 ± 0.8	28.6 ± 0.0
	7	29.9 ± 0.7	8.8 ± 0.2	64.1 ± 2.2	29.4 ± 0.3
	9	25.9 ± 0.7	8.9 ± 0.2	65.9 ± 0.5	29.8 ± 0.5
	11	25.4 ± 0.1	9.1 ± 0.3	67.8 ± 1.5	30.4 ± 0.3
	13	25.7 ± 0.7	8.5 ± 0.1	70.0 ± 1.0	30.4 ± 0.3
	17	25.6 ± 0.5	8.8 ± 0.3	69.4 ± 1.5	29.8 ± 0.3
ความเร็วรอบในการ หมุนของโรเตอร์ (รอบต่อนาที)	30	17.7 ± 1.8	13.2 ± 0.6	66.7 ± 1.5	38.0 ± 0.3
	40	19.2 ± 2.9	12.8 ± 0.3	66.8 ± 1.2	38.1 ± 0.2
	50	18.3 ± 5.7	12.9 ± 0.2	67.9 ± 0.2	38.1 ± 0.2

ตารางที่ 4 ผลของสภาวะในการผสมต่อสมบัติความทนทานต่อความร้อน

สภาวะในการผสม		สมบัติสัมพัทธ์		
		ความทนทานต่อแรงดึง	การยึดตัว ณ จุดขาด	100% มอดูลัส
ระยะเวลาในการผสม (นาที)	5	0.76 ± 0.03	0.70 ± 0.02	1.21 ± 0.06
	7	0.74 ± 0.04	0.66 ± 0.02	1.23 ± 0.08
	9	0.75 ± 0.07	0.65 ± 0.05	1.29 ± 0.05
	11	0.70 ± 0.01	0.63 ± 0.02	1.28 ± 0.03
	13	0.72 ± 0.01	0.64 ± 0.03	1.33 ± 0.11
	17	0.72 ± 0.03	0.67 ± 0.01	1.26 ± 0.07
ความเร็วรอบในการ หมุนของโรเตอร์ (รอบต่อนาที)	30	0.83 ± 0.01	0.68 ± 0.03	1.31 ± 0.04
	40	0.82 ± 0.01	0.71 ± 0.02	1.27 ± 0.05
	50	0.83 ± 0.02	0.74 ± 0.03	1.27 ± 0.02

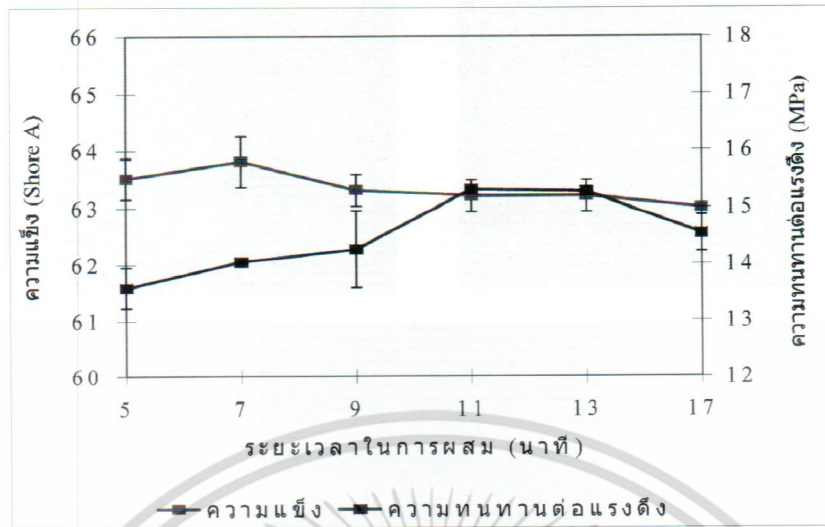


รูปที่ 1 SEM ไมโครกราฟ ($\times 10^4$ เท่า) แสดงการแตกตัวของเขม่าดำที่ระยะเวลาในการผสมต่าง ๆ (ก) 7 นาที (ข) 11 นาที และ (ค) 17 นาที

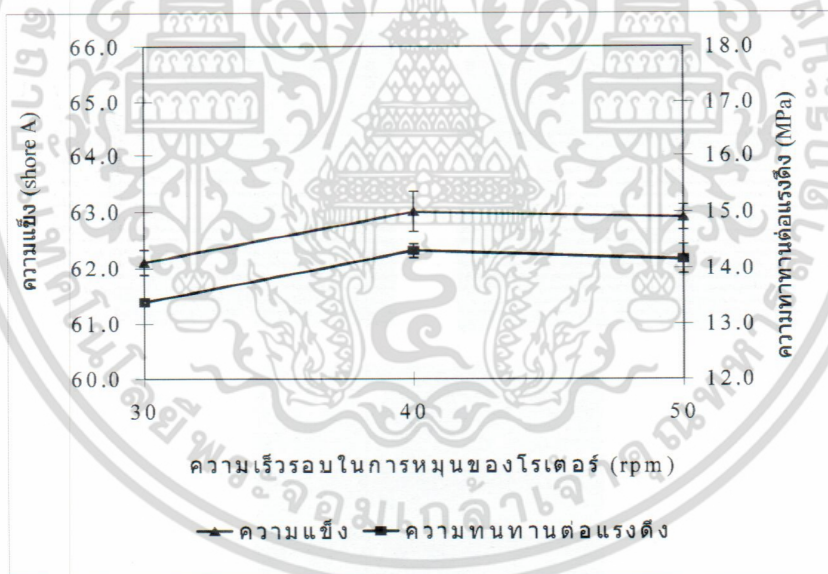


รูปที่ 2 SEM ไมโครกราฟ ($\times 10^4$ เท่า) แสดงการแตกตัวของเขม่าดำที่ความเร็วรอบในการหมุนของโรเตอร์ต่าง ๆ (ก) 30 รอบต่อนาที (ข) 40 รอบต่อนาที และ (ค) 50 รอบต่อนาที

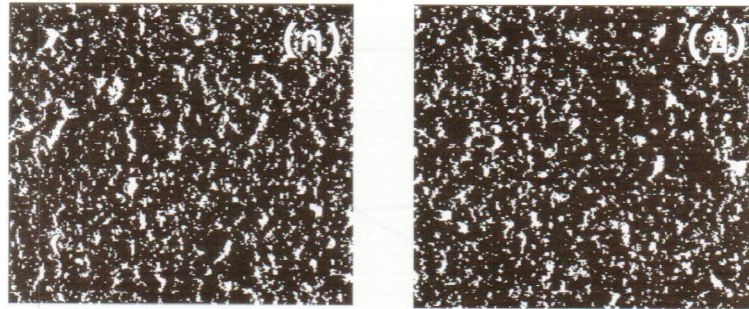
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



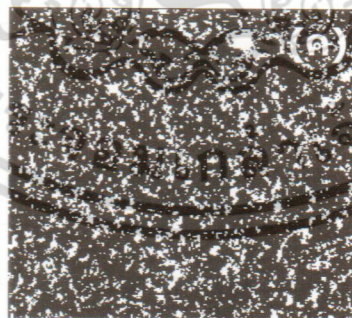
รูปที่ 3 ผลของระยะเวลาในการผสมต่อความแข็งและความทนทานต่อแรงดึง ของยาง



รูปที่ 4 ผลของความเร็วยรอบในการหมุนของโรเตอร์ต่อความแข็งและความทนทานต่อแรงดึงของยาง



รูปที่ 5 AFM ไมโครกราฟ (ขนาดการส่องกราด 20 ไมครอน) แสดงลักษณะพื้นผิวของยางที่ระยะเวลาในการผสมต่าง ๆ (ก) 7 นาที (ข) 11 นาที และ (ค) 17 นาที



รูปที่ 6 AFM ไมโครกราฟ (ขนาดการส่องกราด 20 ไมครอน) แสดงลักษณะพื้นผิวของยางที่ความเร็วรอบการหมุนของโรเตอร์ต่าง ๆ (ก) 30 รอบต่อนาที (ข) 40 รอบต่อนาที และ (ค) 50 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้