



ร่างรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การศึกษาความแข็งแรงรอยประสานในชิ้นงานยางธรรมชาติผสม

โดย สมเจตน์ พัชรพันธ์ และคณะ

ตุลาคม 2553

ร่างรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การศึกษาความแข็งแรงรอยประสานในชิ้นงานยางธรรมชาติผสม

คณะผู้วิจัย

สังกัด

- | | |
|-------------------------------|---|
| 1. ดร. สมเจตน์ พัทธพันธ์ | ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 2. นางสาวธนัญญา ใจใหญ่ | ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 3. นายธนวัฒน์ ตั้งเชื่อนพันธ์ | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 4. นายวัชรพงษ์ ชูแก้ว | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |

ชุดโครงการวิจัยแห่งชาติ: ยางพารา

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานความก้าวหน้าฉบับนี้ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

สารบัญ

	หน้า
บทสรุปรายงานสำหรับผู้บริหาร	1
บทคัดย่อ	5
เนื้อหา	
ความสำคัญและที่มาของโครงการ	7
วัตถุประสงค์	15
วิธีการ	16
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล	23
สรุปผล	38
ข้อเสนอแนะ	38
เอกสารอ้างอิง	39
ภาคผนวก	44

แบบสรุปย่อสำหรับผู้บริหาร

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย): การศึกษาความแข็งแรงรอยประสานในชิ้นงานยางธรรมชาติผสม

(ภาษาอังกฤษ): An Investigation into Weld Line Strength of Natural Rubber Blends

ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานสังกัด และที่อยู่

ชื่อ-สกุล ดร. สมเจตน์ พชรพันธ์

หน่วยงาน ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ที่อยู่ 50 ถนนพหลโยธิน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

โทรศัพท์/โทรสาร 02-942-8555 ต่อ 2121/02-955-1811 E-mail fengsjpc@ku.ac.th

นักศึกษา/ผู้ร่วมวิจัย

นายธนวัฒน์ ตั้งเชื่อนพันธ์

ผู้ร่วมวิจัย

นายวัชรพงษ์ ชูแก้ว

ผู้ร่วมวิจัย

ระยะเวลาดำเนินการ 9 เดือน ตั้งแต่วันที่ 15 กรกฎาคม 2552 ถึงวันที่ 14 เมษายน 2553

ปัญหาที่ทำวิจัยและความสำคัญ

ยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการคงรูปแล้วมีสมบัติทางกลและสมบัติเชิงพลวัตที่ดีมาก อีกทั้งเป็นยางธรรมชาติยังเป็นวัตถุดิบที่สามารถผลิตขึ้นภายในประเทศและสามารถขึ้นรูปได้ด้วยกัมมันต์ซึ่งมีราคาถูก ด้วยข้อดีดังกล่าวนี้ทำให้ผู้ประกอบการผลิตภัณฑ์ยางของประเทศไทยนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิด อย่างไรก็ตามสมบัติยางธรรมชาติยังคงมีสมบัติด้อยบางประการเมื่อเทียบกับยางสังเคราะห์ ยกตัวอย่างเช่น สมบัติการทนต่อสภาพแวดล้อมและการทนต่อน้ำมัน เทคโนโลยีการผลิตยางผสมจากยางธรรมชาติเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติให้เหมาะสมกับการใช้งานให้กว้างขวางมากขึ้น โดยการนำยางธรรมชาติมาผสมกับยางสังเคราะห์ที่มีสมบัติเด่นในด้านต่างๆ เช่น ยาง NBR ที่มีสมบัติทนน้ำมัน และยาง EPDM ที่ทนต่อสภาพแวดล้อม เป็นต้น ในปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมมีความต้องการผลิตภัณฑ์หลากหลายและมีความซับซ้อนมากขึ้น ทั้งในส่วนของรูปร่างของผลิตภัณฑ์ สี และสมบัติที่เหมาะสมต่อการใช้งาน ในอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ยางของประเทศไทยนิยมใช้กระบวนการอัดขึ้นรูปมากที่สุด เนื่องจากต้นทุนด้านเครื่องจักรและแม่พิมพ์ที่ไม่สูงนัก อย่างไรก็ตามทุกกระบวนการที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อาจเกิดการไหลแยกของยางภายในแม่พิมพ์แล้วเกิดการไหลมาบรรจบกันอีกครั้งหนึ่ง เกิดเป็นข้อบกพร่องบนชิ้นงานที่เรียกว่า รอยประสาน (Weld Line) ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานลดลงไปอย่างมาก งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความแข็งแรงรอยประสานของยางธรรมชาติที่ผสมกับยางสังเคราะห์ ซึ่งได้แก่ ยาง EPDM และ ยาง NBR โดยแปรสัดส่วนการผสม และศึกษาความแข็งแรงรอยประสานระหว่างยางผสมแต่ละชนิด รวมทั้งศึกษาอิทธิพลของการบ่มเร่งด้วยความร้อน (Thermal aging) การบ่มเร่งในน้ำมัน (Oil aging) และการบ่มเร่งด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต (UV aging) ที่มีต่อความแข็งแรงรอยประสานในผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติผสมเพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งานต่อไป

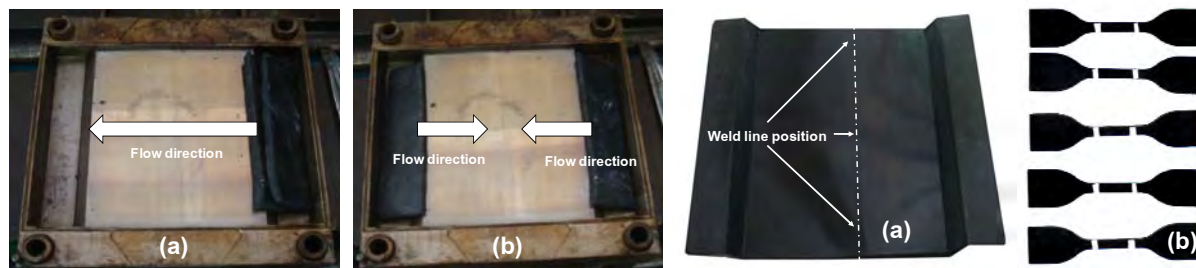
วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความแข็งแรงรอยประสานของยางธรรมชาติที่ผสมกับ EPDM และ NBR
2. เพื่อศึกษาความแข็งแรงรอยประสานระหว่างยางผสมแต่ละชนิด
3. เพื่อศึกษาสมบัติทางกลของยางผสมที่มีรอยประสานภายหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน รังสีอัลตราไวโอเลต และบ่มเร่งในน้ำมัน

ผลการดำเนินงาน

1. วิธีการ

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและจัดสร้างแม่พิมพ์อัดที่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบที่มีและไม่มีรอยประสานได้ การเตรียมชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสานสามารถทำได้โดยการวางยางคอมปาวด์ในควิตี้ 1 หรือควิตี้ 2 (ดังภาพที่ 1a) จากนั้นอัดด้วยแรงดันและอุณหภูมิคงรูป ซึ่งยางคอมปาวด์ไหลจากด้านหนึ่งของแม่พิมพ์ไปยังอีกด้านหนึ่ง ในขณะที่การเตรียมชิ้นงานทดสอบที่มีรอยประสานนั้น ให้ทำการวางยางคอมปาวด์ทั้งสองควิตี้ (ดังภาพที่ 1b) แล้วทำการอัดขึ้นรูป โดยยางคอมปาวด์จะไหลมาประสานกันที่บริเวณส่วนกลางแม่พิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 2a



ภาพที่ 1 การอัดขึ้นรูปชิ้นงานขึ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน

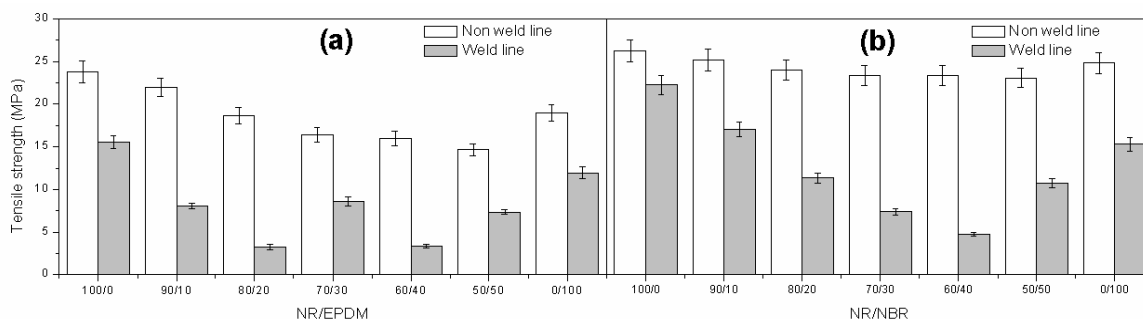
ภาพที่ 2 ชิ้นงานยางและชิ้นงานทดสอบที่มีรอยประสาน

นำชิ้นงานที่ผ่านการอัดขึ้นรูปมาตัดเป็นดัมเบลตามมาตรฐาน ISO 37 (Type1) ดังแสดงในภาพที่ 2b แบ่งชิ้นงานทดสอบออกเป็น 4 การทดลอง โดยส่วนแรกเป็นชิ้นงานที่เพื่อเตรียมทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงโดยไม่ผ่านการบ่มแรง ส่วนที่สองนำไปผ่านการบ่มแรงด้วยความร้อนตามมาตรฐาน ASTM D573 ส่วนที่สามนำไปผ่านกระบวนการบ่มแรงในน้ำมันตามมาตรฐาน ASTM D 417-79 และส่วนที่สี่นำไปผ่านกระบวนการบ่มแรงด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตตามมาตรฐาน ASTM D4329 จากนั้นนำชิ้นงานทั้งก่อนและภายหลังการบ่มแรงตามเงื่อนไขต่างๆ ไปทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D572

2. ผลการวิจัยและวิจารณ์

อิทธิพลของปริมาณยาง EPDM และ NBR ที่มีต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานยางผสม NR/EPDM และ NR/NBR

เมื่อเพิ่มปริมาณยาง EPDM ในยางผสม ดังภาพที่ 3a พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากอัตราการคงรูปของยางทั้งสองชนิดที่แตกต่างกัน [1] และเมื่อพิจารณาความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดชิ้นงานที่มีรอยประสาน พบว่า ค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสานอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องมาจากการแพร่ข้ามของสายโซ่โมเลกุลที่ไม่สมบูรณ์ หรือมีการเกี่ยวพันของสายโซ่โมเลกุลที่ไม่ดี รวมทั้งการเกิดร่องบากตัววี (V-notch) ที่ผิวของชิ้นงานและมีโพรงอากาศที่บริเวณหน้าสัมผัส ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่มีรอยประสานลดลงอย่างชัดเจน [2, 3]



ภาพที่ 3 ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางผสม NR/EPDM และ NR/NBR ที่มีและไม่มีรอยประสาน

เมื่อพิจารณาชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสานของชิ้นงานยาง NR/NBR ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน ดังภาพที่ 3b พบว่า มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งโดยทั่วไปแล้วยาง NR มีความต้านทานต่อแรงดึงที่สูงกว่ายาง NBR [4] ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอิทธิพลจากการเสริมแรงเคมีดำซึ่งมีปริมาณสูงถึง 60 phr และเมื่อพิจารณาชิ้นงานที่มีรอยประสาน พบว่า ค่าความแข็งแรงมีค่าต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสานดังเหตุผลที่ได้อธิบายไปแล้ว

อิทธิพลของการบ่มแรงด้วยความร้อนที่มีต่อความแข็งแรงของรอยประสานในยางผสม NR/EPDM และ NR/NBR

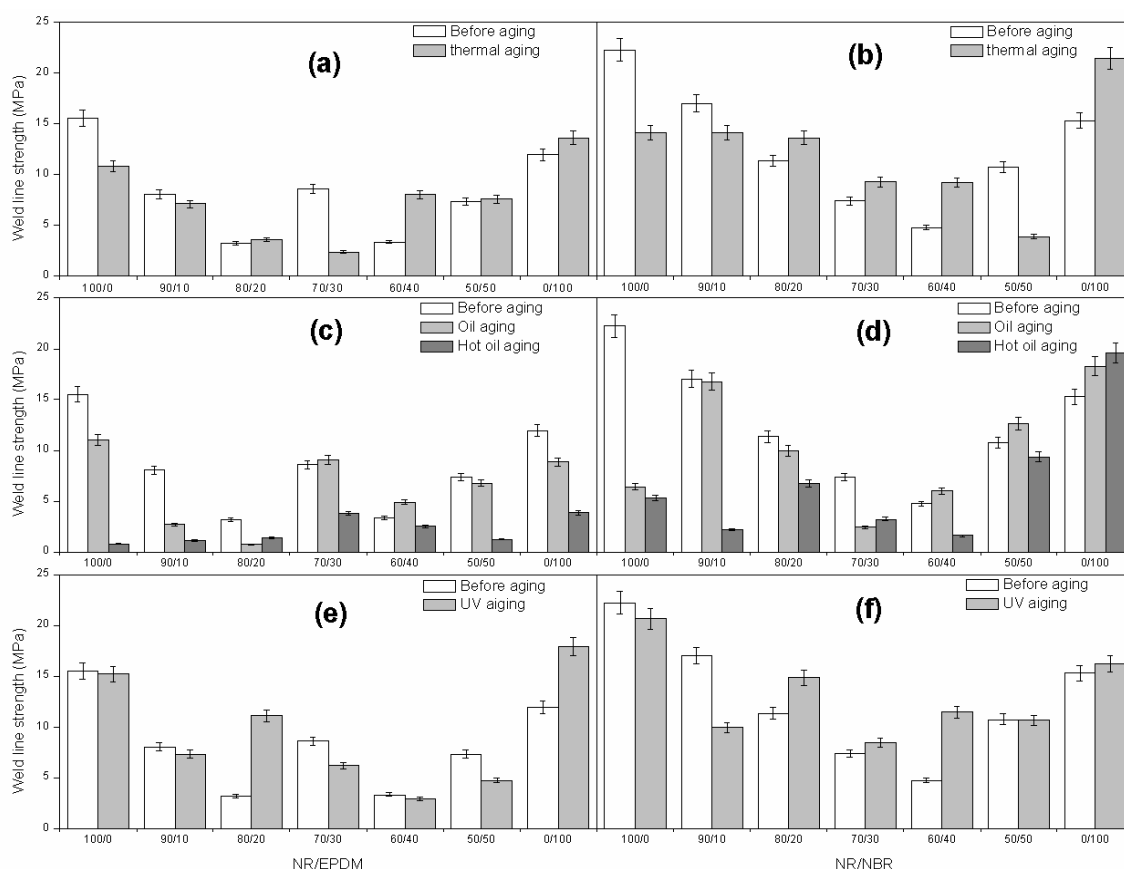
หากพิจารณาถึงอิทธิพลของการเพิ่มปริมาณยาง EPDM และ NBR ดังภาพที่ 4a และ 4b พบว่า ความแข็งแรงของรอยประสานของชิ้นงานยางผสมมีแนวโน้มที่ดีขึ้นภายหลังจากการบ่มแรงด้วยความร้อน กล่าวคือการเพิ่มปริมาณยาง EPDM และ NBR ได้ช่วยปรับปรุงสมบัติความต้านทานการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนของชิ้นงานที่มีรอยประสานของยางผสม

อิทธิพลของการบ่มแรงด้วยน้ำมันที่มีต่อความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานยางผสม NR/EPDM และ NR/NBR

จากภาพที่ 4c พบว่า การเพิ่มปริมาณยาง EPDM ส่งผลให้ความแข็งแรงรอยประสานมีแนวโน้มลดลง และเมื่อพิจารณาการทดสอบความแข็งแรงรอยประสานภายหลังจากการบ่มแรงด้วยน้ำมันร้อน พบว่าทุกสัดส่วนการผสมความแข็งแรงรอยประสานลดลงอย่างมาก หลังผ่านการบ่มแรงด้วยน้ำมันร้อน ทั้งนี้เนื่องจากความร้อนเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาการซึมผ่านของน้ำมันเข้าสายโซ่โมเลกุลของยางได้ง่ายขึ้น ประกอบกับที่บริเวณรอยประสานมีรอยตำหนิจากการเชื่อมโยงที่ไม่สมบูรณ์และมีอากาศตกค้าง ส่งผลให้น้ำมันสามารถแทรกตัวเข้าไปยังตำแหน่งดังกล่าวได้มากขึ้น สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงจึงลดลงอย่างชัดเจนภายหลังจากบ่มแรงด้วยน้ำมันร้อน นอกจากนี้จากผลการทดสอบความแข็งแรงรอยประสานในชิ้นงานยางผสมเมื่อผ่านการบ่มแรงด้วยน้ำมันที่อุณหภูมิห้อง NR/NBR ดังภาพที่ 4d พบว่า การเพิ่มปริมาณยาง NBR ทำให้ค่าความแข็งแรงรอยประสานของยางมีแนวโน้มที่ดีขึ้น ทั้งนี้เนื่องสมบัตการทนต่อน้ำมันของยาง NBR และเมื่อพิจารณาผลการบ่มแรงด้วยน้ำมันร้อน พบว่า มีผลทำให้ความแข็งแรงของรอยประสานในชิ้นงานยางผสม NR/NBR ลดลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากยาง NBR ได้ช่วยปรับปรุงสมบัติการทนต่อน้ำมันและความร้อน

อิทธิพลของการบ่มแรงด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีต่อความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานยางผสม NR/EPDM และ NR/NBR

หากพิจารณาภาพที่ 4e พบว่า การเพิ่มปริมาณยาง EPDM ได้ช่วยปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงหลังจากการบ่มแรงด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตเนื่องจากยาง EPDM มีความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพที่ดี ภาพที่ 4f แสดงผลการทดสอบที่ได้จากยางผสม NR/NBR จากผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มปริมาณยาง NBR ในชิ้นงานยางผสมทำให้ความแข็งแรงรอยประสานมีแนวโน้มที่ดีขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากสมบัติการทนต่อความร้อนที่ดีของยาง NBR ซึ่งภายใต้สภาวะที่บ่มแรงด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต และอุณหภูมิสูงส่งผลให้มีปริมาณการเชื่อมโยงหลังกระบวนการคงรูปมากกว่าการขาดของสายโซ่โมเลกุลและพันธะก้ำะถัน



ภาพที่ 4 ความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางผสม NR/EPDM และ NR/NBR ก่อนและหลังการบ่มแรงความร้อน น้ำมัน และรังสีอัลตราไวโอเล็ต

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยาง NR ผสมที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป โดยพบว่า ความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานยาง NR ที่ผสมยาง EPDM และยาง NBR มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณยาง EPDM และยาง NBR จากผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานที่มีรอยประสาน พบว่า มีค่าต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสานอย่างมีนัยสำคัญ และพบว่าความ

แข็งแรงรอยประสานของยาง NR ผสมยาง EPDM และยาง NBR มีแนวโน้มที่ดีขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณยาง EPDM และ NBR ภายหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน เมื่อนำชิ้นงานยางผสมไปผ่านการบ่มเร่งด้วยน้ำมันที่อุณหภูมิห้อง พบว่า ค่าความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยาง NR ผสมยาง EPDM มีค่าลดลง ในขณะที่ค่าความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยาง NR ผสมยาง NBR มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น และเมื่ออุณหภูมิของน้ำมันสูงขึ้น ค่าความแข็งแรงรอยประสานของยาง NR ผสมยาง EPDM มีแนวโน้มลดลง ในทางตรงข้ามชิ้นงานยาง NR ผสมยาง NBR มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น จากผลการทดสอบที่ได้จากการบ่มเร่งด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต แสดงให้เห็นว่า รังสีอัลตราไวโอเลตไม่มีผลต่อความแข็งแรงของยางผสม ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากอิทธิพลของเขม่าดำที่ผสมลงในยาง ซึ่งเป็นสารช่วยต้านทานการเสื่อมสภาพเนื่องจากรังสีอัลตราไวโอเลตที่ดี

ข้อเสนอแนะที่คาดว่าจะควรวิจัยเพิ่มเติม

ควรมีการศึกษาสมบัติด้านอื่นๆ ของยางผสม NR/EPDM และยาง NR/NBR ตัวอย่างเช่น ความต้านทานการอัดตัว (Compression Set) ความต้านทานต่อการขัดสี (Abrasion) และการทดสอบความล้า (Fatigue) เป็นต้น เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการประยุกต์ใช้งานยางธรรมชาติผสมต่อไป

ผลงานทางวิชาการที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

นำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติในการประชุมวิชาการโพลิเมอร์แห่งประเทศไทยครั้งที่ 1 ในหัวข้อ “An Investigation of Weldline Strength in Natural Rubber Blends”

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางธรรมชาติผสมที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป โดยยางสังเคราะห์ที่นำมาผสม ได้แก่ ยางเอทธิลีนโพรพิลีนไดอีนมอนอเมอร์ (EPDM) และยางไนไตรล์ (NBR) นอกจากนี้ยังได้ศึกษาอิทธิพลของการบ่มเร่งด้วยความร้อน น้ำมัน และรังสีอัลตราไวโอเลต ที่มีต่อความแข็งแรงของประสานในยางธรรมชาติผสม จากผลการทดสอบพบว่า ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานที่มีรอยประสานมีค่าต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดร่องบากตัววีที่ผิวชิ้นงานและการเกิดโพรงอากาศที่บริเวณรอยประสาน จากผลการศึกษาอิทธิพลของการบ่มเร่งด้วยความร้อน น้ำมัน และรังสีอัลตราไวโอเลต แสดงให้เห็นว่ายางธรรมชาติที่ผสมยาง EPDM ให้สมบัติการต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนที่ดีขึ้น ในขณะที่การผสมยาง NBR ให้สมบัติการต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนและน้ำมันที่ดีขึ้น จากผลการทดสอบการบ่มเร่งด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตพบว่าความแข็งแรงของรอยประสานมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากอิทธิพลของการเติมเซมาดำในปริมาณที่สูงถึง 60 phr ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นสารต้านการเสื่อมสภาพเนื่องจากรังสีอัลตราไวโอเลตได้

คำสำคัญ : ยางธรรมชาติผสม ความแข็งแรงรอยประสาน กระบวนการอัดขึ้นรูป สมบัติความต้านทานการเสื่อมสภาพ

Abstract

In this present study, the synthetic rubbers were blended into natural rubber (NR) in order to enhance the aging properties of NR containing weld line. The synthetic rubbers used in this work were Ethylene Propylene Diene Monomer (EPDM) and Nitrile Rubber (NBR). The influence of blend ratio on the rheological and mechanical properties of NR blends was studied in details. The rubber compounds and vulcanizates were characterized with respect to Mooney viscosity, cure characteristic, tensile and weld line strength. The effect of adding EPDM and NBR on the heat, oil and ultraviolet resistances was also investigated. The results from the tensile testing indicated that the tensile strength of the specimen with weldline were significantly lower than the values obtained for the specimen without weldline. This was associated with the existences of V-notch at the weld surface and microvoids at the weld interface which also can be a source of stress concentration and thus it would be easy to break at this position. Considering the effect of compounding EPDM and NBR on the aging properties, it was observed that the adding EPDM and NBR improved the heat and oil resistance of NR. With regard to the effect of UV aging, it was found that the weld line strength of NB blends did not significantly change after the aging test. The explanation for this would be associated with the presence of carbon black (60 phr) which can acts as an efficient UV stabilizers.

Keywords: Natural Rubber Blends, Weld Line Strength, Compression Molding, Aging Properties

1. ความสำคัญและที่มาของโครงการ

ยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการคงรูปแล้วมีสมบัติทางกล (mechanical property) และสมบัติเชิงพลวัต (dynamic property) ที่ดีมาก อีกทั้งเป็นยางธรรมชาติยังเป็นวัตถุดิบที่สามารถผลิตขึ้นภายในประเทศ และสามารถขึ้นรูปได้ด้วยกำมะถันซึ่งมีราคาถูก ด้วยข้อดีดังกล่าวนี้ทำให้ผู้ประกอบการผลิตภัณฑ์ยางของประเทศไทยนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิด เช่น ยางกันสั่นสะเทือน ยางปิดน้ำฝน ล้อยาง ชีลยาง ท่อส่งน้ำมัน และอุปกรณ์ด้านการแพทย์ เป็นต้น อย่างไรก็ตามสมบัติบางประการของยางธรรมชาติด้อยกว่ายางสังเคราะห์ ตัวอย่างเช่น สมบัติการทนต่อสภาพแวดล้อม (โอโซน ออกซิเจน และรังสีอัลตราไวโอเลต) เนื่องจากโครงสร้างของยางธรรมชาติซึ่งมีพันธะไม่อิ่มตัว (Unsaturated Bond) หรือพันธะคู่ (Double Bond) ที่สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนหรือรังสีอัลตราไวโอเลตโดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาขณะใช้งานภายนอก และนอกจากนี้ยางธรรมชาติยังมีสมบัติการทนต่อน้ำมัน (Oil Resistance) ที่ไม่ดี เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้วจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน เป็นต้น จากข้อจำกัดดังกล่าวนี้ทำให้ไม่สามารถผลิตผลิตภัณฑ์บางอย่างที่ต้องการคุณสมบัติเหล่านี้ เทคโนโลยีการผลิตยางผสมจากยางธรรมชาติ (Technology of Natural Rubber Blends) เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติให้เหมาะสมกับการใช้งานให้กว้างขวางมากขึ้น โดยการนำยางธรรมชาติมาผสมกับยางสังเคราะห์ที่มีสมบัติเด่นต่าง ๆ เช่น ในกรณีที่ต้องการผลิตภัณฑ์ยางที่ทนต่อแรงดึงและสามารถทนต่อน้ำมันได้ สามารถใช้วิธีการผสมยางธรรมชาติที่มีสมบัติทนต่อแรงดึงสูงกับ NBR ที่มีสมบัติทนน้ำมันหรือต้องการผลิตภัณฑ์ที่ทนต่อสภาพแวดล้อมภายนอก สามารถพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้มีสมบัติดีขึ้นโดยการนำยางธรรมชาติผสมกับ EPDM ซึ่งมีสมบัติการต้านทานโอโซน (Ozone Resistance) ที่ดี เป็นต้น

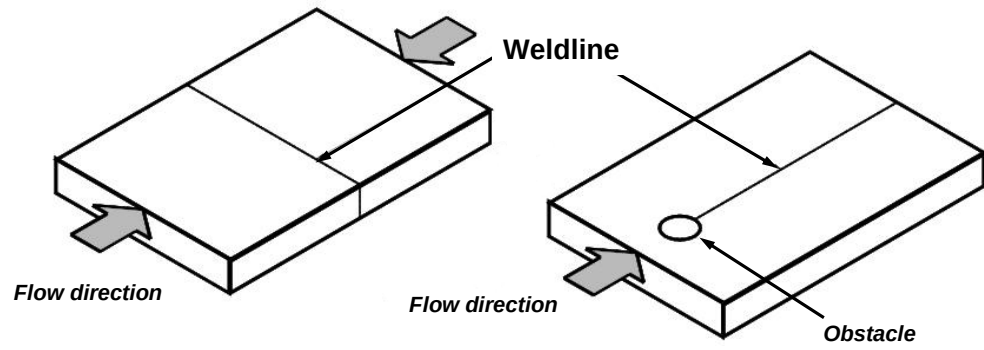
ในปัจจุบันต้องการผลิตภัณฑ์หลากหลายและมีความซับซ้อนมากขึ้น ทั้งในส่วนของรูปร่างของผลิตภัณฑ์และสมบัติที่เหมาะสมต่อการใช้งาน หรือแม้กระทั่งด้านความสวยงาม ผลิตภัณฑ์เหล่านี้ส่วนใหญ่ถูกนำไปขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ ทั้งกระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression Molding) กระบวนการอัดส่ง (Transfer Molding) และกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection Molding) ซึ่งพบว่า ในอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ยางขนาดกลางและขนาดเล็กของประเทศไทยนิยมใช้กระบวนการอัดขึ้นรูปมากที่สุด เนื่องจากใช้ต้นทุนด้านเครื่องจักรและด้านแม่พิมพ์ไม่สูงมากนัก อีกทั้งการใช้งานไม่ซับซ้อน อย่างไรก็ตามทุกกระบวนการที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อาจเกิดการไหลแยกของพอลิเมอร์หลอมเหลวภายในแม่พิมพ์แล้วเกิดการไหลมาบรรจบกันอีกครั้งหนึ่ง เกิดเป็นข้อบกพร่องบนชิ้นงานที่เรียกว่า รอยประสาน (Weld Line) ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานลดลงไปอย่างมาก นอกจากนี้ในผลิตภัณฑ์ยางบางประเภทที่ต้องการสีสนหลากหลายหรือที่ต้องการสมบัติที่แตกต่างกันบนชิ้นงานเดียวกัน ยกอย่างเช่น ในบางส่วนต้องการความยืดหยุ่นตัวสูง และอีกส่วนหนึ่งที่ต้องนำไปประกอบกับอุปกรณ์เคลื่อนที่ซึ่งต้องการความแข็งแรงสูง หรือมีสมบัติการทนต่อการขัดถูที่ดี รวมทั้งสามารถทนต่อสภาพที่ต้องสัมผัสกับน้ำมันหรือ

สารเคมี ผลิตภัณฑ์ที่กล่าวมาข้างต้นแล้วแต่มีรอยประสานบนชิ้นงานอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ดังนั้นเมื่อมีการนำไปใช้งานอาจเกิดปัญหาจากรอยประสานได้

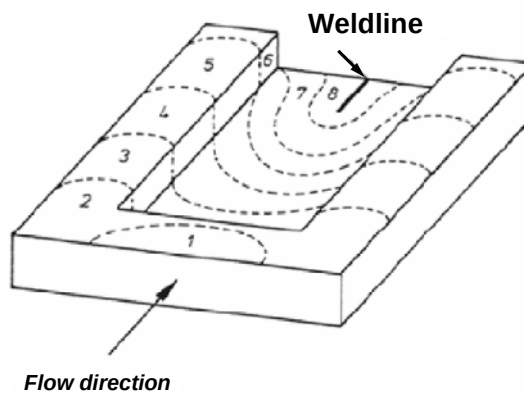


รูปที่ 1 ตำแหน่งการเกิดรอยประสาน ในกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง

รอยประสานที่เกิดขึ้นบนผลิตภัณฑ์ยาง มีสาเหตุมาจากการไหลของเนื้อยางในแต่ละทิศทางเข้ามาบรรจบกัน หรือการไหลอ้อมสิ่งกีดขวาง (Obstacle) ภายในแม่พิมพ์อัด ดังแสดงในรูปที่ 2 ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เกิดรอยตำหนิและสมบัติทางกลที่บริเวณดังกล่าวลดลงอย่างมาก (Seadan *et al.*, 2002; Chookaew *et al.*, 2010a; Chookaew *et al.*, 2010b) โดยทั่วไปแล้วการเกิดรอยประสานบนผลิตภัณฑ์มีสาเหตุหลักมาจากการออกแบบแม่พิมพ์ที่ไม่เหมาะสม เช่นการออกแบบแม่พิมพ์ที่มีความหนาของผนัง (Wall Thickness) ที่แตกต่างกันมาก ดังแสดงในรูปที่ 3 นอกจากนี้การเกิดรอยประสานยังคงพบมากและไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งมีความจำเป็นต้องทำการวางยางคอมปาว์ในหลายตำแหน่งภายในแม่พิมพ์เพื่อให้ยางเกิดการไหลได้เต็มแม่พิมพ์ในช่วงเวลาที่กำหนดก่อนเกิดการสุกของยาง (Scorch Time) ซึ่งการเกิดรอยประสานในชิ้นงานยางนี้ เป็นปัญหาหลักที่พบมากในภาคอุตสาหกรรม โดยผู้ประกอบการไม่ทราบถึงสาเหตุและแนวทางการแก้ไขปัญหา ยกตัวอย่าง เช่น การเกิดปัญหาความเสียหายของผลิตภัณฑ์ที่บริเวณรอยประสาน ซึ่งมีความแข็งแรงที่ไม่ได้ตามมาตรฐานที่ลูกค้ากำหนด และการเกิดการฉีกขาดของผลิตภัณฑ์ในขณะที่ทำการดึงออกจากแม่พิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 2 ลักษณะของการเกิดรอยประสาน

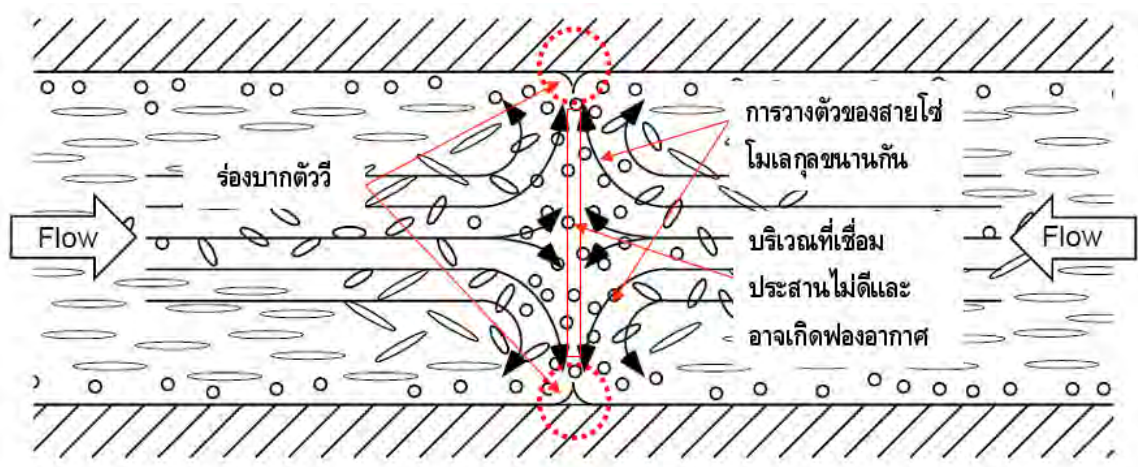


รูปที่ 3 การเกิดรอยประสานเมื่อความหนาของผนังชิ้นงานภายในแม่พิมพ์แตกต่างกันมาก



รูปที่ 4 การนิยามของผลิตภัณฑ์ที่ตำแหน่งรอยประสาน

การที่ชิ้นงานมีความแข็งแรงลดลงอย่างมากตรงบริเวณรอยประสานสามารถอธิบายได้ดังนี้ คือ (1) การที่บริเวณหน้าสัมผัสของพอลิเมอร์หลอมเหลวเกิดการเชื่อมโยงที่ไม่สมบูรณ์ (2) การจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลขนานกับรอยประสานหรือตั้งฉากกับทิศทางการรับแรง (3) การเกิดรอยบากตัววีที่บริเวณรอยประสาน และ (4) การเกิดโพรงอากาศที่บริเวณรอยประสาน (ดังแสดงในภาพที่ 5) ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงทางกลของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตมีค่าลดลงประมาณ 30-50% (Kazmer, n.d.; Overton, n.d.) รวมทั้งทำให้อัตราการขยายตัวของรอยแตก (da/dN) เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า (Merah *et al.* 2004) จากการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับความแข็งแรงรอยประสานในอดีตที่ผ่านมาพบว่าการวิจัยโดยส่วนใหญ่เป็นการศึกษาความแข็งแรงของรอยประสานในวัสดุเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิต ในขณะที่งานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาความแข็งแรงของรอยประสานในวัสดุเทอร์โมเซตติงและวัสดุยางมีรายงานที่น้อยมาก (Seadan *et al.*, 2002; Davis *et al.*, 2003; Rios *et al.*, n.d.)



รูปที่ 5 สาเหตุที่ทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานลดลงที่บริเวณรอยประสาน (Guo *et al.*, 2004)

จากการสำรวจงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการบดผสมยางต่างชนิดกัน ได้มีการศึกษาในด้านความเข้ากันได้ (Compatibility) ของยางแต่ละชนิด โดยได้ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties) สมบัติทางกล (Mechanical Properties) สมบัติทางความร้อน (Thermal Properties) สัณฐานวิทยา (Morphology) และอิทธิพลของสารเติมแต่ง เป็นต้น สำหรับงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับความแข็งแรงรอยประสานของผลิตภัณฑ์ยางยังคงมีรายงานที่น้อยมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งความแข็งแรงรอยประสานของยางที่บดผสมกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การศึกษาความแข็งแรงรอยประสานของยางธรรมชาติที่บดผสมกับยางสังเคราะห์ ซึ่งได้แก่ ยาง EPDM และ ยาง NBR โดยแปรสัดส่วนการผสม และศึกษาความแข็งแรงรอยประสานระหว่างยางผสมแต่ละชนิด รวมทั้งศึกษาอิทธิพลของการบ่มเร่งด้วยความร้อน (Thermal aging) การบ่มเร่งในน้ำมัน (Oil aging) และรังสีอัลตราไวโอเลต (UV aging) ที่มีต่อความแข็งแรง

รอยประสานในผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติผสมเพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งานต่อไป

งานวิจัยและสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้อง

ความสามารถในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่ประยุกต์ใช้กับงานในลักษณะต่างๆ ได้หลากหลาย ถือเป็นข้อได้เปรียบในการแข่งขันด้านการตลาดกับอุตสาหกรรมยางจากต่างประเทศ ซึ่งเทคโนโลยีการผลิตยางผสมจากยางธรรมชาติเป็นแนวทางหนึ่งของการพัฒนาสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากยางธรรมชาติ เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นวัตถุดิบที่สามารถผลิตได้ภายในประเทศ นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังมีสมบัติเชิงกลที่ดีมากเมื่อเทียบกับยางสังเคราะห์ประเภทอื่น อย่างไรก็ตาม สมบัติด้อยของยางธรรมชาติซึ่งได้แก่ สมบัติการต้านทานต่อการเสื่อมสภาพและสมบัติการต้านทานต่อน้ำมัน (พงษ์ธร แซ่ฮุย, 2547) ยังคงเป็นข้อจำกัดสำหรับการประยุกต์ใช้งานในบางประเภท เนื่องจากยางธรรมชาติมีพันธะคู่หรือพันธะที่ไม่อิ่มตัวซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับสารเคมีระหว่างการใช้งาน การเพิ่มคุณสมบัติพิเศษให้กับยางธรรมชาติโดยกระบวนการบดผสมกับยางต่างชนิด (Rubber Blends) เป็นแนวทางที่สำคัญที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการใช้งานยางธรรมชาติในสภาวะแวดล้อมการใช้งานจริงได้นานขึ้น การบดผสมยางเข้าด้วยกันมีต้นทุนที่ต่ำกว่าการสังเคราะห์ยางชนิดใหม่ที่มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการใช้งาน (Arayaprane, 2007) ดังนั้นจึงมีรายงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาเกี่ยวกับยางผสมจากยางธรรมชาติเพื่อพัฒนาองค์ความรู้ทางด้านนี้ ยกตัวอย่างเช่น ชัชวาลย์ และคณะ (2550) ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวประสาน (Coupling Agent) ที่มีต่อสมบัติการไหล (Flow Properties) ความหนาแน่นของพันธะข้าม (Crosslink Density) และสมบัติเชิงกลของยางผสมระหว่างยาง NR กับยาง NBR โดยใช้ตัวประสาน ซึ่งได้แก่ยางคลอโรพรีน (Chloroprene Rubber, CR) และยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Epoxidized Natural Rubber, ENR) จากผลการวิจัยพบว่า การเติมตัวประสานไม่ส่งผลต่อเวลาในการไหลตัว เวลาในการคงรูป และค่าความแตกต่างแรงบิด แต่ส่งผลให้ความหนาแน่นของพันธะข้ามและสมบัติเชิงกลโดยรวมเพิ่มขึ้น นุชนาฏ และคณะ (2550) ได้ศึกษาสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่บดผสมกับยางสังเคราะห์ 4 ชนิด คือ NBR EPDM พอลิพรอพิลีน (PP) และพอลิเอททิลีน (PE) สอาด และคณะ (2549) ได้ศึกษาสมบัติกายภาพของพอลิเมอร์ผสมจากยางธรรมชาติและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ โดยศึกษาสมบัติต่างๆ ประกอบด้วย สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อน ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของแผ่นฟิล์มที่ได้จากการศึกษา เช่น อัตราส่วนของการผสม ปริมาณสารเชื่อมโยง เป็นต้น เพื่อให้ได้แผ่นฟิล์มสมบัติดีขึ้นในทุกๆ ด้านโดยการเคลือบแผ่นฟิล์ม พิมพ์สุดา (2548) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อการติดกันของยางธรรมชาติกับยางไนไตรล์ โดยได้พัฒนาสารประกอบที่ช่วยส่งเสริมการยึดติด (Adhesion Promoter Compound, APC) สำหรับใช้ทั้งในรูปของสารละลายและของแข็ง Kumnuantip (2006) ได้ศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิพรอพิลีนและยางธรรมชาติ ผลการทดลองพบว่า ยางธรรมชาติ ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของพอลิเมอร์

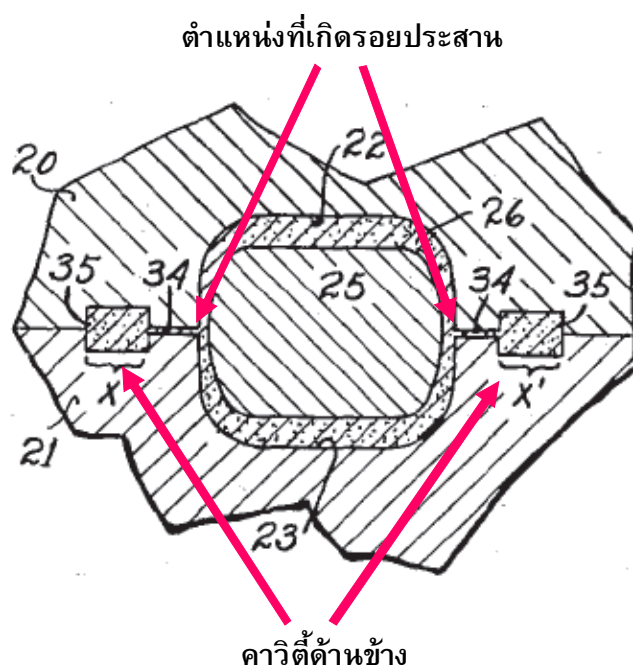
ผสม และสมบัติการต้านทานต่อแรงดึง ในขณะที่ความแข็งของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของยางธรรมชาติเพิ่มมากขึ้น และจากการศึกษาฐานวิทยาศาสตร์ของพอลิเมอร์ผสมพบว่าพอลิโพรพิลีนและยางธรรมชาติไม่สามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้

การบดผสมยางตั้งแต่ 2 ชนิดเข้าด้วยกัน มีข้อจำกัดที่ความสามารถในการเข้ากันได้และการยึดติดกันของยางต่างชนิดมีน้อยมาก (Gardiner, 1968) ซึ่งส่งผลให้เกิดการแยกชั้นเมื่อบดผสม เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Goyanes *et al.* (2002) ทำให้สมบัติของยางผสมไม่สม่ำเสมอ และมีระยะเวลาการสุกตัวที่แตกต่างกันตามชนิดของยาง ซึ่งงานวิจัยส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ของยางชนิดต่าง ๆ เข้าด้วยกัน ตัวอย่างเช่น ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งส่งผลต่อคุณสมบัติของยาง NR และ EPDM พบว่า การใช้ TBBS เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยให้การเวลาในการสุกตัวของยางผสมดีขึ้น แต่คุณสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงยังด้อยกว่าการใช้ MBTS (Sae-oui *et al.*, 2007) หรือเทคนิคการขึ้นรูปยางผสมซึ่งมีความเร็วในการสุกตัวที่ต่างกันโดยนัยที่มีอัตราการสุกตัวช้ากว่าไปเข้ากระบวนการสุกตัวในบางส่วน (Premature Curing) ส่งผลให้ยางผสมมีอัตราการสุกตัวที่ใกล้เคียงกันเมื่อบดผสม (Suma *et al.*, 1993) โดยการศึกษาความเข้ากันได้มีการใช้เทคนิคทั้งทางเคมีและอุปกรณ์ เช่น การใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscopy, AFM) ในการศึกษาความเข้ากันได้ของยาง NR และ NBR ซึ่งสามารถตรวจสอบการสุกตัวของยางผสมได้ (Thanawan *et al.*, 2008) และการใช้เทคนิค Raman spectroscopy เพื่อสร้างภาพ 3 มิติการแพร่กระจายของยาง HNBR (Hydrogenated Nitrile) ในยาง IR (Polyisoprene rubber) (Smitthipong *et al.*, 2007) หรือการใช้วัสดุเพิ่มจากเดิมเพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้โดยใช้ยางบิวตาไดอีน (Polybutadiene, BR) (El-Sabbagh *et al.*, 1998) หรือ Polyvinyl Chloride (PVC) (Saad and El-Sabbagh, 2001) ในการเพิ่มการเชื่อมโยงพันธะระหว่างโมเลกุลของยางผสม นอกจากนี้ยังมีเทคนิคการฉายรังสีซึ่งให้การเชื่อมต่อพันธะระหว่างคาร์บอนและคาร์บอนในยางผสมระหว่าง NBR และ EPDM ซึ่งให้คุณสมบัติทางกลที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูงมากกว่าการคงรูปด้วยวิธีการให้ความร้อน (Abou Zeid, 2007)

จากการศึกษาข้อมูลงานวิจัยเกี่ยวกับความแข็งแรงของรอยประสานพบว่า งานวิจัยส่วนมากได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุเทอร์โมพลาสติกและวัสดุเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิต (Kim and Suh, 1986; Merhar *et al.*, 1994; Mekhilef *et al.*, 1995; Tjader *et al.*, 1998; Kim *et al.* 2001; Liu *et al.*, 2001; Merah *et al.* 2003; Guo *et al.*, 2004; Lu *et al.*, 2004; Merah *et al.*, 2004; Nguyen-Chung, 2004; Huadsarkhor, 2006; Kaang *et al.*, 2006; Patcharaphun, 2006; Zhai *et al.*, 2006; Hashemi and Lepessova, 2007) ในขณะที่รายงานวิจัยเกี่ยวกับวัสดุยางยังคงมีน้อยมาก โดยจากงานวิจัยของ Seadan *et al.* (2002) ซึ่งได้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการผลิตและปริมาณเขม่าดำ ที่มีต่อความแข็งแรงของรอยประสานที่เกิดขึ้นในยางธรรมชาติ (NR) และยางสไตรีนบิวตาไดอีน (SBR) ที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป

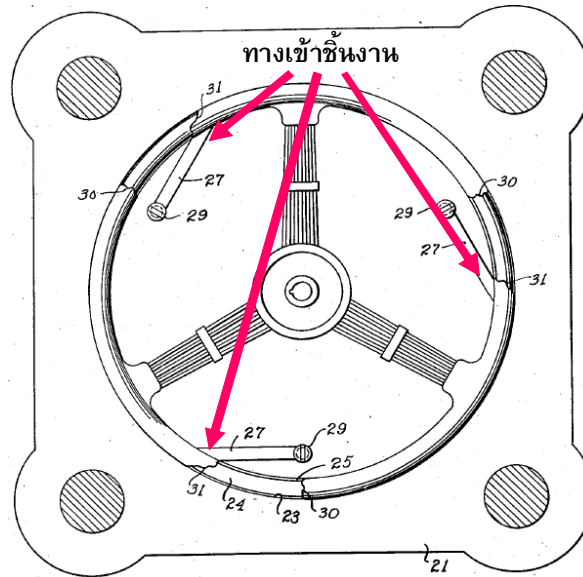
จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ความดันภายในแม่พิมพ์ ความหนืดของสารประกอบ และเวลาเริ่มคงรูป มีอิทธิพลอย่างมากส่งผลต่อความแข็งแรงรอยประสาน Chookaew *et al.* (2010a, 2010b) ได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงานยางไนไตรล์และยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป โดยพบว่า ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงรอยประสานชิ้นงานยางไนไตรล์ ในขณะที่การเพิ่มปริมาณซิลิกาส่งผลให้ความแข็งแรงรอยประสานในชิ้นงานยางไนไตรล์มีค่าความลดลงอย่างชัดเจน และนอกจากนี้พบว่าอิทธิพลของความดันและอุณหภูมิที่ใช้ในการคงรูปส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงรอยประสานในชิ้นงานยางธรรมชาติ

Anderson (1940) ได้นำเสนอวิธีการออกแบบแม่พิมพ์เพื่อกำจัดรอยประสานบนชิ้นงาน โดยการสร้างคavity เล็กๆ ดังแสดงในรูปที่ 6 ในตำแหน่งที่เกิดรอยประสาน ซึ่งในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปความดันในการฉีดจะทำให้รอยประสานเคลื่อนออกจากตำแหน่งเข้าไปในคavity ด้านข้าง แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้มีข้อเสีย คือ ต้นทุนในการทำแม่พิมพ์เพิ่มขึ้นและชิ้นงานเกิดรอยบนผิวด้านข้าง รวมทั้งสิ้นเปลืองเวลาในการตัดแต่งชิ้นงาน



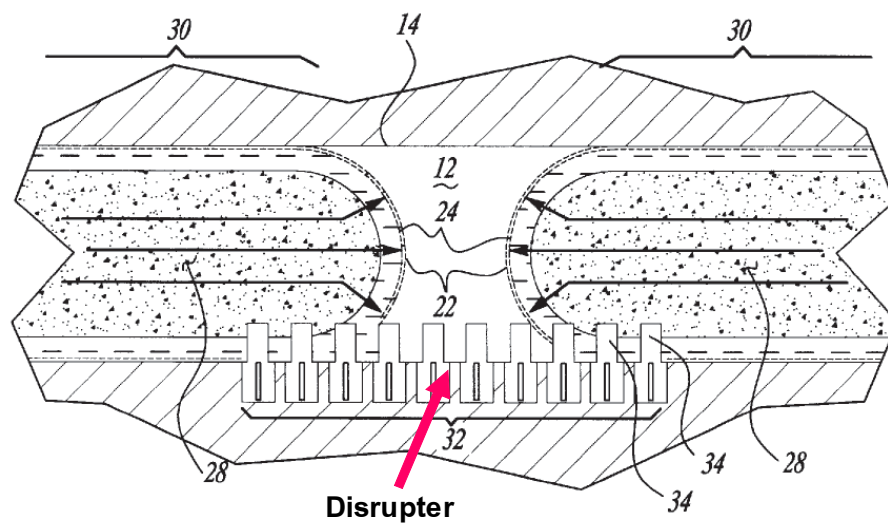
รูปที่ 6 การออกแบบแม่พิมพ์เพื่อกำจัดรอยประสาน (Anderson, 1940)

Tegarty (1940) นำเสนอเทคนิคการออกแบบแม่พิมพ์แม่พิมพ์เพิ่มความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นวงแหวน เช่น พวงมาลัยรถยนต์ ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยออกแบบให้ทางเข้า (Gate) มีลักษณะการไหลแบบสัมผัสกับวงแหวน อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ค่อนข้างมีความจำกัดทางด้านรูปร่างของชิ้นงาน ซึ่งไม่สามารถใช้กับชิ้นงานทั่วไปได้



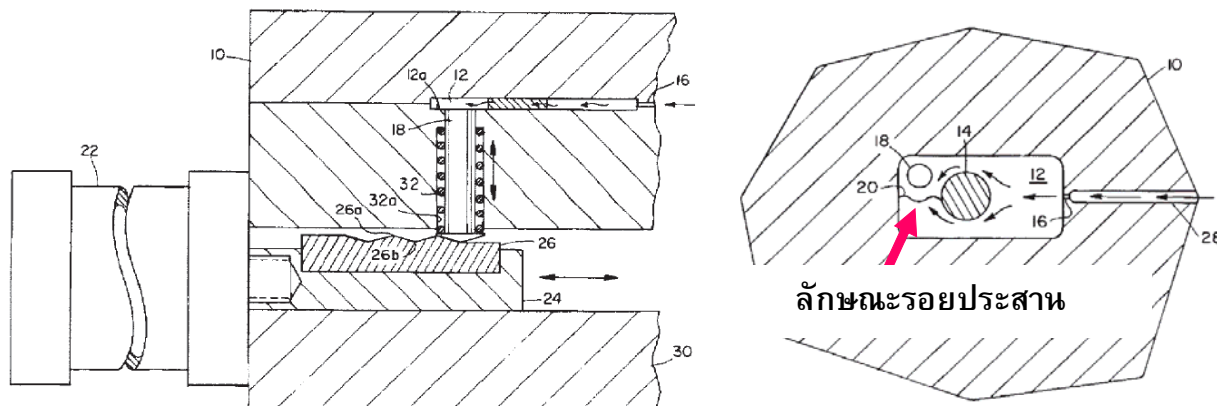
รูปที่ 7 การออกแบบแม่พิมพ์เพื่อเพิ่มความแข็งแรงรอยประสาน (Tegaty, 1940)

Ellwood et al. (1998) ได้ออกแบบแม่พิมพ์ฉีดสำหรับเทอร์โมพลาสติกหลอมเหลว โดยออกแบบให้บริเวณรอยประสานมีอุปกรณ์ทำให้พอลิเมอร์กระจายตัว (Disrupter) ก่อนการสัมผัสกัน ดังแสดงในรูปที่ 8 ทำให้เกิดการกระจายตัวได้ดีขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงรอยประสานในชิ้นงานเพิ่มขึ้น



รูปที่ 8 ตำแหน่งของ Disrupter (Ellwood et al., 1998)

Gardner and Mollay (1996) ได้ออกแบบกลไกภายในแม่พิมพ์ให้มีการรบกวนการไหลเพื่อให้เกิดการไหลวนของพอลิเมอร์หลอมเหลวในขณะที่เกิดการสัมผัสกัน ดังแสดงในรูปที่ 9 ทำให้พื้นที่การสัมผัสกันเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงรอยประสานเพิ่มขึ้น



รูปที่ 9 กลไกภายในแม่พิมพ์ที่สามารถเพิ่มความแข็งแรงรอยประสาน (Gardner and Mollay, 1996)

สิทธิบัตรที่นำเสนอเทคนิคและวิธีการออกแบบแม่พิมพ์เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของรอยประสานที่ดังที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น พบว่าส่วนใหญ่เป็นแม่พิมพ์ฉีดสำหรับวัสดุเทอร์โมพลาสติก ยังไม่ปรากฏว่ามีรายงานการวิจัยหรือสิทธิบัตรที่เกี่ยวกับเทคนิคหรือวิธีการออกแบบแม่พิมพ์อัดยางเพื่อเพิ่มความแข็งแรงหรือหลีกเลี่ยงการเกิดรอยประสานที่เกิดขึ้น

2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความแข็งแรงรอยประสานของยางธรรมชาติที่บดผสมกับ EPDM และ NBR
2. เพื่อศึกษาความแข็งแรงรอยประสานระหว่างยางผสมแต่ละชนิด
3. เพื่อศึกษาสมบัติทางกลของยางผสมที่มีรอยประสานภายหลังการบ่มแรงด้วยความร้อน รังสีอัลตราไวโอเลต และบ่มแรงในน้ำมัน

3. วิธีการ

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินโครงการ

- ยางธรรมชาติเกรด STR5L ยาง NBR เกรด 3345 และยาง EPDM เกรด 6505
- ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)
- กรดสเตียริก (Stearic Acid)
- กำมะถัน (Sulfur)
- N-tert-butyl-2-benzothiazole sulfenamide (TBBS)
- เขม่าดำ (Carbon Black)
- น้ำมันอโรมาติก (Aromatic Oil)
- สารตัวเร่ง N-cyclohexyl-2-benzothiazole sulfenamide (CBS)
- เครื่องตัดยางระบบไฮดรอลิครุ่น HD-30 ของ Daina
- เครื่องบดผสมภายในของ KNEADER MACHINERY
- เครื่องบดผสมยางแบบ 2 ลูกกลิ้ง ขนาด 8 นิ้ว x 20 นิ้ว รุ่น R11-3FF ของ Kodair seisakusho ใช้สำหรับบดยางและกำหนดความหนา
- เครื่องอัดขึ้นรูปยางรุ่น 20535 ของโรงงานชัยเจริญการช่าง
- เครื่องตัดตัวอย่างยางแบบใช้กำลังลม (Compress Air Sample Cutting) รุ่น SDAP-100N ของ FRU1106GL1 สำหรับตัดชิ้นงานทดสอบ ตามมาตรฐาน ISO 37 และ ASTM D412
- ตู้บดลมร้อนรุ่น 900626 ของ Ueshima สำหรับบ่มเร่งขึ้นงาน
- เครื่องมือทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงรุ่น 1011 ของ Instron
- เครื่องชั่งน้ำหนักของ METTER – TOLEDO รุ่น PM 30000-Kn
- เครื่องทดสอบความหนืดหมุนนี้ของยางคอมพาวด์รุ่น 123103 ของ TECHPRO- visTECH
- เครื่อง Oscillating Disk Rheometer รุ่น 121105 ของ TECHPRO-rheoTECH
- เครื่องทดสอบความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพจากรังสียูวีรุ่น LU-0819 ของ A-PANEL Lab Product

วิธีการทดลอง

ขั้นตอนการบดผสมยาง

การบดผสมยางสองชนิดให้เข้ากันได้ดี ยางแต่ละชนิดต้องมีความหนืดเริ่มต้นที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้น ก่อนการบดผสมจริงจำเป็นต้องหาความหนืดของยาง เพื่อกำหนดเวลาในการบดยางให้เหมาะสม การบดผสมยางธรรมชาติกับยาง EPDM และการบดผสมยางธรรมชาติกับยาง NBR ใช้เวลาในการบดยางให้เหมาะสมต่างกัน โดยการบดผสมยางธรรมชาติกับยาง EPDM เนื่องจากความหนืดของยาง EPDM สูงกว่ายางธรรมชาติในการบดจำเป็นต้องใส่ยาง EPDM ในเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้งก่อนยางธรรมชาติ เป็นเวลา 20 นาที แล้วใส่ยางธรรมชาติเป็นเวลา 5 นาที สำหรับการบดผสมยางธรรมชาติกับยาง NBR เนื่องจากยางธรรมชาติมีความหนืดสูงกว่า จึงใส่ยางธรรมชาติก่อนเป็นเวลา 20 นาที แล้วตามด้วยการใส่ยาง NBR เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นจะได้ยางผสมที่บดด้วยเครื่องบดแบบสองลูกกลิ้ง ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 การบดยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ให้เข้ากันด้วยเครื่องบดผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง

นำยางผสม (ดังแสดงในรูปที่ 11) ไปผสมกับสารเคมีด้วยเครื่องบดผสมภายใน (ดังแสดงในรูปที่ 12) โดยมีลำดับดังนี้ ขั้นแรก เติมสารกระตุ้น ได้แก่ กรดสเตียริกและซิงออกไซด์ลงเป็นเวลา 1 นาที แล้วเติมเขม่าดำและน้ำมันโอโรมาติกพร้อมกัน โดยแบ่งเติม 1/3 ครั้งละ 2 นาที จากนั้นนำยางผสมไปบดด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง เพื่อผสมสารตัวเร่งและสารคงรูป สำหรับการบดผสมยางธรรมชาติ กับยาง NBR ให้เติม CBS ลงไปในยางผสม เป็นเวลานาน 1 นาที และกรณีการบดผสมยางธรรมชาติ กับยาง EPDM ให้เติมสาร TBBS เป็นเวลานาน 1 นาที ในขั้นตอนสุดท้ายเติมกำมะถันเป็นเวลา 3 นาที โดยสูตรส่วนผสมยาง NR/NBR และ NR/EPDM แสดงในตารางที่ 1 และ 2 จากนั้นนำยางออกจากเครื่องบดผสมยางแบบ 2 ลูกกลิ้ง นำมาตัดเพื่อนำไปทดสอบค่าความหนืดด้วยเครื่องทดสอบความหนืดมูนี่ และหาเวลาการคงรูปด้วยเครื่องทดสอบ ODR



รูปที่ 11 ยางผสมที่บดด้วยเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง



รูปที่ 12 การบดผสมยางด้วยเครื่องบดผสมภายใน

ตารางที่ 1 สูตรส่วนผสมของยาง NR/NBR และสารเคมี

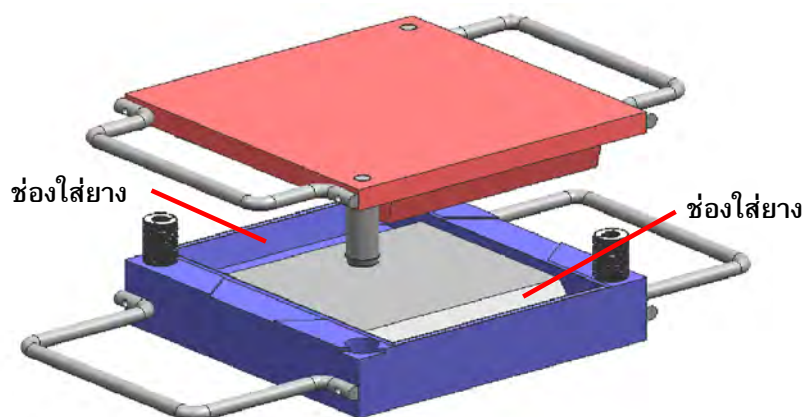
ส่วนประกอบ	ปริมาณ (phr)						
	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4	สูตร 5	สูตร 6	สูตร 7
NR	0	50	60	70	80	90	100
NBR	100	50	40	30	20	10	0
ZnO	5	5	5	5	5	5	5
Stearic acid	2	2	2	2	2	2	2
N330	60	60	60	60	60	60	60
Aromatic oil	4	4	4	4	4	4	4
CBS	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Sulfur	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4

ตารางที่ 2 สูตรส่วนผสมของยาง NR/EPDM และสารเคมี

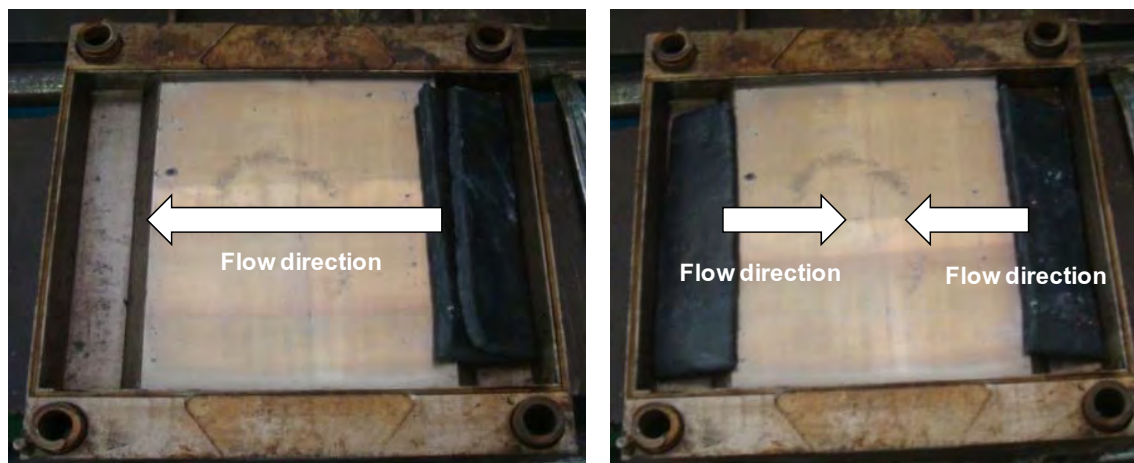
ส่วนประกอบ	ปริมาณ (phr)						
	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4	สูตร 5	สูตร 6	สูตร 7
NR	0	50	60	70	80	90	100
EPDM	100	50	40	30	20	10	0
ZnO	5	5	5	5	5	5	5
Stearic acid	2	2	2	2	2	2	2
N330	60	60	60	60	60	60	60
Aromatic oil	4	4	4	4	4	4	4
TBBS	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
Sulfur	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8

ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและจัดสร้างแม่พิมพ์อัดที่สามารถเตรียมชิ้นงานยางที่มีรอยประสานและไม่มีรอยประสาน แสดงดังรูปที่ 13 สำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน สามารถทำได้โดยการวางยางผสมในช่องใส่ยางภายในแม่พิมพ์ด้านใดด้านหนึ่งเพื่อให้ยางผสมเกิดการไหลไปยังด้านตรงข้าม ดังแสดงในรูปที่ 14 (a) ในขณะที่การเตรียมชิ้นงานที่มีรอยประสาน สามารถทำได้โดยการวางยางผสมในช่องใส่ยางทั้งสองด้านในปริมาณที่เท่ากันเพื่อให้เกิดรอยประสานบริเวณส่วนกลางของแม่พิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 14(b) และ 15 สำหรับเวลาที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปยางผสมแต่ละชนิดนั้น ขึ้นอยู่กับผลการทดสอบระยะเวลาในการคงรูปที่ 90% ซึ่งได้จากเครื่อง ODR



รูปที่ 13 แบบจำลองสามมิติของแม่พิมพ์อัดทดสอบ



(a)

(b)

รูปที่ 14 ลักษณะการวางยางคอมพาวด์สำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีและไม่มีรอยประสาน



รูปที่ 15 ชิ้นงานยางที่มีรอยประสานเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานเพื่อนำไปทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง

นำชิ้นงานที่อัดขึ้นรูปแล้วที่ได้ไปตัดด้วยเครื่องตัดแบบกำลังลม ซึ่งเป็นรูปดัมเบลตามมาตรฐานที่กำหนด คือ ISO 37 (Type1) ดังแสดงในรูปที่ 16 โดยใช้ความเร็วในการดึงเท่ากับ 500 มิลลิเมตรต่อนาที จนกระทั่งชิ้นงานขาด วัดความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดและเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at Break) ชิ้นงานยางที่ได้ทั้งหมดถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกนำไปทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงโดยไม่ผ่านการบ่มแรง และ ส่วนที่ 2 นำไปทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงภายหลังจากผ่านกระบวนการบ่มแรงด้วยความร้อน ในน้ำมัน และรังสีอัลตราไวโอเลต



รูปที่ 16 ชิ้นงานรูปตั้มเบลเพื่อทดสอบสมบัติการต้านทานต่อแรงดึง

การบ่มเร่งด้วยความร้อน (Heat Aging)

วิธีการทำให้ยางเสื่อมสภาพด้วยความร้อน โดยปกติแล้วตัวกลางที่ให้ความร้อนภายในเตาอบเป็นอากาศร้อน ซึ่งหมุนเวียนอยู่ภายในที่ความดันบรรยากาศ การให้ความร้อนต้องมีความสม่ำเสมอทั่วถึงทุกชิ้นงาน ชิ้นงานที่ทำการทดสอบถูกแขวนในแนวดิ่งโดยไม่มีการสัมผัสกัน และไม่มีการสัมผัสกับด้านข้างของเตาอบ ดังนั้น ผลที่ได้จึงสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวที่สัมผัสอากาศ เพราะการแพร่ของก๊าซออกซิเจนอย่างรวดเร็วในชิ้นงาน ส่งผลให้มีลักษณะการเสื่อมสภาพที่สม่ำเสมอ แต่ถ้าทดสอบที่อุณหภูมิสูง อัตราการเสื่อมสภาพของยางจะเร็วกว่าการแพร่ของก๊าซออกซิเจน จึงเกิดลักษณะการเสื่อมสภาพที่ไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน ขั้นตอนการบ่มเร่งด้วยความร้อน ทำได้โดยการนำชิ้นงานเข้าตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน ASTM D573 เมื่อนำชิ้นงานออกจากตู้อบแล้ว ให้ตั้งชิ้นงานทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องอย่างน้อย 30 นาที

การบ่มเร่งโดยน้ำมัน (Oil Aging)

ยางทุกชนิดมีความสามารถในการดูดซับน้ำมันต่างกัน การดูดซับน้ำมันในยางที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการคงรูปส่งผลให้ยางเกิดการละลาย แต่ในยางที่ผ่านกระบวนการคงรูปแล้วไม่ละลายในน้ำมัน เพียงแต่เกิดการเพิ่มปริมาตรของยาง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การบวมตัว (Swelling) ซึ่งการบวมตัวนี้ส่งผลให้สมบัติทางกลของยางลดลง การบวมตัวของยางมีสาเหตุมาจากการที่น้ำมันเกิดกระบวนการแพร่ (Diffusion Process) โดยในระยะเริ่มแรก บริเวณผิวหน้าของยางมีความเข้มข้นของน้ำมันสูง ในขณะที่ความเข้มข้นของน้ำมันภายในเนื้อยางเป็นศูนย์ จากนั้นโมเลกุลของน้ำมันเริ่มแพร่จากบริเวณผิวหน้าไปสู่เนื้อยาง เมื่อเวลาผ่านไปปริมาตรของยางเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งความเข้มข้นของน้ำมันเท่ากันในทุกส่วนของยาง คือการบวมตัวของยางเข้าสู่สมดุล ความสามารถในการบวมตัวในน้ำมันของยางนั้นขึ้นอยู่กับจำนวนพันธะข้ามต่อหน่วยปริมาตร คือ การมีจำนวนพันธะข้ามต่อหน่วยปริมาตรมากโดยที่ความยาวเฉลี่ยของพันธะข้ามน้อย

ส่งผลให้ระดับของการบวมตัวของยาง (Degree of Swelling) ต่ำ นอกจากจำนวนพันธะที่ส่งผลต่อการบวมตัวแล้ว ความสามารถในการบวมตัวยังขึ้นอยู่กับความเข้ากันได้ของยางกับน้ำมัน ปริมาณและชนิดของสารตัวเติมที่ใส่ลงไปนยางอีกด้วย ขั้นตอนการบ่มเร่งด้วยน้ำมันทำได้โดย นำชิ้นงานไปแช่ในน้ำมัน Tellus100 ที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน ASTM D 417-79 จากนั้นนำชิ้นงานออกมาทำความสะอาดด้วยสารอะซิโตน (Acetone) และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องอย่างน้อย 1 วัน

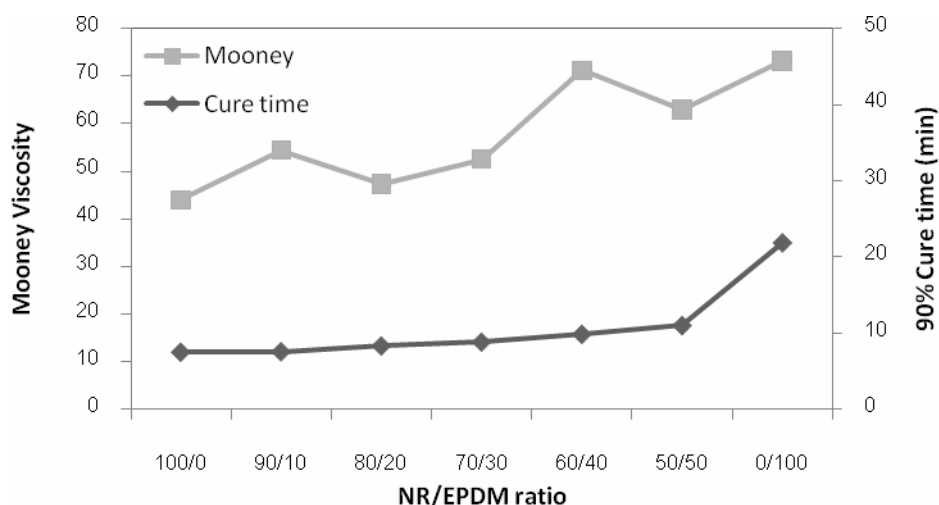
การบ่มเร่งโดยรังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet Aging)

รังสีอัลตราไวโอเลตเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพ เนื่องจากรังสีอัลตราไวโอเลตที่ตกกระทบบนพื้นผิวโลกมีคลื่นความยาวแม่เหล็กไฟฟ้ามากกว่า 280 นาโนเมตร และความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของรังสีอัลตราไวโอเลตนั้นมีพลังงานสูงซึ่งสามารถทำลายพันธะเคมีในโมเลกุลของยาง ส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพได้ ขั้นตอนการบ่มเร่งด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต ทำได้โดยการนำชิ้นงานเข้าเครื่องทดสอบ QUV accelerated weathering ตามมาตรฐาน ASTM D4329 เป็นเวลา 300 ชั่วโมง โดยเร่งสภาวะให้ความร้อนกับความชื้นสลับกัน โดยความร้อนภายในเครื่องได้จากความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของรังสีอัลตราไวโอเลต ซึ่งรังสีจะเข้าไปทำลายพันธะโมเลกุลของยางให้เกิดการเสื่อมสภาพ และความชื้นได้จากน้ำในถาดเก็บน้ำบริเวณด้านล่างของตัวเครื่อง ความร้อนจะทำให้ น้ำกลายเป็นไอจนเกิดความชื้นกลายเป็นไอน้ำ เมื่อไอน้ำกระทบเข้ากับที่ผิวชิ้นงานจะเกิดการควบแน่นกลายเป็นหยดน้ำมาเกาะที่บริเวณผิวชิ้นงาน การทดสอบด้วยวิธีนี้สามารถบอกได้ถึงความต้านทานต่อสภาวะแวดล้อมของชิ้นงานได้ในระดับหนึ่ง

4. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

อิทธิพลของปริมาณยาง EPDM และ NBR ที่มีต่อค่าความหนืดมูนนี่และเวลาในการคงรูป

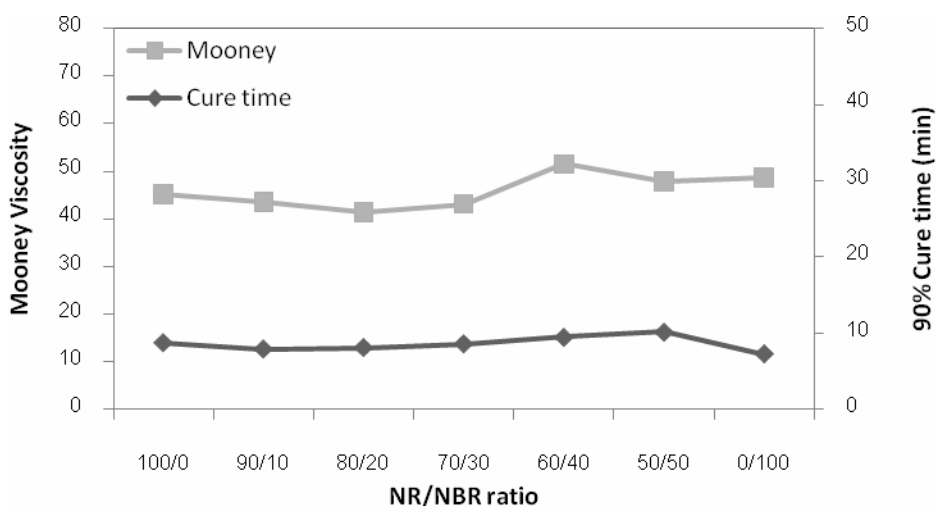
จากการศึกษาอิทธิพลของปริมาณยาง EPDM ที่ผสมกับยางธรรมชาติในปริมาณต่าง ๆ กัน ที่มีต่อความหนืดมูนนี่และเวลาในการคงรูป ดังแสดงในรูปที่ 17 แสดงให้เห็นว่า ยางผสมมีค่าความหนืดเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณยาง EPDM เนื่องจากค่าความหนืดของยาง EPDM ที่มากกว่ายางธรรมชาติ ดังนั้นเมื่อบดผสมยางทั้งสองชนิดเข้าด้วยกันส่งผลให้ค่าความหนืดของยางผสมมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณยาง EPDM และเมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของปริมาณยาง EPDM ที่มีต่อเวลาในการคงรูป พบว่า การเพิ่มปริมาณยาง EPDM ส่งผลให้ระยะเวลาการคงรูปของยางผสมนานขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณยางธรรมชาติ ที่ลดลงส่งผลให้ปริมาณพันธะคู่ในสายโซ่โมเลกุลของยางผสมน้อยลง รวมทั้งการที่ยาง EPDM มีพันธะคู่ที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาน้อย ทำให้ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาเชื่อมโยงพันธะระหว่างกำมะถันและสายโซ่โมเลกุลยางลดลง



รูปที่ 17 ความหนืดมูนนี่และเวลาคงรูปที่ 90% ของยางผสม NR/EPDM

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณยาง NBR ที่มีต่อความหนืดมูนนี่และระยะเวลาในการคงรูปที่ 90% ของยางผสม NR/NBR ดังแสดงในรูปที่ 18 พบว่า ค่าความหนืดมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากความหนืดเริ่มต้นของยาง NR และยาง NBR มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งเมื่อผ่านการบดผสมด้วยเวลาที่เท่ากัน ทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางมีความยาวที่ใกล้เคียงกัน ส่งผลให้ค่าความหนืดของยางผสมมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อปริมาณยาง NBR เพิ่มขึ้นและหากพิจารณาระยะเวลาในการคงรูปที่ 90% ของยางผสม

พบว่าระยะเวลาการคงรูปมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง ทั้งนี้เนื่องมาจากอัตราการคงรูปของยางทั้งสองชนิดใกล้เคียงกัน

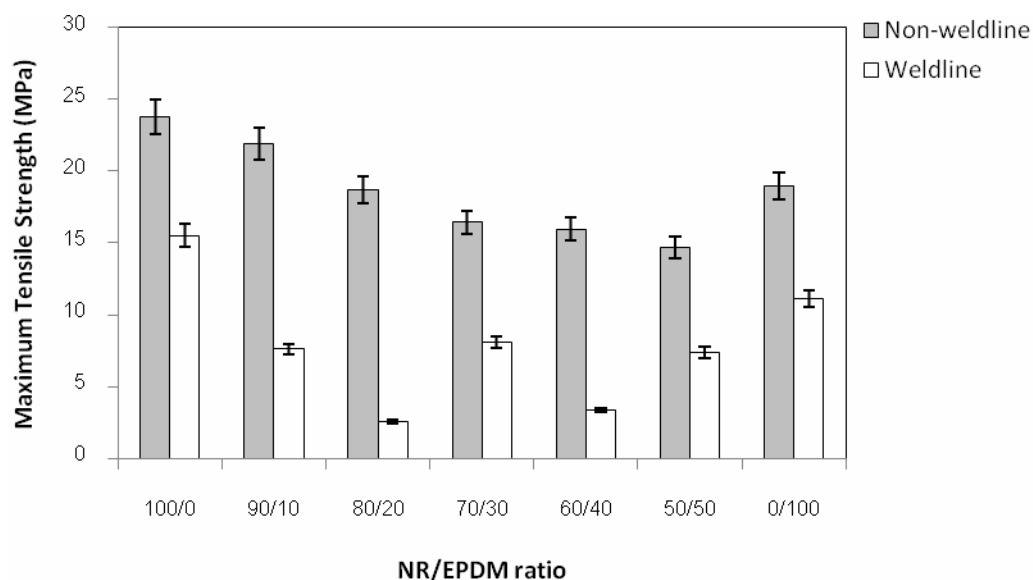


รูปที่ 18 ความหนืดมูนีนีและเวลาคงรูปที่ 90% ของยางผสม NR/NBR

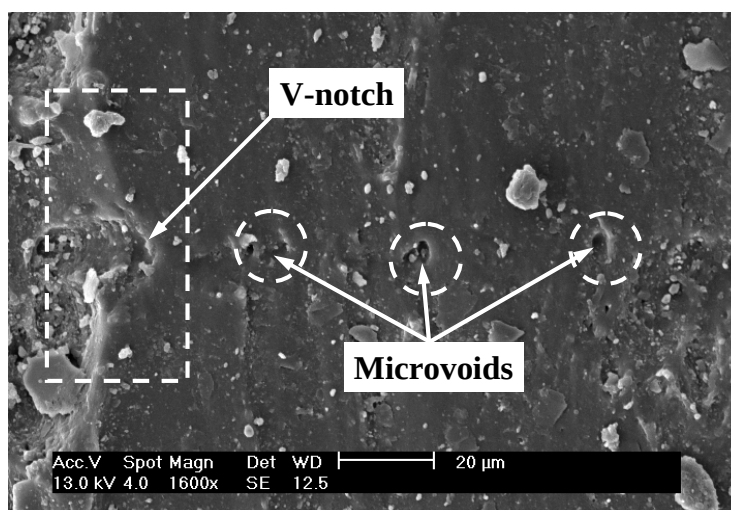
อิทธิพลของปริมาณยาง EPDM และ NBR ที่มีต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานยางผสม NR/EPDM และ NR/NBR

รูปที่ 19 แสดงค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางผสม NR/EPDM ที่มีและไม่มีรอยประสาน จากผลการทดสอบพบว่า ชิ้นงานยางธรรมชาติ (NR100) มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงมากกว่าชิ้นงานยาง EPDM (EPDM100) เนื่องจากยางธรรมชาติสามารถตกผลึกได้เมื่อได้รับแรงดึง (Strain Induced Crystallization) และเมื่อเพิ่มปริมาณยาง EPDM ในยางผสม พบว่า ค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มลดลงตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอัตราการคงรูปของยางทั้งสองชนิดแตกต่างกัน (นุชนาฏ, 2550) โดยที่ยางธรรมชาติ มีอัตราการคงรูปเร็วกว่ายาง EPDM ทำให้เกิดระดับการเชื่อมโยงภายในชิ้นงานยางผสม NR/EPDM ที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งส่งผลต่อสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานยางผสม เมื่อพิจารณาความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดชิ้นงานที่มีรอยประสาน พบว่า ค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน ทั้งนี้เนื่องมาจากการแพร่ข้ามของสายโซ่โมเลกุลที่ไม่สมบูรณ์ (Incomplete Molecular Diffusion) และมีการเกี่ยวพันของสายโซ่โมเลกุล (Molecular Entanglement) ที่ไม่ดี รวมทั้งการเกิดร่องบากตัววี (V-notch) ที่ผิวของชิ้นงานและมีอากาศตกค้าง (Air Trap) ระหว่างหน้าสัมผัส ดังแสดงในรูปที่ 20 ซึ่งเมื่อชิ้นงานได้รับแรงดึงจึงเกิดเป็นจุดรวมความเค้น (Stress Concentration) ที่บริเวณรอยประสาน ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่มีรอยประสานลดลงอย่างชัดเจน (Chookaew *et al.*, 2010a; Chookaew *et al.*, 2010b;) ทั้งนี้การที่ชิ้นงานยางธรรมชาติ มีค่าความแข็งแรงรอยประสานมากที่สุด

อาจเนื่องมาจากสมบัติการยึดติดกัน (Tack Property) ที่ดีของยางธรรมชาติ ซึ่งเมื่อยางไหลมาบรรจบกันภายในแม่พิมพ์มีแนวโน้มที่จะทำให้เกิดความแข็งแรงรอยประสานที่ดีกว่ายางผสม NR/EPDM



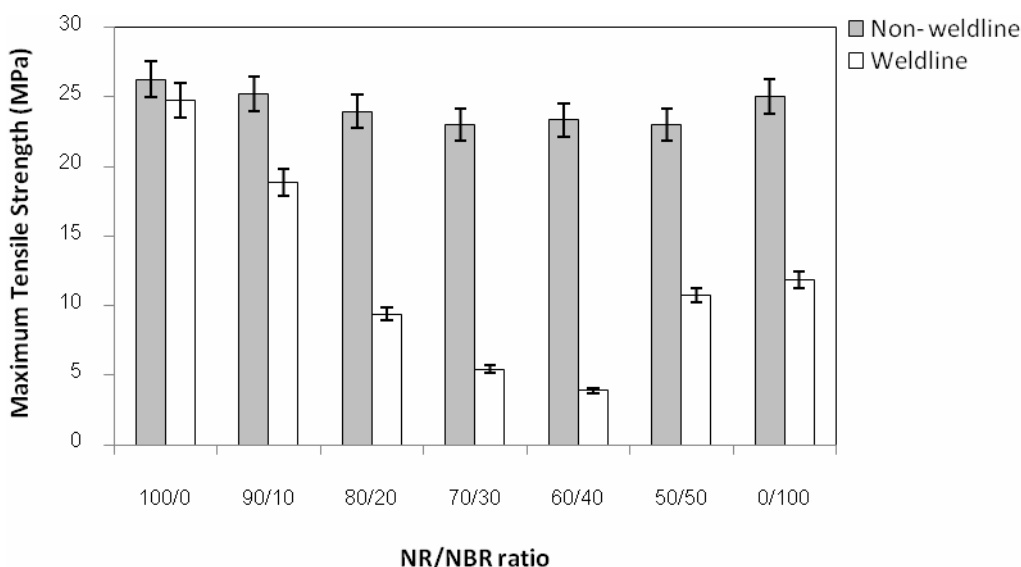
รูปที่ 19 ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางผสม NR/EPDM ที่มีและไม่มีรอยประสาน



รูปที่ 20 โครงสร้างจุลภาคที่บริเวณรอยประสาน (Chookaew *et al.*, 2010a)

เมื่อพิจารณาชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสานของชิ้นงานยางธรรมชาติที่ผสมกับยาง NBR ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 21 พบว่า ยาง NR และยาง NBR มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่ไม่แตกต่าง

กันมากนัก ซึ่งโดยทั่วไปแล้วยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อแรงดึงที่สูงกว่ายาง NBR (โสพิศ, 2551) ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากอิทธิพลของการเติมเขม่าดำในปริมาณที่สูงถึง 60 phr และหากพิจารณาอิทธิพลของการผสมยาง NBR ในยางธรรมชาติ พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงของยาง NR/NBR มีค่าลดลงไม่มากนัก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากประสิทธิภาพการเสริมแรงของเขม่าดำ ถึงแม้ว่ายางทั้งสองชนิดจะมีความเป็นขั้วแตกต่างกันก็ตาม และเมื่อพิจารณาชิ้นงานที่มีรอยประสาน พบว่า ค่าความแข็งแรงมีค่าต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสานดังเหตุผลที่ได้อธิบายไปแล้ว โดยความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางธรรมชาติมีค่าสูงสุดเนื่องจากยางธรรมชาติมีสมบัติการยึดติดกันที่ดี

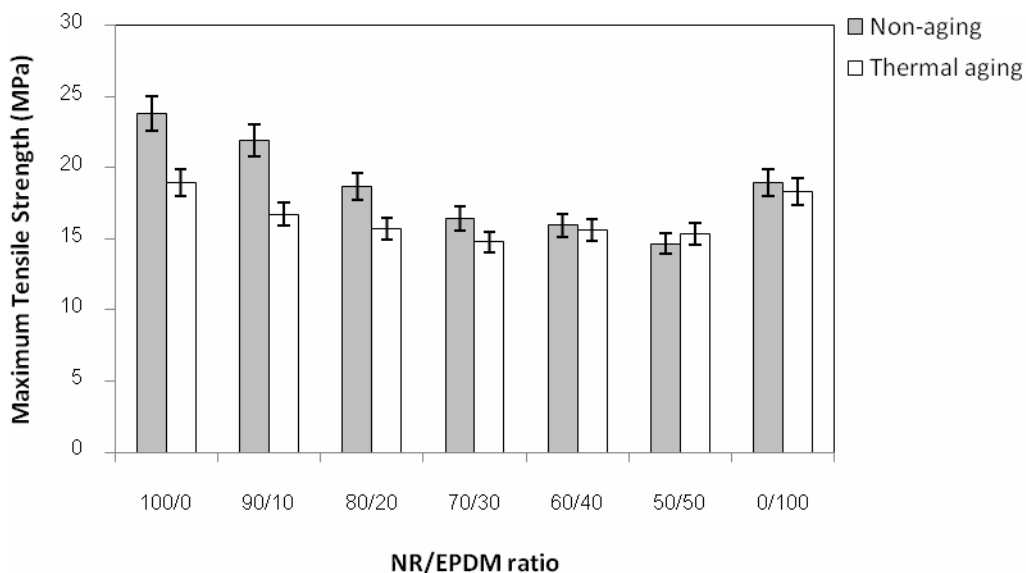


รูปที่ 21 ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางผสม NR/NBR ที่มีและไม่มีรอยประสาน

อิทธิพลของการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่มีต่อความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานยางผสม NR/EPDM

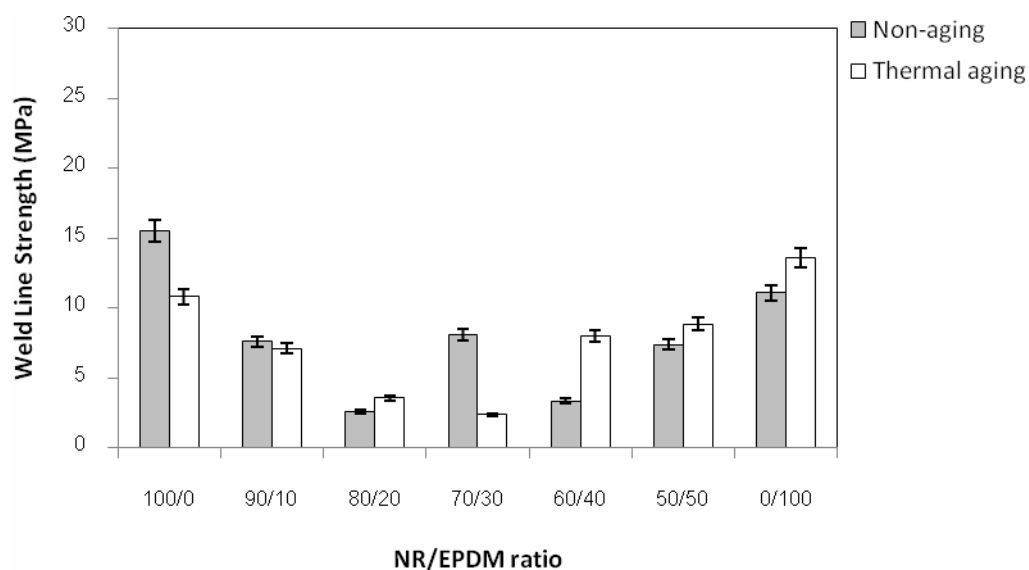
เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่มีต่อความต้านทานแรงดึงสูงสุดของยางผสม NR/EPDM ที่ไม่มีรอยประสานในรูปที่ 22 พบว่า ในชิ้นงานยาง NR100 ที่ไม่มีรอยประสาน มีค่าความต้านทานแรงดึงลดลงอย่างมาก ภายหลังจากการบ่มเร่งด้วยความร้อน ทั้งนี้เนื่องจากการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนของยางธรรมชาติ ส่งผลให้เกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุลที่บริเวณพันธะคู่ หรือการสลายตัวของพันธะกำมะถันที่บริเวณพันธะเชื่อมขวางแบบพอลิซัลไฟดิก ที่เกิดในระบบการวัลคาไนซ์แบบดั้งเดิม (Conventional Vulcanization) และหากพิจารณาชิ้นงานยาง EPDM100 พบว่ามีความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากยาง EPDM มีปริมาณพันธะคู่อยู่ในสายโซ่โมเลกุลที่น้อยมากเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ นอกจากนี้พันธะคู่ในยาง EPDM ไม่ได้อยู่ภายในสายโซ่หลัก (Polymer Backbone) แต่อยู่ที่หมู่ด้านข้าง (Side Groups) ส่งผลให้ยาง EPDM มีความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพได้ดี และนอกจากนี้ยัง

พบว่า การเพิ่มปริมาณยาง EPDM ทำให้ชิ้นงานยางผสมมีสมบัติความต้านทานต่อความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้น (โดยพิจารณาจากอัตราส่วนการลดลงของค่าความต้านทานต่อแรงดึงก่อนและหลังการบ่มแรงด้วยความร้อน) เนื่องจากยาง EPDM ที่มีความต้านทานต่อความร้อนที่ดีกว่ายางธรรมชาติ ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น นอกจากนี้การที่ยาง EPDM มีอัตราการคงรูปที่ช้ากว่ายางธรรมชาติ จึงอาจเกิดปฏิกิริยาคงรูปต่อเนื่อง ในขณะที่บ่มแรงด้วยความร้อน ส่งผลให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่สัดส่วนการผสม 50/50



รูปที่ 22 ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางผสม NR/EPDM ที่ไม่มีรอยประสานก่อนและหลังการบ่มแรงด้วยความร้อน

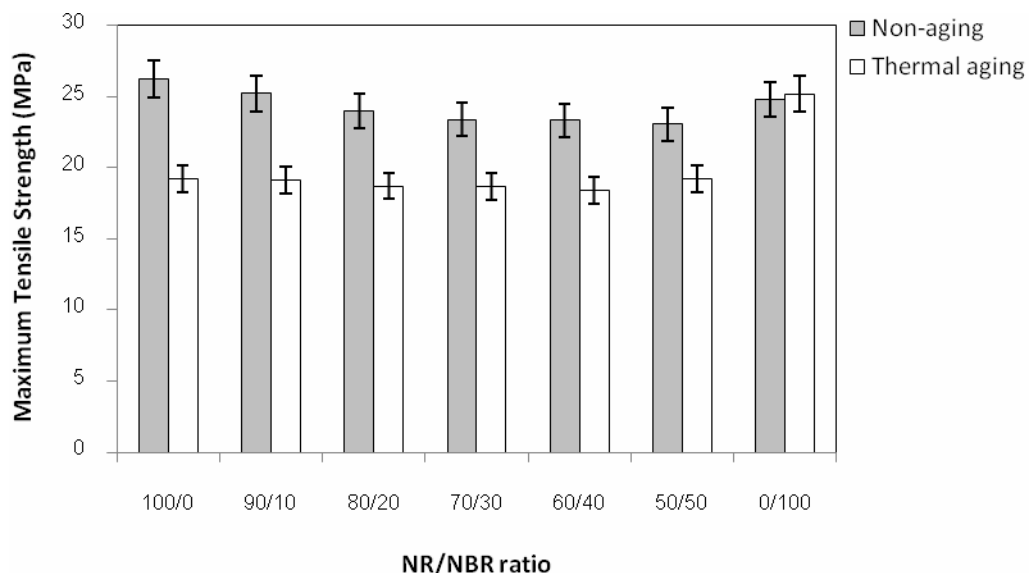
อิทธิพลของการบ่มแรงด้วยความร้อนที่มีต่อความแข็งแรงของรอยประสานในยางผสม NR/EPDM แสดงในรูปที่ 23 จากผลการทดสอบพบว่า สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงาน NR100 มีแนวโน้มลดลงภายหลังการบ่มแรงด้วยความร้อน ในขณะที่ชิ้นงาน EPDM100 มีค่าเพิ่มขึ้นภายหลังการบ่มแรงด้วยความร้อน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาคงรูปต่อเนื่องในยาง EPDM ดังที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น และหากพิจารณาถึงอิทธิพลของการเพิ่มปริมาณยาง EPDM พบว่า ชิ้นงานยางผสม NR/EPDM มีความแข็งแรงของรอยประสานที่ดีขึ้นภายหลังการบ่มแรงด้วยความร้อน (ยกเว้นในกรณีที่ยางผสม NR/EPDM 70/30) กล่าวคือการเพิ่มปริมาณยาง EPDM ได้ช่วยปรับปรุงสมบัติความต้านทานการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนของชิ้นงานที่มีรอยประสานของยางผสม NR/EPDM



รูปที่ 23 ความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางผสม NR/EPDM
ก่อนและหลังการบ่มแรงด้วยความร้อน

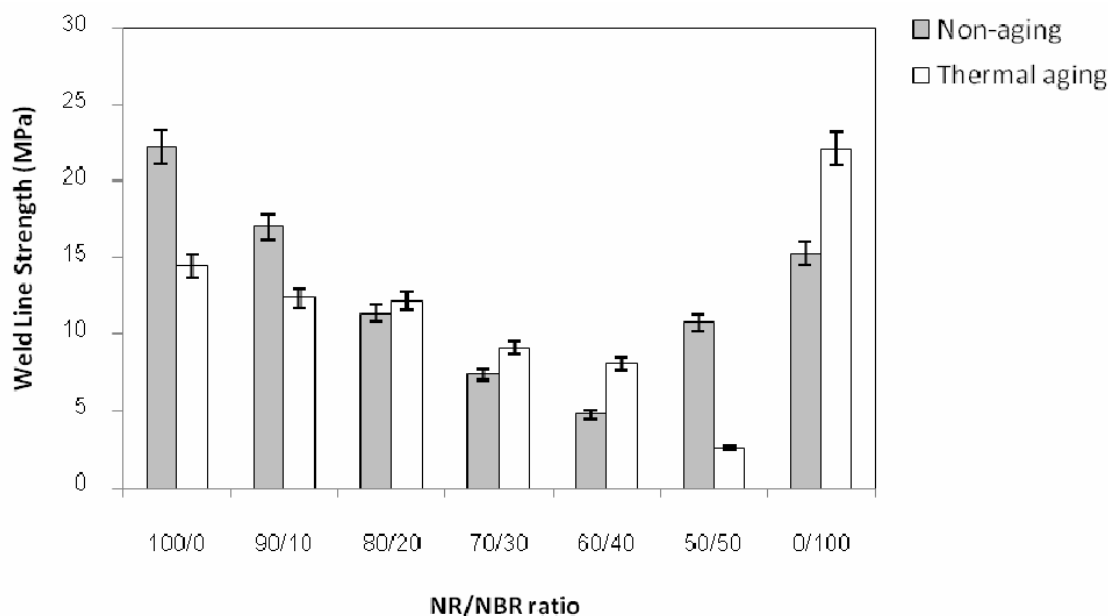
อิทธิพลของการบ่มแรงด้วยความร้อนที่มีต่อความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานยางผสม NR/NBR

เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของการบ่มแรงด้วยความร้อนที่มีต่อความต้านทานแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางผสม NR/NBR ที่ไม่มีรอยประสานดังแสดงในรูปที่ 24 พบว่า สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของยาง NR100 ลดลงอย่างชัดเจนภายหลังจากการบ่มแรงด้วยความร้อน เนื่องจากการเสื่อมสภาพของยางธรรมชาติ ในขณะที่ชิ้นงานยาง NBR มีความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากยาง NBR100 มีพันธะคู่ที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาน้อยกว่า ทำให้มีต้านทานการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนได้เป็นอย่างดี รวมทั้งอาจเกิดการเชื่อมโยงภายในโมเลกุลเดียวกัน หรือที่เรียกว่า Cyclization (พิศาล, 2549) ส่งผลให้สมบัติความต้านทานแรงดึงเพิ่มสูงขึ้นภายหลังจากการบ่มแรงด้วยความร้อน และเมื่อเปรียบเทียบความต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานยางผสมที่ปริมาณยาง NBR ในปริมาณต่างๆ กันทั้งก่อนและภายหลังการบ่มแรงด้วยความร้อน พบว่าสมบัติความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนมีแนวโน้มที่ดีขึ้น (โดยพิจารณาจาก ค่าความแตกต่างความต้านทานแรงดึงสูงสุดก่อนและหลังการบ่มแรงด้วยความร้อน) ทั้งนี้เนื่องมาจากยาง NBR ซึ่งทนต่อความร้อนได้ดีเข้าไปเสริมสมบัติชิ้นงานยางผสมให้มีความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนที่ดีขึ้น



รูปที่ 24 ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางผสม NR/NBR
ที่ไม่มีรอยประสานก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน

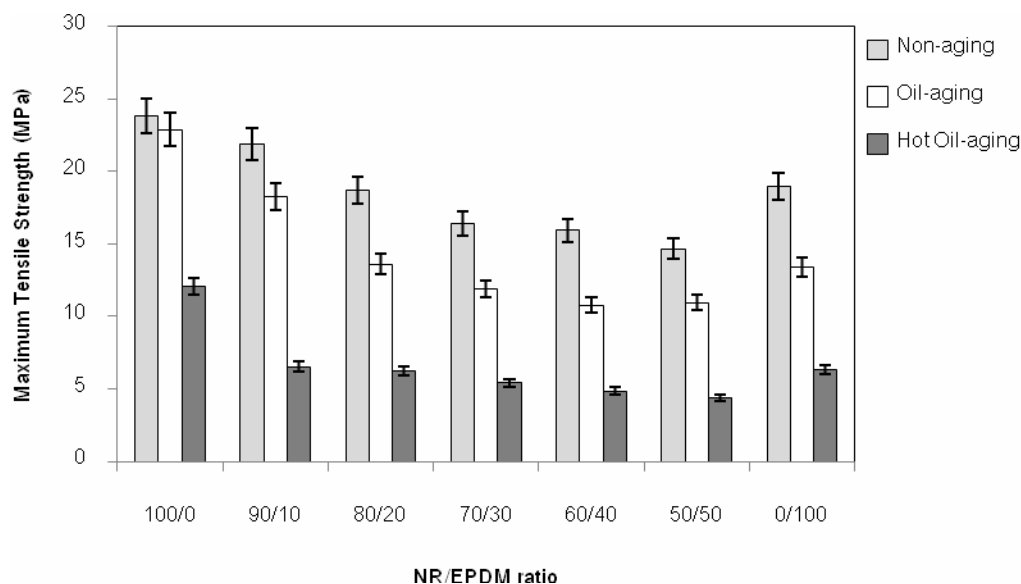
รูปที่ 25 แสดงอิทธิพลของการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่มีต่อความแข็งแรงของรอยประสานในยางผสม NR/NBR จากผลการทดลองพบว่าในชิ้นงานยางธรรมชาติ มีความต้านทานต่อแรงดึงตรงบริเวณรอยประสานภายหลังจากการบ่มเร่งด้วยความร้อนลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการเสื่อมสภาพของยางธรรมชาติดังที่ได้กล่าวไปแล้ว ในขณะที่การเพิ่มปริมาณยาง NBR ส่งผลให้ยางผสม NR/NBR มีความแข็งแรงของรอยประสานที่ดีขึ้น (ยกเว้นที่สัดส่วนการผสม 50/50) กล่าวคือ สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของยางผสมเพิ่มขึ้นภายหลังจากการบ่มเร่งด้วยความร้อน ซึ่งมีสาเหตุมาจากความต้านทานการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนของยาง NBR และเกิดการเชื่อมโยงต่อเนื่องในสถานะที่ใช้ในการบ่มเร่งด้วยความร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งชิ้นงานยาง NBR100



รูปที่ 25 ความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางผสม NR/NBR
ก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน

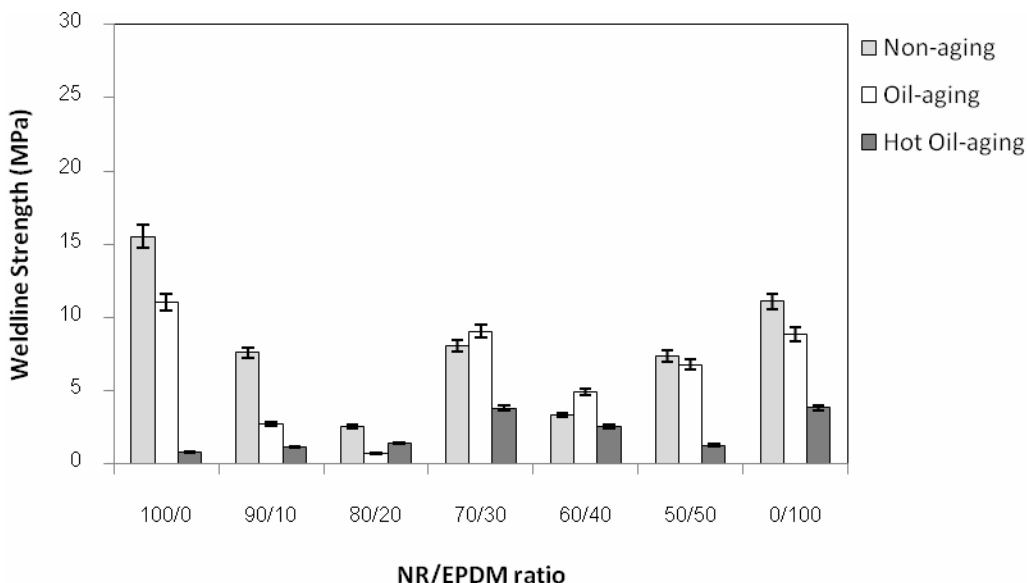
อิทธิพลของการบ่มเร่งด้วยน้ำมันที่มีต่อความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานยางผสม NR/EPDM

เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของการบ่มเร่งด้วยน้ำมันที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 70 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 26 พบว่า ค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดลงในทุกกรณีหลังจากการบ่มเร่งด้วยน้ำมัน ทั้งนี้เนื่องจากความไม่มีขั้วของยางธรรมชาติ และยาง EPDM ทำให้น้ำมันสามารถแทรกซึมเข้าไประหว่างโมเลกุลได้ง่าย และพบว่าความแข็งแรงลดลงตามปริมาณ EPDM ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมของยางธรรมชาติ และยาง EPDM มีอัตราในการการเชื่อมที่แตกต่างกัน ทำให้ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงลดลง น้ำมันสามารถแทรกตัวเข้าไปในเนื้อยางได้มากขึ้นตามปริมาณยาง EPDM ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้หากพิจารณาอิทธิพลของการบ่มเร่งด้วยน้ำมันร้อน (อุณหภูมิ 70 °C) เป็นเวลา 70 ชั่วโมง พบว่า ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานยางผสม NR/EPDM ที่ไม่มีรอยประสานมีค่าลดลงอย่างมาก ทั้งนี้อาจเนื่องจากความร้อนเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมผ่านของน้ำมันเข้าสู่โซ่โมเลกุลของยางได้ง่ายขึ้น ปัจจัยดังกล่าวทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานลดลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการบ่มเร่งด้วยน้ำมันร้อนและชิ้นงานที่ผ่านการบ่มเร่งด้วยน้ำมันที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 26 ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางผสม NR/EPDM
ที่ไม่มีรอยประสานก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยน้ำมัน

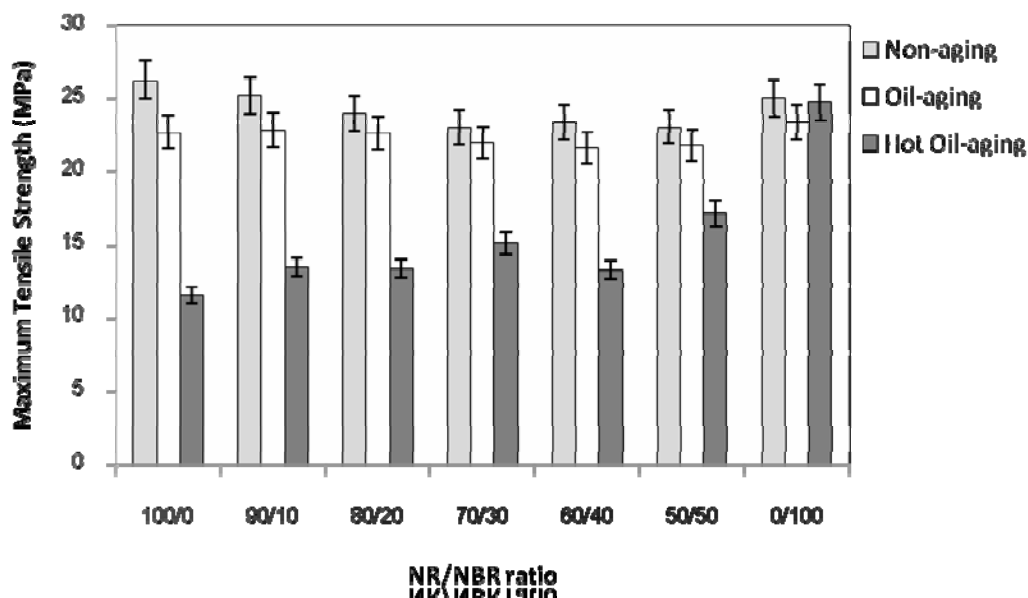
ผลการทดสอบความแข็งแรงรอยประสานยางผสม NR/EPDM ภายหลังจากการบ่มเร่งด้วยน้ำมัน ที่อุณหภูมิห้อง ดังแสดงในรูปที่ 27 จากผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มปริมาณยาง EPDM ส่งผลให้ความแข็งแรงรอยประสานมีแนวโน้มลดลง เช่นเดียวกับชิ้นงานที่มีรอยประสาน (ยกเว้นที่สัดส่วนการผสม 70/30) และเมื่อพิจารณาการทดสอบความแข็งแรงรอยประสานภายหลังจากการบ่มเร่งด้วยน้ำมันร้อน พบว่า ทุกสัดส่วนการผสมความแข็งแรงรอยประสานลดลงอย่างมากหลังผ่านการบ่มเร่งด้วยน้ำมันร้อน ซึ่งเป็นเหตุผลเดียวกับที่ได้อธิบายในชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน แต่ผลที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานที่มีรอยประสานรุนแรงกว่า ที่บริเวณรอยประสานมีรอยตำหนิจากการเชื่อมโยงที่ไม่สมบูรณ์และมีอากาศตกค้าง ส่งผลให้น้ำมันสามารถแทรกตัวเข้าไปยังตำแหน่งดังกล่าวได้มากขึ้น สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงจึงลดลงอย่างชัดเจนภายหลังบ่มเร่งด้วยน้ำมันร้อน



รูปที่ 27 ความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางผสม NR/EPDM
ก่อนและหลังการบ่มแรงด้วยน้ำมัน

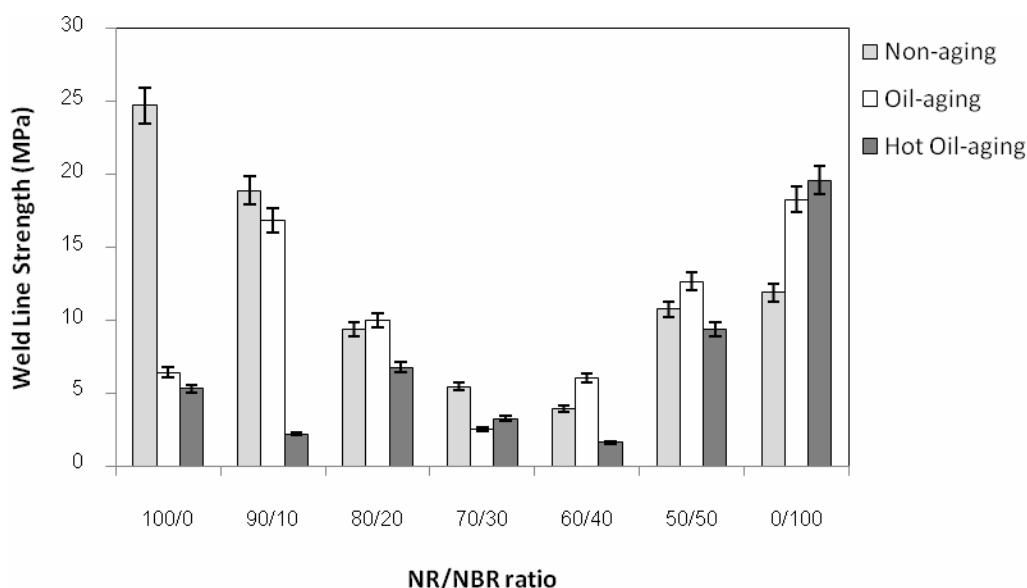
อิทธิพลของการบ่มแรงด้วยน้ำมันที่มีต่อความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานยางผสม NR/NBR

เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของการบ่มแรงด้วยน้ำมันที่อุณหภูมิห้องที่มีต่อความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางผสม NR/NBR ในชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน ดังแสดงในรูปที่ 28 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ชิ้นงาน NR100 มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดลงหลังจากการบ่มแรงด้วยน้ำมันที่อุณหภูมิห้อง ทั้งนี้เนื่องจากยางธรรมชาติ มีความต้านทานต่อน้ำมันได้ไม่ดี ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ในขณะที่ชิ้นงานยาง NBR100 มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดลงเล็กน้อย เนื่องจากยาง NBR มีความเป็นขั้วค่อนข้างสูงจึงทนต่อน้ำมันที่ไม่มีขั้วต่างๆ ได้ดี และเมื่อพิจารณาการเพิ่มปริมาณยาง NBR ที่ผสมในยางธรรมชาติ พบว่า การเพิ่มปริมาณยาง NBR ส่งผลให้ยางผสมมีสมบัติความต้านทานต่อน้ำมันดีขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากค่าความต้านทานต่อแรงดึงภายหลังจากการบ่มแรงที่ลดลงเพียงเล็กน้อย และเมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของการบ่มแรงด้วยน้ำมันที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง พบว่า ความต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงาน NR100 ที่ไม่มีรอยประสานมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่ลดลงเป็นอย่างมาก เนื่องจากสมบัติของยางธรรมชาติ ที่ไม่ทนต่อน้ำมันและความร้อน ในขณะที่ชิ้นงานยาง NBR100 มีความแข็งแรงไม่แตกต่างกันทั้งก่อนและหลังการบ่มแรงด้วยน้ำมันร้อน เนื่องจากสมบัติของยาง NBR ที่มีความทนทานต่อน้ำมันและทนต่อความร้อนได้สูงถึง 125 °C (ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณอะโครโลไนไตรล์ที่ผสมอยู่ในยาง NBR) ส่งผลให้ชิ้นงานยางผสมสมบัติการทนต่อน้ำมันและความร้อนที่ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานยางผสมที่มีปริมาณยาง NBR เพิ่มขึ้น ซึ่งพบว่า ความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน



รูปที่ 28 ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางผสม NR/NBR
ที่ไม่มีรอยประสานก่อนและหลังการบ่มแรงด้วยน้ำมัน

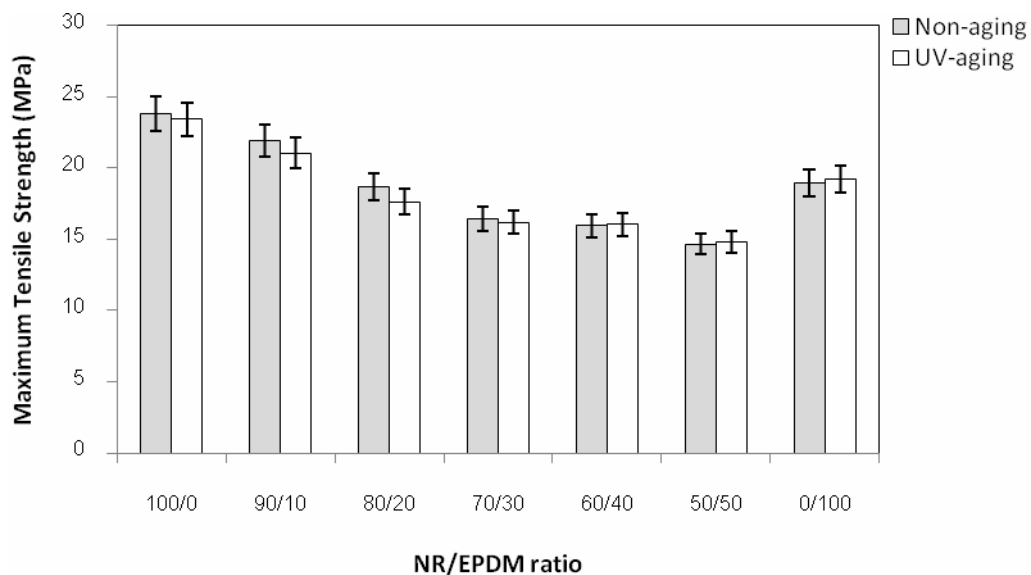
รูปที่ 29 แสดงผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานยางผสม NR/NBR ที่มีรอยประสานเมื่อผ่านการบ่มแรงด้วยน้ำมันที่อุณหภูมิห้อง พบว่า ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของยางธรรมชาติ ภายหลังการบ่มแรงด้วยน้ำมันที่อุณหภูมิห้องลดลงอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากยางธรรมชาติ ไม่มีความต้านทานต่อน้ำมันซึ่งมีสาเหตุจากความไม่มีขั้วของยางธรรมชาติ ในขณะที่ชิ้นงานยาง NBR100 สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มสูงขึ้นหลังจากบ่มแรงด้วยน้ำมันที่อุณหภูมิห้อง ทั้งนี้เนื่องจากความมีขั้วที่ค่อนข้างสูงสามารถทนต่อน้ำมันที่ไม่มีขั้วได้ดี ดังนั้นการเพิ่มปริมาณยาง NBR จึงช่วยปรับปรุงสมบัติความต้านทานการเสื่อมสภาพเนื่องจากน้ำมัน เมื่อพิจารณาอิทธิพลของการบ่มแรงด้วยน้ำมันร้อนที่มีต่อความแข็งแรงของรอยประสานในชิ้นงานยางผสม NR/NBR ภายหลังจากการบ่มแรงด้วยน้ำมันร้อน พบว่า ความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงาน NR100 และชิ้นงานยางผสมที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 90% มีค่าลดลงอย่างมาก เนื่องจากสมบัติด้อยของยางธรรมชาติที่ไม่ทนต่อความร้อนและน้ำมัน และเมื่อพิจารณาชิ้นงานยางผสมที่มีปริมาณยาง NBR เพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นว่า ความแข็งแรงรอยประสานลดลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากยาง NBR ได้ช่วยปรับปรุงสมบัติสมบัติการทนต่อความชื้นและความร้อน สำหรับชิ้นงานยาง NBR100 พบว่า ความแข็งแรงรอยประสานเพิ่มขึ้นหลังผ่านการบ่มแรงด้วยน้ำมันร้อน ทั้งนี้เนื่องจากความมีขั้วของยาง NBR ส่งผลให้มีความต้านทานต่อน้ำมันที่ไม่มีขั้วต่างๆได้ดี รวมทั้งยาง NBR มีความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนได้ดี โดยสถานะที่บ่มแรงด้วยน้ำมันร้อนในชิ้นงานยาง NBR เกิดการเชื่อมโยงกันใหม่มากกว่าการขาดของสายโซ่โมเลกุลและพันธะกำมะถัน



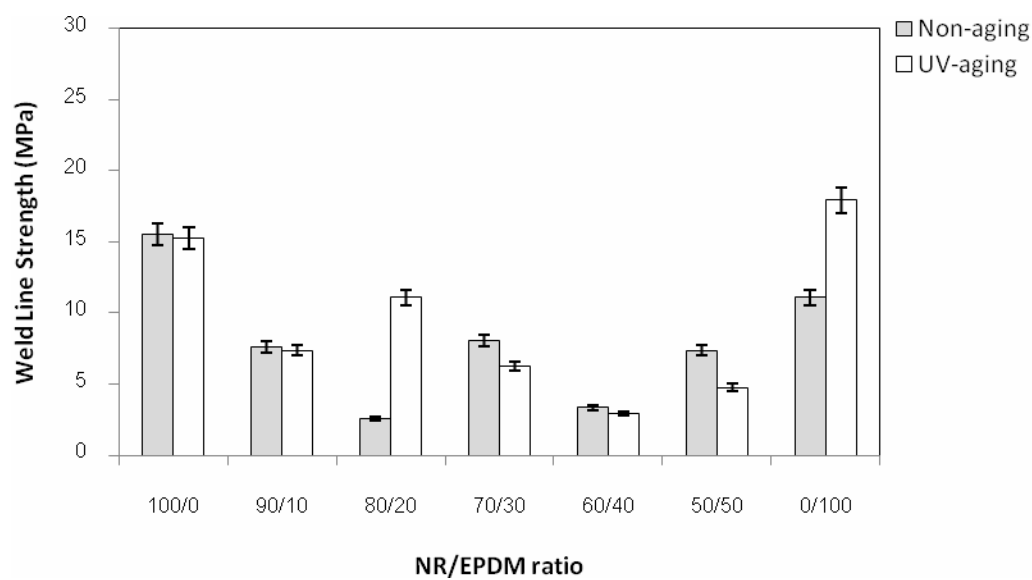
รูปที่ 29 ความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางผสม NR/NBR
ก่อนและหลังการบ่มแรงด้วยน้ำมัน

อิทธิพลของการบ่มแรงด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีต่อความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานยางผสม NR/EPDM

รูปที่ 30 และ 31 แสดงผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงภายหลังจากการบ่มแรงด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตของชิ้นงานยางผสม NR/EPDM ที่ไม่มีรอยประสานและมีรอยประสานตามลำดับ จากผลการทดสอบ พบว่าความต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงาน NR100 ภายหลังจากการบ่มแรงด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ในกรณีที่ไม่มีเติมเซมาดำ ยางธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดลงอย่างมากภายหลังจากการบ่มแรงด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต (ปิยะภรณ์, 2551) อย่างไรก็ตามผลการทดสอบที่ได้จากงานวิจัยนี้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงภายหลังจากการบ่มแรงด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเติมเซมาดำในปริมาณที่มากถึง 60 phr ซึ่งเซมาดำมีสมบัติเป็นสารต้านทานการเสื่อมสภาพเนื่องจากรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV Stabilizers) และหากพิจารณาการเพิ่มปริมาณยาง EPDM พบว่าได้ช่วยปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงหลังจากการบ่มแรงด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตเนื่องมาจากยาง EPDM มีความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพที่ดี เพราะยาง EPDM มีพันธะคู่ที่วงไวนในการเกิดปฏิกิริยาน้อย รวมทั้งพันธะคู่ไม่ได้อยู่ภายในสายโซ่หลักแต่อยู่ที่หมู่ด้านข้าง ส่งผลให้ยาง EPDM มีความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพได้ดี



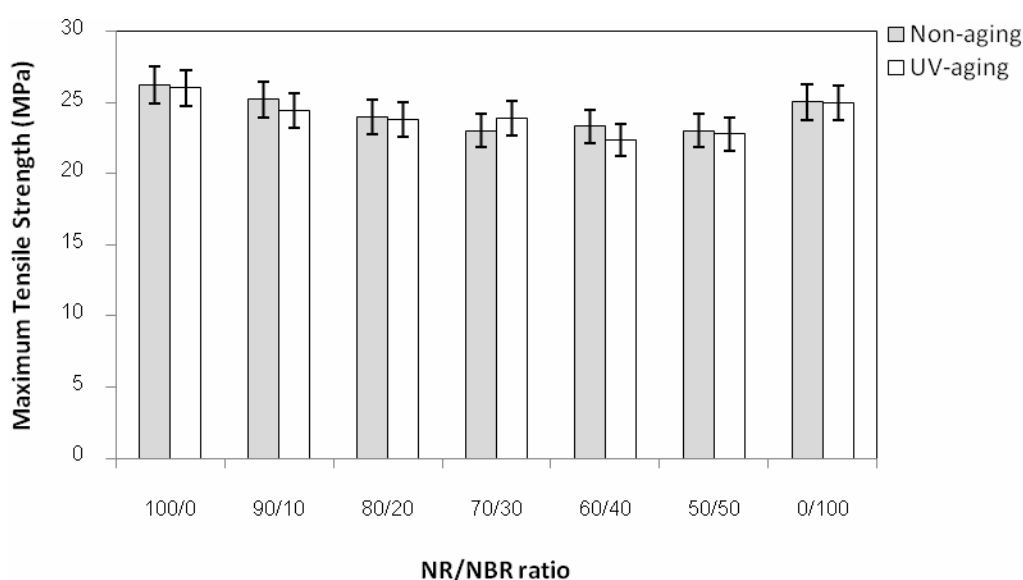
รูปที่ 30 ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางผสม NR/EPDM
ที่ไม่มีรอยประสานก่อนและหลังการบ่มแรงด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต



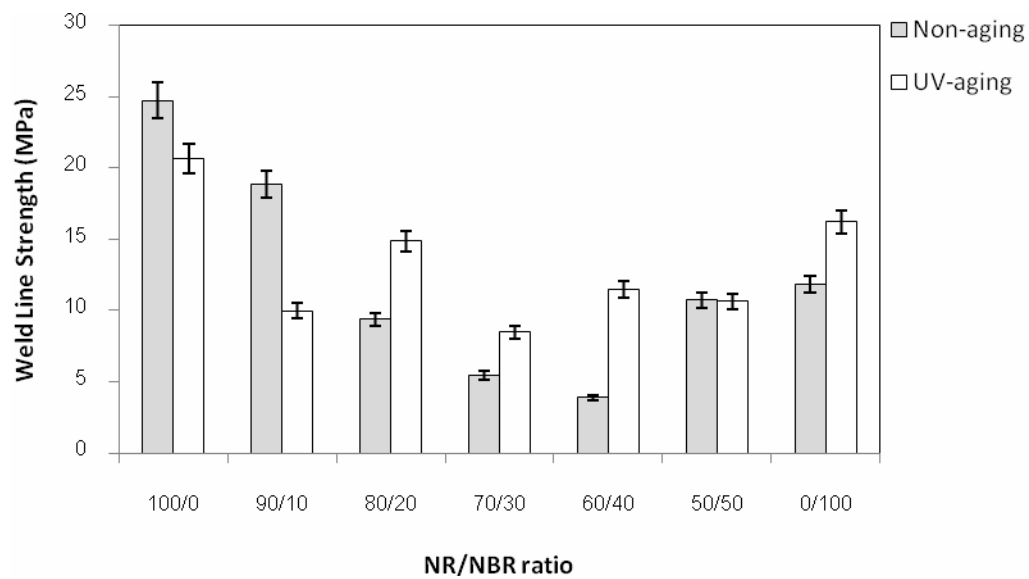
รูปที่ 31 ความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางผสม NR/EPDM
ก่อนและหลังการบ่มแรงด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต

อิทธิพลของการบ่มแรงด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตที่มีต่อความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานยางผสม NR/NBR

รูปที่ 32 แสดงอิทธิพลของการบ่มแรงด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตต่อความแข็งแรงของชิ้นงานยางผสม NR/NBR ที่ไม่มีรอยประสาน จากผลการทดลอง พบว่า ความต้านทานต่อแรงดึงของยาง NR ภายหลังการบ่มแรงด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนักทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอิทธิพลของการเติมเขม่าดำเช่นเดียวกับชิ้นงานยางผสม NR/EPDM นอกจากนี้จากผลการทดสอบความแข็งแรงรอยประสานในชิ้นงานยางผสม NR/NBR ดังแสดงในรูปที่ 33 พบว่า ชิ้นงานที่มีสัดส่วนการผสม 100/0 และ 90/10 ความแข็งแรงรอยประสานมีแนวโน้มลดลงเมื่อการผ่านการบ่มแรงด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต ในขณะที่การเพิ่มปริมาณยาง NBR ในชิ้นงานยางผสม พบว่า ความแข็งแรงรอยประสานมีแนวโน้มที่ดีขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากสมบัติการทนต่อความร้อนที่ดีของยาง NBR ซึ่งภายใต้สภาวะที่บ่มแรงด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต และอุณหภูมิสูงส่งผลให้มีปริมาณการเชื่อมโยงหลังกระบวนการคงรูปมากกว่าการขาดของสายโซ่โมเลกุลและพันธะกำมะถัน



รูปที่ 32 ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางผสม NR/NBR ที่ไม่มีรอยประสานก่อนและหลังการบ่มแรงด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต



รูปที่ 33 ความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางผสม NR/NBR
ก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต

5. สรุปผล

สรุปผลการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางธรรมชาติผสมที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป โดยยางสังเคราะห์ที่นำมาผสม ได้แก่ ยางเอพริลีนโพรพิลีนไดอีนมอนอเมอร์ (EPDM) และยางไนไตรล์ (NBR) นอกจากนี้ยังได้ศึกษาอิทธิพลของการบ่มเร่งด้วยความร้อน น้ำมัน และรังสีอัลตราไวโอเลต ที่มีต่อความแข็งแรงของประสานในยางธรรมชาติผสม จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

- ความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานยางธรรมชาติที่ผสมยาง EPDM และยาง NBR มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณยาง EPDM และยาง NBR จากผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานที่มีรอยประสาน พบว่า มีค่าต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดร่องบากตัววีที่ผิวชิ้นงาน และมีอากาศตกค้างระหว่างหน้าสัมผัส
- ความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานยางธรรมชาติผสมยาง EPDM และยาง NBR ที่ไม่มีและมียอยประสาน พบว่า มีแนวโน้มที่ดีขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณยาง EPDM และ NBR ภายหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน เนื่องมาจากสมบัติความทนทานต่อความร้อนของยาง EPDM และยาง NBR
- เมื่อนำชิ้นงานยางผสมไปผ่านการบ่มเร่งด้วยน้ำมันที่อุณหภูมิห้อง พบว่า ค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานยางธรรมชาติผสมยาง EPDM ที่ไม่มีและมียอยประสาน มีค่าลดลง ในขณะที่ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานยางธรรมชาติผสมยาง NBR มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น และเมื่ออุณหภูมิของน้ำมันสูงขึ้น ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของยางธรรมชาติผสมยาง EPDM มีแนวโน้มลดลง ในขณะที่จากชิ้นงานยางธรรมชาติผสมยาง NBR มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น
- จากผลการทดสอบที่ได้จากการบ่มเร่งด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต แสดงให้เห็นว่า รังสีอัลตราไวโอเลต ไม่มีผลต่อความแข็งแรงของยางผสม ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากอิทธิพลของเขม่าดำที่ผสมลงในยาง ซึ่งเป็นสารช่วยต้านทานการเสื่อมสภาพเนื่องจากรังสีอัลตราไวโอเลตที่ดี

6. ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ควรทำการทดสอบสมบัติด้านอื่นๆ ของยางผสม NR/EPDM และยาง NR/NBR เพิ่ม เช่น ความต้านทานการอัดตัว (Compression Set) ความต้านทานต่อการขัดสี (Abrasion) เป็นต้น เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการประยุกต์ใช้งานยางธรรมชาติผสมต่อไป

เอกสารอ้างอิง

ปิยะภรณ์ โชตะนา. 2551. อิทธิพลของปริมาณพลาสติกไฮด์ฟิวซีที่มีต่อสมบัติของยางธรรมชาติ.

ปริญญา นิพนธ์ปริญญาตรี, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ชัชวาลย์ กันทะลา เอกชัย วิมลมาลา ชาศริต สิริสิงห์ และณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ. 2549.

อิทธิพลของสารช่วยประสานต่อสมบัติการไหล ความหนาแน่นของพันธะข้าม

และสมบัติเชิงกลของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอ็นบีอาร์, น. 1-9. ใน

การประชุมวิชาการด้านพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ.

นุชนาฏ ฤ ระนอง พรรษา อุดุลยธรรม ณพรัตน์ วิชิตชลชัย และวรรณจันทร์ ไชรวิน. 2550.

เทคโนโลยีการผลิตยางผสมจากยางธรรมชาติ. รายงานผลการวิจัยเรื่องเต็ม ประจำปี 2550. สถาบันวิจัยยาง.

กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ.

พงษ์ธร แซ่ฮุย. 2547. ยาง: ชนิด สมบัติและการใช้งาน. พิมพ์ครั้งที่ 2. เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC), ปทุมธานี.

พิมพ์สุตา เหมทานนท์. 2548. การปรับปรุงสมบัติการยึดติดระหว่างยางธรรมชาติกับยางไนไตรล์โดยใช้สารเพิ่มการยึดติดที่มียางเอทิลีนคลอไรด์ฟอเนตและยางธรรมชาติคลอรีเนตเป็นส่วนประกอบ.

วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยมหิดล.

พิศาล อภัยสม. 2549. การศึกษาการเกิดผลึกในยางธรรมชาติโดยการดึง. ปริญญา นิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สอาด ธิยะจันทร์ สุวิทย์ ไชยพลบาล และดาร์รัตน์ ก่อธรรมนิเวศน์. 2550. การศึกษาสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิไวนิลแอกอฮอล์. ใน การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 33. สมาคมวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. นครศรีธรรมราช, ประเทศไทย.

โสพิศ ช่วยพันธ์. 2551. อิทธิพลของพลาสติกไฮด์ฟิวซีที่มีผลต่อสมบัติของยางธรรมชาติและยางไนไตรล์.

วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Anderson, D.M. 1940. Method and Means for Eliminating the Weld Line during Thermoplastic Molding. U.S. Patents 2,191,703.

Arayaprane, W. and G. L. Rempel. 2007. Properties of NR/EPDM Blends With or Without Methyl Methacrylate-Butadiene-Styrene (MBS) as a Compatibilizer. **Journal of Materials and Structural Reliability**. 5: 1-12.

Chookaew, W., T. Tungkeunkunt, J. Mingbunjerdusuk, N. Na-Ranong, and S. Patcharaphun. 2010a. Weld Line Strength of Acrylonitrile Butadiene Rubber Processed by Compression Molding Technique, pp 219-224.

In International Conference on Materials Processing Technology. King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT), Thailand, Department of Precision Mechanics, Tokai University, Japan. Thailand.

- Chookaew, W., T. Tungkeunkunt, N. Na-Ranong, and S. Patcharaphun. 2010b. Effect of Processing Parameters on the Weld line Strength of Compression Molded Natural Rubber, pp. 56-58. *In International Seminar on Rubber 12th*. National Metal and Materials Technology Center (MTEC), Polymer Society of Thailand, The Society of Rubber Industry, Japan. Thailand.
- Davis, B.A., P.J. Gramann, T.A. Osswald and A.C. Rios. 2003. **Compression Moulding**. Carl Hanser Verlag, Munich.
- Ellwood, K.R.J. and D.F. Mielewski. 1998. **Injection Molding Method Forming Strengthened Weld Line**. U.S. Patents 5,833,913.
- El-Sabbagh, S., S.M. Mokhtar, and S.L. Abd El-Messieh. 1998. **Journal of Applied Polymer Science**. 70: 2053–2059.
- Gardiner, J.B., 1968. Curative Diffusion Between Dissimilar Elastomers and Its Influence on Adhesion, **Rubber Chem. Technology**. 41: 1312–1328.
- Gardner, G. and R. Molloy. 1996. **Apparatus for Strengthening Weld Lines in Molded Parts**. U.S. Patents 5,538,413.
- Goyanes, SN., J.D. Marconi, P.G. Konig, CL. Rubiolo, Matteo, and A.J. Marzocca. 2002. Analysis of Thermal Diffusivity in Alumi-num (particle) Filled PMMA Compounds. **Polymer**. 42: 5267–5274.
- Guo, S., A. Ait-Kadib, and M. Bousmina. 2004. A Modified Model Predictions and Experimental Results of Weld-Line Strength in Injection Molded PS/PMMA Blends. **Polymer**. 45: 2911–2920.
- Hashemi, S. and Y. Lepessova. 2007. Temperature and Weldline Effects on Tensile Properties of Injection Moulded Short Glass Fibre PC/ABS Polymer Composite. **J. Mater Sci**. 42: 2652–2661.
- Kaang, S., Y.W. Jin, Y.-I. Huh, W.-I. Lee and W.B. Im. 2006. A test method to measure fatigue crack growth rate of rubber materials. **Polymer Testing**. 25: 347-352.
- Kazmer, D. O. n.d. **Exploiting Melt Compressibility to Achieve Improved Weld Line Strengths**. University of Massachusetts Amherst. Available Source: kazmer.uml.edu/Staff/Archive/1998JPRCP_Weld_Strength.pdf, January 24, 2008.
- Kim S.-G. and N.P. Suh. 1986. Performance Prediction of Weldline Structure in Amorphous Polymers. **Polymer Engineering and Science**. 36: 1200-1207.
- Kim, J.K., S.H. Park, H. T.O and H.K. Jeon. 2001. The Effect of Weld-Lines on the Morphology and Mechanical Properties of Amorphous Polyamide/Poly(Ethylene-Ran-Propylene) Blend with Various Amounts of an in Situ Compatibilizer. **Polymer**. 42: 2209–2221.

- Kumnuantip, C., S. Pavasupree, J. Tansura and W. Sawedtasakrawpan. 2006. Investigation into the Properties of Polypropylene Blended with Natural Rubber. *In* **Congress on Science and Technology of Thailand 32nd**, Thailand.
- Liu S.-J., J.-Y. Wu and J.-H. Chang. 2001. Design of Experiments to Optimize the Weldline Strength in Injection Molded Thermoplastics, pp 507-509. *In* **SPE ANTEC Proceedings**. Dallas, Texas.
- Lu, C., S. Guo, L. Wen and J. Wang. 2004. Weld Line Morphology and Strength of Polystyrene/Polyamide-6/Poly (Styrene-Co-Maleic Anhydride) Blends. **European Polymer Journal**. 40: 2565–2572.
- Mekhilef, N., A. Ait-Kadi and A. Ajji. 1995. Weld Lines in Injection-Moulded Immiscible Blends: Model Predictions and Experimental Results. **Polymer**. 36: 2033-2042.
- Merah, N., M. Irfan-ul-Haq and Z. Khana. 2003. Temperature and Weld-Line Effects on Mechanical Properties of CPVC. **Journal of Materials Processing Technology**. 142: 247–255.
- Merah, N., M. Irfan-ul-Haq and Z. Khana. 2004. Effects of Injection Molding Weld on Fatigue Crack Resistance of CPVC at Different Temperatures. **Journal of Materials Processing Technology**. 155–156: 1261–1265.
- Merah, N., M. Irfan-ul-Haq and Z. Khana. 2004. Effects of Injection Molding Weld on Fatigue Crack Resistance of CPVC at Different Temperatures. **Journal of Materials Processing Technology**. 155–156: 1261–1265.
- Merhar, C.F., K.A. Beiter and K. Ishii. 1994. Weld-Line Strength in Injection Molded PVC Parts, pp 3450-3454. *In* **Proceedings of the 52nd SPE Annual Techn.** San Francisco, CA.
- Nguyen-Chung, T. 2004. Flow Analysis of the Weld Line Formation During Injection Mold Filling of Thermoplastics. *Rheol Acta*. 43: 240–245.
- Overton, L. n.d. **Flow Orientation and Weld Lines-They can Contribute to the Success or Failure of a Part. Engineering Design: A Global View of Dupont Polymers.**
- Available Source: <http://plastics.dupont.com/plastics/pdf/it/americas /processing/DCI384.pdf>, January 24, 2008.
- Patcharaphun, S. 2006. **Characterization and Simulation of Material Distribution and Fiber Orientation in Sandwich Injection Molded Parts**. Ph.D. Thesis, Chemnitz University of Technology.
- Rios, A., B. Davis, and P. Gramann. n.d. **Computer Aided Engineering in Compression Moulding. The Madison Group**. Available Source: <http://www.madisongroup.com/ Publications/Thermosets /cae.pdf>, January 23, 2008.
- Saad A. L. G., El-Sabbagh S. 2001. Compatibility studies on some polymer blend systems by electrical and mechanical techniques. **Journal of Applied Polymer Science**. 79: 60–71.
- Sae-oui, P., C. Sirisinhab, U.Thepsuwana, and P. Thapthonga. 2007. Influence of Accelerator Type on Properties of NR/EPDM Blends. **Polymer Testing**. 26: 1062–1067.

Seadan, M., P. Pongbhai, P. Thairaj, and T.W. Kamtornkul. 2002. Weld-line strength of rubber in injection molding: Effect of injection factors and compound characteristics.

Rubber Chemistry and Technology. 75: 83-91.

Smitthipong, W., R. Gadiou, L. Vidal, P. Wagner, and M. Nardi. 2008. 3D Raman Images of Rubber Blends (IR–HNBR). **Vibrational Spectroscopy**. 46: 8-13.

Suma, N., R. Joseph. and K.E. George. 1993. Improved Mechanical Properties of NR/EPDM and NR/ Butyl Blends by Precuring EPDM and Butyl. **Journal of Applied Polymer Science**. 49: 549 – 557.

Tegarty, J.B. 1940. **Method of Injection Thermoplastic Material into a Mold**. U.S. Patents 2,199,144.

Thanawan, S., S. Radabutra, P. Thamasirianunt, T. Amornsakchai, and K. Suchiva. 2009. Origin of Phase Shift in Atomic Force Microscopic Investigation of The Surface Morphology of NR/NBR Blend Film.

Ultramicroscopy. 109: 189-192.

Tjader T. and J. Seppala. 1998. Effect of material characteristics of polyolefins on weld line morphology and its correlation to mechanical properties. **Journal of Materials Science**. 33: 923-931.

Zhai, M., Y. C. Lam and C. K. Au. 2006. Runner Sizing and Weld Line Positioning for Plastics Injection Moulding with Multiple Gates. **Engineering with Computers**. 21: 218–224.

สรุปข้อคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิต่อโครงการ
“การศึกษาความแข็งแรงของรอยประสานในชิ้นงานยางธรรมชาติผสม” สัญญาเลขที่ RDG5250035

ข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ	ชี้แจงโดยนักวิจัย
<u>ความคิดเห็นด้านการพิมพ์ (Editorial)</u> 1. ในรายงานขาดบทสรุปรายงานสำหรับผู้บริหาร	นักวิจัยได้เพิ่มเติมบทสรุปสำหรับผู้บริหารในรายงานฉบับสมบูรณ์ตามข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ
<u>ความเห็นด้านวิชาการ (Technical)</u> 1. หน้า 13 ยาง NBR และ EPDM ที่ใช้ ควรระบุองค์ประกอบสำคัญว่าเป็นอย่างไร (EPDM เป็นชนิดที่มี diene ชนิดใด และ NBR มี acrylonitrile content กี่ %) เพราะต้องใช้อธิบายผลการทดสอบหลายรายการ เช่น หน้า 29 บรรทัดที่ 14 ในวงเล็บนั้น กล่าวลอยๆตามทฤษฎีไม่ได้โยงถึงชนิดของ NBR ที่ใช้ 2. สูตรตารางที่ 1 และ 2 ควรระบุชนิดยางธรรมชาติที่ใช้ เช่น RSS3 STR5 หรือ STR20 ไม่ใช่ระบุว่า “NR” 3. เหตุผลที่วิจารณ์ผลการทดลองบางประเด็นไม่ชัดเจนในทางเทคโนโลยียาง เช่น หน้า 23 บรรทัดที่ 2 จากด้านบน 4. จากผลการทดลอง ในกรณีกราฟไม่เป็นไปในทำนองเดียวกัน เกิดจากสาเหตุอะไร หรือเกิดผิดพลาดจากการเตรียมตัวอย่าง มีการทดลองซ้ำในองเดียวกันหรือไม่ ●รูปที่ 19 หน้า 22 ค่าของกราฟ 70/30 ของ weldline ทำไม่จึงสูง ทำไมกราฟ non-weldline และ weldline ไม่เป็นไปในทำนองเดียวกัน	1. ยาง NBR ที่ใช้เป็นยางจากบริษัท NANCAR เกรด 3345 ซึ่งมีปริมาณอะคริโลไนไตรล์ 33% จึงมีกระบวนการผลิตขึ้นรูปที่ง่ายและมีเวลาในการคงรูปที่ไม่นานจนเกินไป ในส่วนของยาง EPDM ได้เลือกใช้ยาง EPDM เกรด 6505 จากบริษัท Exxonmobil chemical ซึ่งมีปริมาณ Ethylidene Norbornene 9% จึงมีอัตราการคงรูปที่เร็วและสามารถใช้ร่วมกับยางชนิดอื่นได้ โดยรายละเอียดขององค์ประกอบที่กล่าวที่นักวิจัยได้เพิ่มเติมในรายงานฉบับสมบูรณ์ 2. ยางที่ใช้ในงานวิจัยเป็นยางธรรมชาติเกรด STR5L โดยรายละเอียดได้เพิ่มเติมในรายงานฉบับสมบูรณ์ตามข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ 3.สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติมีค่าที่มากกว่ายางอะคริโลไนไตรล์บิวตะไดอินในกรณีที่ไม่มีการเติมเสริมแรงทั้งคู่ แต่อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ได้มีการเติมเขม่าดำที่ปริมาณ 60 phr ซึ่งทำให้ยางอะคริโลไนไตรล์บิวตะไดอินมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นสูงมาก ในขณะที่การเติมเขม่าดำในยางธรรมชาติมีการเสริมแรงที่น้อยกว่า จึงทำยางทั้งสองชนิดมีค่าความแข็งแรงที่ใกล้เคียงกันเมื่อมีการใส่เขม่าดำที่ปริมาณสูง 4. ในอัตราส่วนการผสมต่างๆ ในงานวิจัยนี้ นักวิจัยได้ทำซ้ำจำนวน 15 ตัวอย่าง จากนั้นจึงใช้หลักทางสถิติในการตัดข้อมูลที่เกินส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และนำข้อมูลที่เหลือมาหาค่าเฉลี่ย จึงออกมาเป็นค่าความต้านทานต่อแรงดึงในแต่ละอัตราส่วนการผสม อย่างไรก็ตามจากผลการทดสอบบางส่วน ไม่เป็นไปตามแนวโน้มที่ควรจะเป็น ซึ่ง

ข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ	ชี้แจงโดยนักวิจัย
●รูปที่ 21 หน้า 23 กราฟ weldline เกิดอะไรขึ้น ควรอธิบายว่ารอยต่อมีผลอย่างไร และค่าของชุด 50:50 กับ 0:100 ทำไมใกล้เคียงกัน ●รูปที่ 25 รูปที่ 27 และรูปที่ 29 กราฟ non-weldline และ weldline ไม่เป็นทำนองเดียวกัน ต่างกันมาก อธิบายว่าเกิดอะไรขึ้น ได้ทำการทดลองซ้ำหรือไม่ ●เรื่องยางผสมไม่เพียงมีปัญหาเรื่องรอยต่อ แต่ยังมีปัญหาเรื่องสาร vulcanizing agent กระจาย/ละลายใน phase NR กับ phase EPDM, NBR ไม่เท่ากันทำให้ไม่เป็นไปในทำนองเดียวกัน เมื่อสัดส่วนผสมยางเปลี่ยนไป (ปัญหา blending) จึงต้องทำหลายๆซ้ำจะสามารถสรุปได้ 5. บทสรุปของผลวิจัยโครงการนี้ ควรระบุว่าได้อะไรที่เป็นเรื่องใหม่หรือเป็นประโยชน์ นอกเหนือจากความรู้ที่มีอยู่แล้วใน text เกี่ยวกับเทคโนโลยียาง ข้อสรุปในหน้า 35 นั้นเป็นความรู้ที่มีอยู่แล้ว	ผู้วิจัยคาดว่า ปัญหาการกระจายตัวของสารเร่งปฏิกิริยาในแต่เฟสของยางผสมรวมไปถึง การเกิดการคงรูปที่ไม่ทั่วถึง ซึ่งเป็นงานวิจัยในอนาคตที่ศึกษาปัจจัยในกระบวนการในการบดผสมยางธรรมชาติเข้ากับยางชนิดอื่นๆ ที่ให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด 5. ผลที่ได้รับจากงานวิจัยนี้ สามารถนำไปใช้ปรับปรุงผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่เกิดรอยประสานขึ้น โดยใช้การบดผสมเข้ากับยางสังเคราะห์ซึ่งมีความเหมาะสมในการใช้งานแตกต่างกันไปในแต่ละชนิด ซึ่งผลจากการทดสอบสามารถเป็นข้อมูลเพื่อเลือกใช้ปริมาณการบดผสมที่เหมาะสม