



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่ออายุความล่าของผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ

โดย สมเจตน์ พัทธพันธ์ และคณะ

ตุลาคม 2555

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่ออายุความล่าช้าของผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ

คณะผู้วิจัย

สังกัด

- | | |
|----------------------------|---|
| 1. ผศ.ดร. สมเจตน์ พชรพันธ์ | ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 3. นายชิตชาติ ดอกรัก | ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 4. นายวัชรพงษ์ ชูแก้ว | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |

ชุดโครงการวิจัยแห่งชาติ: ยางพารา

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานความก้าวหน้าฉบับนี้ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

สารบัญ

	หน้า
บทสรุปรายงานสำหรับผู้บริหาร	1
บทคัดย่อ	4
เนื้อหา	
ความสำคัญและที่มาของโครงการ	6
วัตถุประสงค์	7
ทฤษฎี แนวคิดในการทำวิจัย และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
วิธีการ	12
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล	18
สรุปผล	27
ข้อเสนอแนะ	28
เอกสารอ้างอิง	29
ภาคผนวก	31

แบบสรุ่ยย่อสำหรับผู้บริหาร

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย): การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่ออายุความล้าของผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ

(ภาษาอังกฤษ): Investigation on Parameters Affecting Fatigue Life of Natural Rubber Product

ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานสังกัด และที่อยู่

ชื่อ-สกุล ผศ.ดร. สมเจตน์ พชรพันธ์

หน่วยงาน ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ที่อยู่ 50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

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

นักศึกษา/ผู้ร่วมวิจัย

นายวัชรพงษ์ ชูแก้ว

ผู้ร่วมวิจัย

นายชิตชาติ ดอกกรัก

ผู้ร่วมวิจัย

ระยะเวลาดำเนินการ 9 เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 สิงหาคม 2554 ถึงวันที่ 30 เมษายน 2555

ปัญหาที่ทำวิจัยและความสำคัญ

ยางธรรมชาติถูกนำมาใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์อย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ ยกตัวอย่างเช่น ล้อยาง ยางกันกระแทก เป็นต้น โดยส่วนมากรับภาระสลับ (fluctuating load) หรือภาระหลายแกน (multi-axial loading) ซึ่งเมื่อรับภาระดังกล่าวเป็นระยะเวลานานๆ อาจทำให้ชิ้นส่วนเริ่มแตกร้าว (crack initiation) และเกิดการขยายตัวของรอยแตก (crack propagation) เนื่องจากความล้า (fatigue) ส่งผลให้เกิดความเสียหายทั้งระบบหรือทั้งโครงสร้างได้ ดังนั้นในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางจึงมีความจำเป็นต้องคำนึงถึงความแข็งแรง รวมถึงความล้าทางกลของชิ้นงานในตำแหน่งที่เป็นจุดบกพร่องหรือตำแหน่งที่มีความอ่อนแอบนชิ้นงานนับตั้งแต่เริ่มต้นของกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง เพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายในระหว่างการใช้งาน อย่างไรก็ตามมีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่ออายุความล้าของยาง ซึ่งมีสาเหตุมาจากความหลากหลายของส่วนผสมยางคอมพาวนด์ที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานแต่ละประเภท ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่ออายุความล้าของชิ้นงานยางธรรมชาติ ได้แก่ ระบบการคงรูป (curing system) ความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) โมดูลัส (modulus) ระยะยืด ณ จุดขาด (elongation at break) และความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear strength) รวมทั้งปัจจัยที่มาจากรูปแบบของร่องบากเริ่มต้น (initial notch pattern) เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการออกแบบผลิตภัณฑ์ยางให้มีความเหมาะสมและเกิดประสิทธิภาพสูงสุดต่อการนำไปใช้งาน

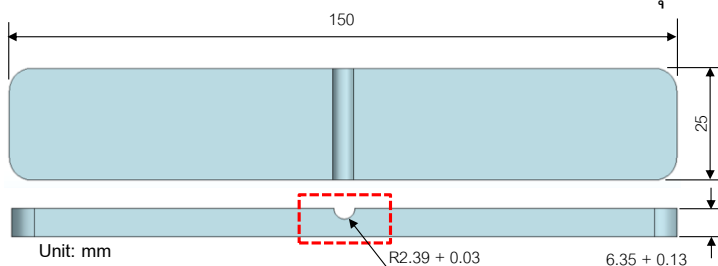
วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาอิทธิพลจากสมบัติทางกลของวัสดุยางและรูปแบบของร่องบากเริ่มต้นที่ส่งผลต่ออายุความล้าของชิ้นงานยาง

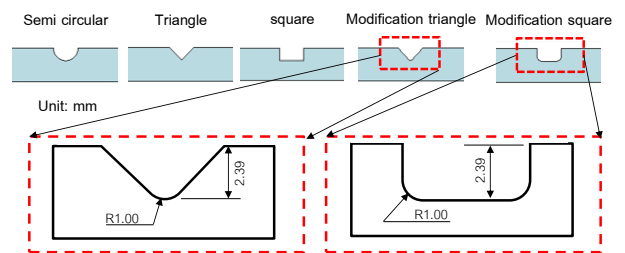
ผลการดำเนินงาน

1. วิธีการ

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและจัดสร้างแม่พิมพ์อัดขึ้นรูป สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานยางเพื่อทดสอบอายุความล้า ดังแสดงในภาพที่ 1 โดยแม่พิมพ์ที่จัดสร้างขึ้นสามารถปรับเปลี่ยนอินลิธเพื่อสร้างร่องบาก (notch pattern) บนชิ้นงานในลักษณะต่างๆ ได้แก่ ร่องบากครึ่งวงกลม ร่องบากสี่เหลี่ยม ร่องบากสามเหลี่ยม และร่องบากปรับปรุงโดยการเพิ่มส่วนโค้งที่บริเวณขอบมุม ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 1 ชิ้นงานทดสอบอายุความล้า



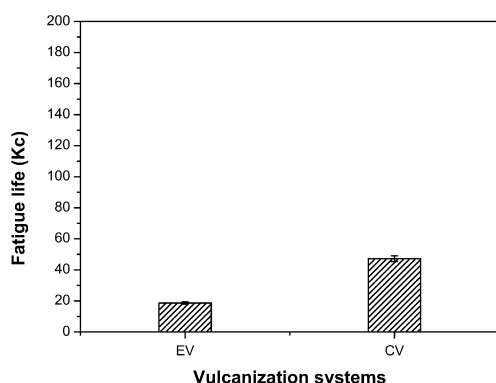
ภาพที่ 2 ลักษณะรูปแบบร่องบากที่ใช้ในการทดสอบ

นำยางคอมพาวนด์ที่บดผสมแล้ว ชั่งน้ำหนักให้ได้ 60 กรัม จากนั้นนำไปวางในแม่พิมพ์อัดขึ้นรูป อัดขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 150°C โดยใช้แรงดันแม่พิมพ์ 20 MPa จนกระทั่งได้ตามระยะเวลาการขึ้นรูปที่ 90% (Tc90) แล้วจึงนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ จากนั้นนำชิ้นงานยางที่ขึ้นรูปแล้วไปทดสอบอายุความล้า (flex-fatigue life) ด้วยเครื่อง De Mattia Flexing ตามมาตรฐาน ASTM D430 โดยใช้อัตราเร็วในการทดสอบ 300±10 รอบต่อนาที

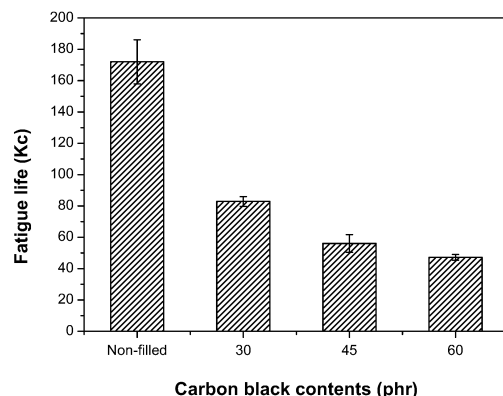
2. ผลการวิจัยและวิจารณ์

อิทธิพลของระบบการขึ้นรูปที่มีต่ออายุความล้าของชิ้นงานยาง

ผลการศึกษาอายุความล้าของชิ้นงานยางที่ผสมเขม่าดำในปริมาณ 60 phr ซึ่งการขึ้นรูปด้วยระบบ EV และ CV โดยใช้รูปแบบร่องบากแบบครึ่งวงกลม ตามมาตรฐาน ASTM 430 ดังแสดงในภาพที่ 3 พบว่า ชิ้นงานยางที่ขึ้นรูปด้วยระบบ CV มีอายุความล้าที่สูงกว่า ยางที่ขึ้นรูปด้วยระบบ EV ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากพันธะเชื่อมขวางของยางที่ขึ้นรูปด้วยระบบ CV เป็นแบบ Poly-sulphidic ที่มีช่องว่างระหว่างสายโซ่โมเลกุลที่มากกว่ายางรูปแบบ EV สายโซ่โมเลกุลจึงเคลื่อนตัวได้ดี ส่งผลให้สามารถดูดซับและคายพลังงานได้ดีกว่า



ภาพที่ 3 อายุความล้าของชิ้นงานยางที่ขึ้นรูปด้วยระบบ EV และ CV



ภาพที่ 4 อายุความล้าของชิ้นงานยางผสมเขม่าดำในปริมาณต่างกัน

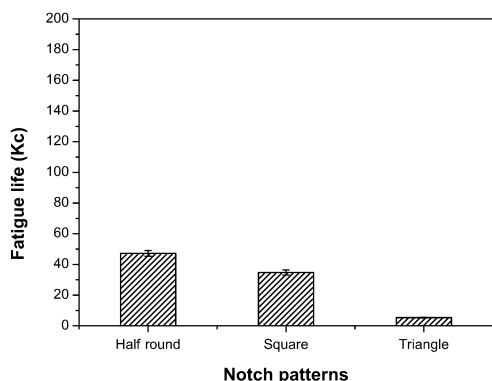
อิทธิพลของปริมาณเขม่าดำที่มีต่ออายุความล้าของชิ้นงานยาง

ผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณเขม่าดำที่มีผลต่ออายุความล้า ดังแสดงในภาพที่ 4 พบว่า ยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารตัวเติมมีอายุความล้าที่สูงกว่ายางที่ผสมเขม่าดำ เนื่องจากชิ้นงานยางที่ไม่ผสมสารตัวเติม สามารถกระจายพลังงานทางกลได้ดี (mechanical energy dissipation) หรือมีค่า Hysteresis ต่ำ และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของการเพิ่มปริมาณเขม่าดำ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการเพิ่มปริมาณเขม่าดำทำให้ชิ้นงานมีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด ความต้านทานต่อแรงดึง ค่ามอดูลัส รวมถึงทำให้ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของค่ามอดูลัสและค่าความแข็งแรง ส่งผลให้ชิ้นงานมีอายุความล้าสั้นลง เนื่องจากการทดสอบอายุความล้าแบบหักงอ เป็นการทดสอบแบบควบคุมระยะยืด (displacement control) ชิ้นงานยางที่มีค่ามอดูลัสหรือค่าความแข็งแรงสูง เกิดการสะสมพลังงานความเครียด (strain energy density) ที่สูงกว่า ทำให้มีโอกาสเกิดความเสียหายเนื่องจากความล้าได้รวดเร็ว และนอกจากนี้ชิ้นงานยางที่ผสมเขม่าดำเพิ่มขึ้น มีค่า Hysteresis เพิ่มขึ้น ประกอบกับเขม่าดำมีค่าการนำความร้อนที่ดี ส่งผลให้พลังงานที่ชิ้นงานยางเก็บสะสมไว้ในขณะที่รับภาระแบบสลับ เปลี่ยนไปเป็นความร้อน ชิ้นงานจึงเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน (thermal degradation) ได้ และยังมีสาเหตุมาจากค่าความแข็งแรง และค่ามอดูลัสที่เพิ่มขึ้นทำให้ปลายรอยแตก (crack tip) มีลักษณะที่แหลมคมกว่า จึงเกิดความเค้นหนาแน่นสูง (stress concentration) และรอยแตกขยายตัวได้รวดเร็ว

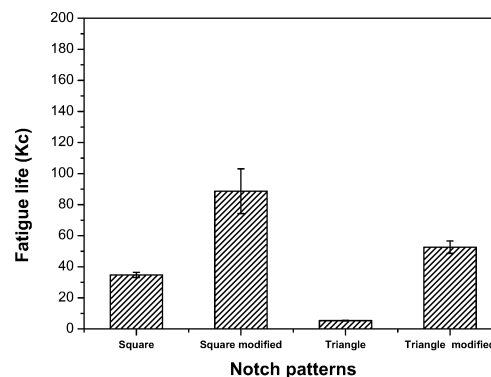
อิทธิพลของรูปแบบร่องบากบนชิ้นงานที่มีต่ออายุความล้าของชิ้นงานยาง

จากผลการศึกษาอิทธิพลของรูปแบบร่องบากบนชิ้นงานที่มีผลต่ออายุความล้า ดังแสดงในภาพที่ 5 พบว่า ร่องบากครึ่งวงกลมมีอายุความล้ามากกว่าร่องบากสี่เหลี่ยมและร่องบากสามเหลี่ยม เนื่องจากความเค้นหนาแน่น ที่เกิดขึ้นของร่องบากครึ่งวงกลมมีค่าต่ำที่สุด แต่หากพิจารณาในกรณีของร่องบากสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยมซึ่งมีขอบมุมที่แหลมคม (sharply notch) เช่นเดียวกัน พบว่า ร่องบากสี่เหลี่ยมมีอายุความล้าที่มากกว่าร่องบากสามเหลี่ยม โดยมีสาเหตุมาจากร่องบากสี่เหลี่ยมเกิดความเค้นหนาแน่นที่ต่ำกว่า เนื่องจากมุมภายในร่องบากมีขนาดใหญ่มากกว่าร่องบากสามเหลี่ยม อีกทั้งการทดสอบอายุความล้าแบบหักงอ (flex fatigue life) บริเวณส่วนกลางชิ้นงานที่เป็น

ร่องบากมีการยึดตัวสูง โดยในกรณีของร่องบากสี่เหลี่ยมที่บริเวณดังกล่าวมีพื้นที่ในการกระจายแรงได้มากกว่าแบบร่องบากแบบสามเหลี่ยม



ภาพที่ 5 อายุความล้าของชิ้นงานยางผสมเขม่าดำซึ่งใช้รูปแบบร่องบากแตกต่างกัน



ภาพที่ 6 อายุความล้าของชิ้นงานยางผสมเขม่าดำซึ่งใช้รูปแบบร่องบากที่ปรับปรุง

อิทธิพลของรูปแบบร่องบากที่ได้รับการปรับปรุงร่องที่มีต่ออายุความล้าของชิ้นงานยาง

ผลจากการปรับปรุงรูปแบบร่อง (มีขนาดและรายละเอียดดังแสดงในภาพที่ 2) โดยการลดส่วนที่แหลมคมของร่องบากแบบสี่เหลี่ยมและร่องบากแบบสามเหลี่ยม ดังแสดงในภาพที่ 6 พบว่า ร่องบากที่ปรับปรุงแล้วมีค่าอายุความล้าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับร่องบากครึ่งวงกลมและร่องบากที่ไม่ได้ปรับปรุง โดยเฉพาะอย่างยิ่งร่องบากแบบสี่เหลี่ยมที่ปรับปรุงแล้ว ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากความเค้นหนาแน่นมีค่าลดลง เนื่องจากส่วนโค้งของร่องบากที่เพิ่มขึ้น

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่ออายุความล้า (fatigue life) ของชิ้นงานยางธรรมชาติ ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่า รูปแบบการเชื่อมขวางแบบ Poly-sulphidic (ยางที่คงรูปแบบ CV) ทำให้ชิ้นงานยางมีอายุความล้ามากกว่ารูปแบบการเชื่อมขวางแบบ Mono หรือ Di-sulphidic (ยางที่คงรูปแบบ EV) ในขณะที่อายุความล้ามีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำ และเมื่อพิจารณาผลของรูปแบบร่องบากที่มีต่ออายุความล้าของชิ้นงานยาง พบว่า ร่องบากครึ่งวงกลมมีอายุความล้ามากกว่าร่องบากสี่เหลี่ยมและร่องบากสามเหลี่ยม แต่หากพิจารณาในกรณีของร่องบากสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยมซึ่งมีขอบมุมที่แหลมคมเช่นเดียวกัน พบว่า ร่องบากสี่เหลี่ยมมีอายุความล้าที่มากกว่าร่องบากสามเหลี่ยม และผลจากการปรับปรุงรูปแบบร่องโดยการลดส่วนที่แหลมคมของร่องบากแบบสี่เหลี่ยมและร่องบากแบบสามเหลี่ยม แสดงให้เห็นว่า ร่องบากที่ปรับปรุงแล้วมีค่าอายุความล้าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับร่องบากครึ่งวงกลมและร่องบากที่ไม่ได้ปรับปรุง โดยเฉพาะอย่างยิ่งร่องบากแบบสี่เหลี่ยมที่ปรับปรุงแล้ว ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้สรุปได้ว่า ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลแบบสถิตย์บางอย่างเช่น ความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด ไม่สามารถบ่งชี้หรือคาดการณ์สมบัติเชิงพลวัต (ในงานวิจัยนี้ คือ อายุความล้า) ได้ดี โดยสมบัติเชิงกายภาพและสมบัติเชิงกลแบบสถิตย์ที่สามารถบ่งชี้อายุความล้าได้ดี คือ รูปแบบการเชื่อมขวาง และค่ามอดูลัส และนอกจากนี้ในการออกแบบชิ้นงานยางที่มีร่องบากซึ่งรับภาระแบบพลวัต สิ่งที่ต้องพิจารณานอกจากเหนือจากความเค้นหนาแน่นบริเวณขอบมุมที่แหลมคมแล้ว ยังต้องคำนึงถึงลักษณะการกระจายแรงในขณะที่เกิดการหักงอสูงอีกด้วย

ข้อเสนอแนะที่คาดว่าจะควรวิจัยเพิ่มเติม

งานวิจัยเป็นการศึกษาอายุความล้าของชิ้นงานทดสอบ ซึ่งควรขยายผลการศึกษาและวิจัยเพื่อหาแนวทางการออกแบบชิ้นงานยางที่มีความซับซ้อนมากขึ้น ทั้งนี้ต้องอาศัยการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (Computer Aided Engineering, CAE) เพื่อวิเคราะห์หาตำแหน่งและขนาดของความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน จากนั้นนำไปออกแบบแม่พิมพ์ทดสอบเพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นหนาแน่นและอายุความล้าของชิ้นงาน ซึ่งผู้วิจัยคาดว่าแนวทางนี้สามารถนำไปประเมินอายุการใช้งานของชิ้นงานที่มีความซับซ้อนมากขึ้นโดยใช้เครื่องมือที่มีราคาถูกลงได้

ผลงานทางวิชาการที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

อยู่ในระหว่างการส่งบทความเพื่อนำเสนอในงานประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของระบบการคงรูปและปริมาณเขม่าดำ รวมถึงปัจจัยที่มาจากรูปแบบของร่องบาก (notch pattern) ที่มีต่อสมบัติเชิงกลแบบสถิตย์ (static properties) ซึ่งได้แก่ ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุด ระยะยืด ณ จุดขาด ค่ามอดูลัส ความต้านทานต่อการฉีกขาด และความแข็งแรง รวมทั้งสมบัติเชิงพลวัต (dynamic properties) คือ อายุความล้า (fatigue life) ของชิ้นงานยางธรรมชาติ จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานยางที่ได้จากระบบการคงรูปแบบดั้งเดิม (Conventional Vulcanization system, CV) และแบบประสิทธิภาพ (Efficient Vulcanization system, EV) พบว่า ยางที่คงรูปด้วยระบบ CV มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาด รวมถึงค่ามอดูลัสที่มากกว่า ยางที่คงรูปด้วยระบบ EV นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณการผสมเขม่าดำ ยังส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางเพิ่มขึ้น ในขณะที่ระยะยืด ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลง จากผลการศึกษาอายุความล้าของชิ้นงานยางแสดงให้เห็นว่า ยางที่ผ่านระบบการคงรูปแบบ CV มีอายุความล้าที่มากกว่ายางที่ผ่านระบบการคงรูปแบบ EV ในขณะที่อายุความล้ามีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำในยาง เมื่อพิจารณาอิทธิพลของรูปแบบร่องบากที่มีต่ออายุความล้าของชิ้นงานยาง พบว่า ร่องบากครึ่งวงกลมมีอายุความล้ามากกว่าร่องบากสี่เหลี่ยมและร่องบากสามเหลี่ยม ทั้งนี้เนื่องจากความเค้นหนาแน่น (stress concentration) และการกระจายตัวของความเค้น (stress distribution) ที่เกิดขึ้นบริเวณร่องบาก และผลจากการปรับปรุงรูปแบบร่องบากโดยการลดส่วนที่แหลมคมของร่องบากแบบสี่เหลี่ยมและร่องบากแบบสามเหลี่ยม แสดงให้เห็นว่า ร่องบากที่ปรับปรุงแล้วมีค่าอายุความล้าเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก

คำสำคัญ: อายุความล้า ผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ กระบวนการขึ้นรูปยางด้วยแม่พิมพ์

ABSTRACT

The objective of this work was to investigate the influences of the vulcanizing system, carbon black content, and notch pattern on the static and dynamic properties, i.e. fatigue life of natural rubber (NR) part. The NR vulcanizates were characterized with respect to ultimate tensile strength (UTS), modulus, elongation at break, tear strength and hardness. The measured results of mechanical strength obtained by using conventional vulcanization (CV) and efficient vulcanization (EV) systems indicated that the NR vulcanized by CV system gave a higher modulus, tensile and tear strength in comparison with those of EV system. An increasing amount of carbon black increased the mechanical strength of NR, while decreasing elongation at break, as expected. From the results obtained by fatigue test, it can be seen that the fatigue life of NR vulcanized by CV was longer than EV, while an increasing amount of carbon black tended to decrease the fatigue life of NR part. The fatigue life of NR part with different notch patterns indicated that the half round pattern gave the longest fatigue life as compared to those of square and triangle patterns, respectively. This was associated with the stress concentration and the stress distribution occurred at the notch tip during the test. The fatigue life of NR notched with square and triangle patterns can be significantly increased by increasing the radius of curvature of the notch tip.

Keywords: Fatigue life, Natural rubber product, Rubber molding process

1. ความสำคัญและที่มาของโครงการ

ยางธรรมชาติถูกนำมาใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์อย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรม ยกตัวอย่างเช่น ล้อยาง ยางกันกระแทก และยางรองพื้นรองเท้า เป็นต้น โดยส่วนมากรับภาระสลับ (fluctuating load) หรือภาระหลายแกน (multi-axial loading) ซึ่งเมื่อรับภาระเป็นระยะเวลานานๆ อาจทำให้ชิ้นส่วนเริ่มเกิดการแตก (crack initiation) และเกิดการขยายตัวของรอยแตก (crack propagation) เนื่องจากความล้า (fatigue) ส่งผลให้เกิดความเสียหายทั้งระบบหรือทั้งโครงสร้างได้ ความเสียหายของผลิตภัณฑ์ยางนั้นมักไม่เกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด เนื่องจากมีการออกแบบเผื่อไว้ให้เหมาะสม โดยการพิจารณาจากความสามารถในการรับแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานทดสอบ ในสภาวะการใช้งานจริงชิ้นงานมักเกิดความเสียหายเนื่องจากความล้า ซึ่งสามารถเกิดขึ้นกับวัสดุ แม้ว่าภาระกระทำต่ำกว่าแรงสูงสุดที่วัสดุสามารถรับได้ และที่สำคัญเป็นความเสียหายที่ไม่อาจทำนายล่วงหน้าได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ ซึ่งหากเป็นชิ้นส่วนที่มีความสำคัญ อย่างเช่น ล้อยาง หรืออุปกรณ์รองรับการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรกล อาจทำให้เกิดความเสียหายแก่ชีวิตและทรัพย์สินได้ การเกิดความเสียหายเนื่องจากความล้าเริ่มต้นจาก การเกิดรอยแตกขนาดเล็ก (microcrack) หรือเกิดรอยเสียหาย (flaw) ซึ่งความเสียหายเหล่านี้มีสาเหตุมาจากปัจจัยดังต่อไปนี้ คือ ชนิดและปริมาณของสารตัวเติม การกระจายตัวที่ไม่ดีของสารตัวเติม โพรงอากาศ (void) ภายในชิ้นงาน หรือรอยรอยที่เกิดขึ้นจากผิวแม่พิมพ์ (Lake, 1972; Mars and Fatemi, 2002) โดยเมื่อชิ้นส่วนยางได้รับภาระกระทำซ้ำๆ ทำให้บริเวณผิวสัมผัส (interface) ระหว่างยางและสารตัวเติมเกิดความเสียหาย และเกิดรอยแตกขนาดเล็ก ดังนั้นอันตรกิริยาของเนื้อยางกับสารตัวเติม ชนิดและปริมาณรวมทั้งการกระจายตัวของสารตัวเติมจึงมีอิทธิพลต่อการเกิดรอยแตกขนาดเล็ก ในขณะที่เกี่ยวกับการขยายตัวของรอยแตกมีความสัมพันธ์กับค่าพลังงานการฉีกขาด (tearing energy) ของวัสดุ และประสิทธิภาพของสารตัวเติมที่ขัดขวางการขยายตัวของรอยแตก (Lake, 1972) ซึ่งในงานวิจัยของ De and Gent (1996) ได้ศึกษาพลังงานการฉีกขาดของยางผสมเขม่าดำและรายงานค่าพลังงานการฉีกขาดขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ชนิดของเขม่าดำและชนิดของยางที่ใช้ โดยในกรณีที่ไม่มีร่องบาก ชิ้นงานยางจะมีความต้านทานต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้นประมาณ 5-10 เท่า ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของฮิสเทอรีซิส (hysteresis) ขณะทำงานวิจัยของ Kim and Jeong (2005) ได้ศึกษาอิทธิพลของชนิดเขม่าดำที่มีต่ออายุความล้า ฮิสเทอรีซิส และลักษณะรอยแตกที่ผิว (fracture surface morphology) ของยางธรรมชาติ

ดังนั้นในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องคำนึงถึงความล้าทางกลของชิ้นงานในตำแหน่งที่เป็นจุดบกพร่องหรือตำแหน่งที่มีความอ่อนแอบนชิ้นงานนับตั้งแต่เริ่มต้นกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง เพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายในระหว่างการใช้งาน อย่างไรก็ตามจากการสำรวจเอกสาร แสดงให้เห็นว่า องค์ความรู้ทางด้านอายุความล้าของยางยังไม่เป็นที่ชัดเจนมากนัก ตัวอย่างเช่น ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นพันธะกับอายุความล้า อุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานยางขณะที่

รับภาระแบบสลับ เป็นต้น ซึ่งมีสาเหตุมาจากความหลากหลายของชนิดยางและสารเติมแต่ง ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้ศึกษาถึงอิทธิพลของปัจจัยที่มาจากสมบัติเชิงกลของวัสดุยาง รวมถึงรูปแบบร่องบาก ที่มีต่ออายุความล้าของชิ้นงานยาง เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการออกแบบผลิตภัณฑ์ยางให้มีความเหมาะสมและเกิดประสิทธิภาพสูงสุดต่อการนำไปใช้งาน

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาอิทธิพลจากสมบัติเชิงกลของวัสดุยางและรูปแบบของร่องบากเริ่มต้นที่ส่งผลต่ออายุความล้าของชิ้นงานยาง

3. ทฤษฎี แนวคิดในการทำวิจัย และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วัสดุยางมีความสามารถในการคงทนต่ออัตราการยืดตัวที่สูง โดยไม่เกิดการเสียรูปถาวรและเกิดรอยแตกร้าว ด้วยข้อดีดังกล่าวนี้ทำให้มีความเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานกับอุปกรณ์หลากหลายชนิด เช่น ยางกันสั่นสะเทือน ยางกันกระแทก ล้อยาง ซีลยาง แบร้ง ยางพื้นรองเท้า และอุปกรณ์ด้านการแพทย์ เป็นต้น ชิ้นงานยางเหล่านี้เมื่อถูกนำไปใช้งานในลักษณะที่รับภาระสลับเป็นระยะเวลานาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งชิ้นส่วนที่ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ ส่งผลให้เกิดความเสียหายในชิ้นส่วนยางเนื่องจากความล้า (fatigue failure) และอาจส่งผลต่อความเสียหายที่เกิดขึ้นทั้งระบบหรือทั้งโครงสร้างได้ ความต้านทานต่อความล้าทางกลเป็นปัจจัยหลักที่ได้นำมาพิจารณาเกี่ยวกับอายุการใช้งานของชิ้นงานยาง ซึ่งสาเหตุที่ทำให้ความต้านทานต่อความล้าลดลง เกิดขึ้นจากการออกแบบรูปร่างที่ไม่เหมาะสมและมีข้อบกพร่องบนชิ้นงาน ดังนั้นวิศวกรและผู้ออกแบบผลิตภัณฑ์จำเป็นต้องออกแบบโดยการคำนึงถึงความแข็งแรงของชิ้นงาน และความล้าทางกลของชิ้นงาน นับตั้งแต่เริ่มต้นกระบวนการพัฒนาผลิตภัณฑ์ เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ยางมีความคงทนและมีต้นทุนในการผลิตต่ำ

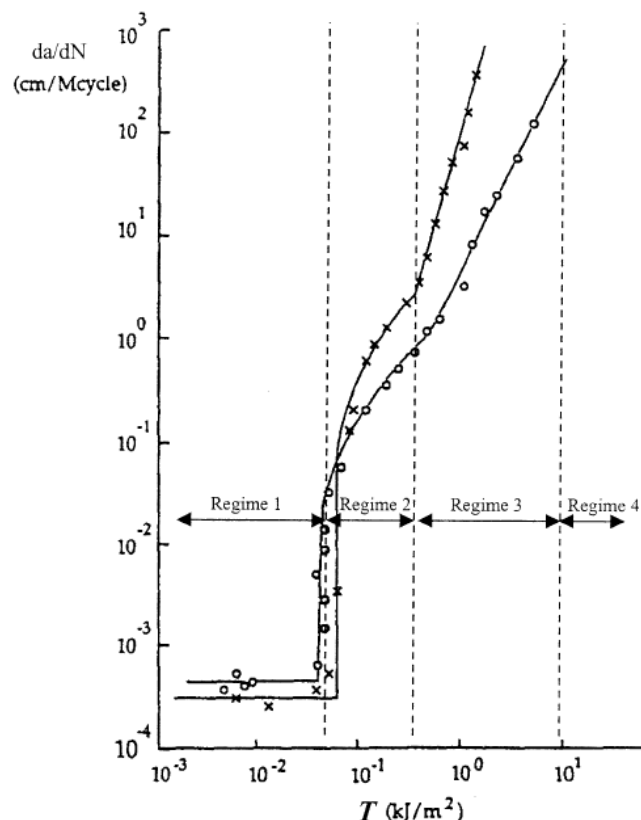
การป้องกันความเสียหายจากความล้าเพื่อให้เกิดความปลอดภัยและน่าเชื่อถือในการนำไปใช้งาน จำเป็นต้องทราบอายุความล้าของชิ้นงาน อย่างไรก็ตามในปัจจุบันทฤษฎีและหลักการของกระบวนการเกิดความล้าสำหรับวัสดุยางยังไม่เป็นที่ชัดเจนมาก จากการสำรวจเอกสารสามารถแบ่งการศึกษาด้านอายุความล้าของชิ้นงานยาง ออกเป็น 2 ระยะ คือ การศึกษาระยะเวลาเริ่มเกิดรอยแตก (crack nucleation) โดยพิจารณาจากชิ้นงานเริ่มต้นที่ไม่มีรอยแตก จากนั้นรอยแตกเริ่มก่อตัวขึ้นเมื่อมีความเค้นหนาแน่นที่บริเวณนั้น และในระยะที่สอง คือ ระยะเวลาที่รอยแตกบนชิ้นงานเกิดการขยายตัว (crack growth) เนื่องจากมีความเค้นกระทำในลักษณะที่ซ้ำไปซ้ำมา ทำให้พื้นที่รับแรงของวัสดุลดลง หรือแรงกระทำต่อหน่วยพื้นที่มีค่าเพิ่มมากขึ้น รอยแตกจะขยายตัวและวัสดุเกิดการเสียหายในที่สุด (Mars and Fatemi, 2002)

วิธีการทำนายอายุความล้าของชิ้นงานยาง สามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี โดยวิธีแรกคือแบบจำลองสำหรับการทำนายอายุการเริ่มเกิดรอยแตกร้าว (crack nucleation approach) ซึ่งจำเป็นต้องทราบถึงลักษณะการรับแรงของชิ้นงานที่พิจารณา โดยใช้หลักการทางด้านกลศาสตร์ของสารต่อเนื่อง (continuum mechanic) ในขณะที่วิธีที่สอง คือ แบบจำลองสำหรับการทำนายการขยายตัวของรอยแตกร้าว (crack growth approach) โดยใช้หลักการทางด้านกลศาสตร์การแตกหัก (fracture mechanic) ซึ่งจำเป็นต้องทราบลักษณะของชิ้นงานเริ่มต้นและอัตราการปล่อยพลังงาน (energy release rate, G) ของวัสดุ Rivlin และ Thomas (1953) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการแตกหักของวัสดุยาง โดยใช้หลักการเกี่ยวกับการแตกหักของวัสดุประเภทแก้ว ซึ่งมาจากแนวคิดของ Griffith (1920) ที่ว่าการขยายตัวของรอยแตกเกิดขึ้นเนื่องจากพลังศักย์ที่สะสมในวัสดุเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานที่ทำให้เกิดพื้นผิวใหม่ ซึ่งเรียกว่า พลังงานผิวใหม่ (new surface energy) โดยสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 1

$$T = -\frac{dU}{dA} \quad (1)$$

อัตราการปล่อยพลังงาน (G) เป็นพลังงานที่สะสมต่อพื้นที่ของรอยแตก ซึ่งในงานวิจัยทางด้านการแตกหักของวัสดุยางนิยมใช้คำว่า พลังงานฉีกขาด (tearing energy, T) จากสมการที่ 1 U คือ พลังงานสะสม และ A คือ พื้นที่ผิวของรอยแตก พลังงานฉีกขาดมีความสัมพันธ์กับอัตราการขยายตัวของรอยแตก (da/dN) ดังแสดงในภาพที่ 1

จากกราฟอัตราการขยายตัวของรอยแตก (da/dN) และพลังงานฉีกขาด (T) สามารถแบ่งได้ 4 ช่วง (ดังแสดงในภาพที่ 1) โดยในช่วงแรก พลังงานฉีกขาดที่ชิ้นงานได้รับน้อยกว่าพลังงานที่ทำให้วัสดุเกิดการฉีกขาด ในช่วงนี้ค่าการขยายตัวของรอยแตกคงที่ โดยการขยายตัวของรอยแตกที่คงที่นี้เป็นผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมเพียงอย่างเดียวโดยไม่ขึ้นอยู่กับแรงทางกล ตัวอย่างเช่น ผลจากโอโซนในบรรยากาศ (Kaang *et al.*, 2006) ช่วงที่ 2 ค่าอัตราการปล่อยพลังงานอยู่ในช่วงเปลี่ยนแปลง (transition) กล่าวคือ รอยแตกเกิดการขยายตัว (crack propagation) ในอัตราที่คงที่ หลังจากช่วงการเปลี่ยนแปลงจะเข้าสู่ช่วงที่ 3 ซึ่งเป็นช่วงที่รอยแตกเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขยายตัวของรอยแตกจากความล้าและอัตราการปล่อยพลังงานเป็นไปตามกฎยกกำลัง (power law)

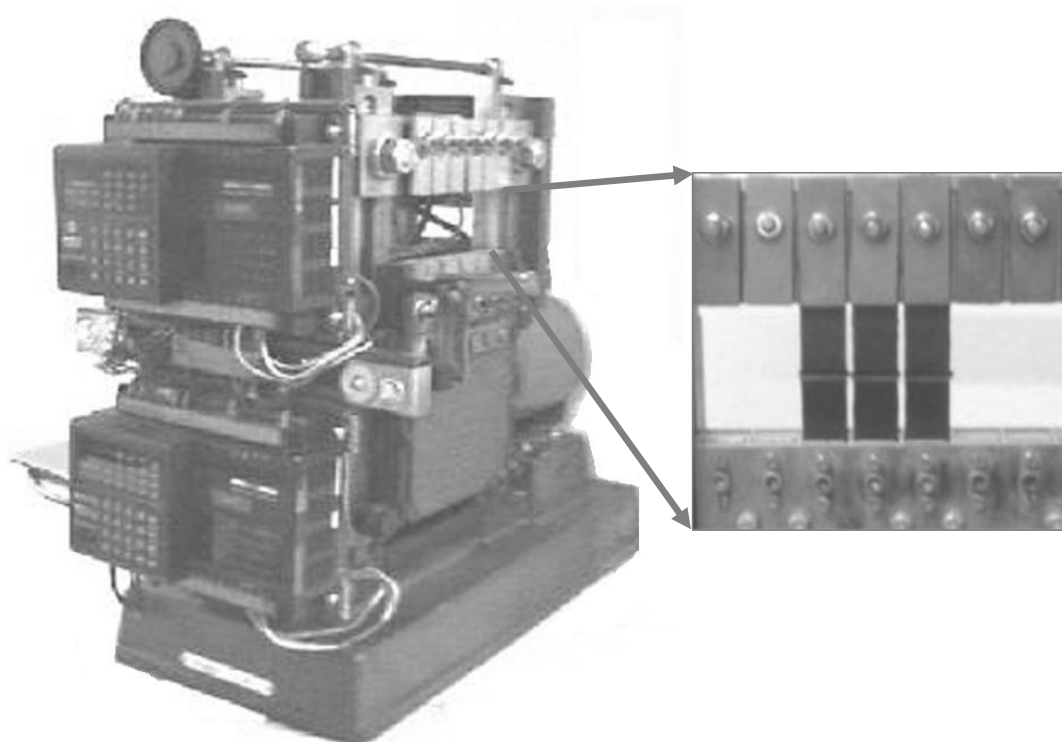


ภาพที่ 1 ช่วงของการขยายตัวของรอยแตก (Mars and Fatemi, 2002)

การศึกษาอายุความล้าของชิ้นงานจำเป็นต้องอาศัยเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูง (ซึ่งทำให้เครื่องทดสอบมีราคาค่อนข้างสูง) เพื่อหาค่าคงที่ต่างๆ ที่ใช้ในการทำนายอายุความล้าของชิ้นงาน โดยส่วนใหญ่นิยมใช้กันในงานวิจัยหรืออุตสาหกรรมขนาดใหญ่เท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับความล้าในวัสดุที่ยังไม่ครอบคลุมปัจจัยทั้งหมด ทั้งนี้เนื่องมาจากอายุความล้าของชิ้นงานนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยที่มีความหลากหลาย โดยพบว่าการเริ่มเกิดขึ้นของรอยแตกขนาดเล็ก (micro crack) หรือจุดบกพร่องบนชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ มาจากสาเหตุหลักๆ สามประการ ประการแรก รอยแตกเกิดขึ้นได้นับตั้งแต่กระบวนการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ โดยมีสาเหตุมาจากผิวแม่พิมพ์ที่ไม่ดีในกระบวนการตัดเนื้อโลหะ รอยประสานบนผิวชิ้นงานซึ่งเกิดจากการที่พอลิเมอร์ไหลมาบรรจบกันภายในแม่พิมพ์ และสิ่งเจือปนบนผิวแม่พิมพ์ในขณะขึ้นรูป เป็นต้น ประการที่สอง รอยแตกเกิดจากการเสื่อมสภาพของยางเนื่องจากสภาพแวดล้อม ตัวอย่างเช่น การเสื่อมสภาพเนื่องจากรังสีอัลตราไวโอเลต (Mars and Fatemi, 2002) เป็นต้น ประการสุดท้าย รอยแตกเกิดขึ้นเมื่อชิ้นงานรับภาระแบบสลับไประยะหนึ่ง ทำให้เกิดการแยกตัวระหว่างยางและสารแต่งเติม ซึ่งมีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ความหนาแน่นพันธะในกระบวนการดงรูป (Hamed, 1983) ชนิดของเขม่าดำ (Mars and Fatemi, 2002; Kim and Jeong, 2004; Kim and Jeong,

2005; Chou *et al.*, 2006) และการกระจายตัวของส่วนผสมต่างๆ ในยางคอมพาวนด์ (Mars and Fatami, 2004) เป็นต้น

ปัจจัยสำคัญที่เป็นตัวกำหนดปริมาณสัดส่วนต่างๆ ของสารแต่งเติม คือ ลักษณะการใช้งาน โดยเฉพาะของชิ้นงานนั้นๆ ซึ่งเกิดขึ้นจากความต้องการของลูกค้าหรือผู้ใช้ผลิตภัณฑ์ยาง ทำให้สูตรยางมีความหลากหลายมาก เพราะฉะนั้นการกำหนดอายุความล้าได้นั้น ต้องอาศัยข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแต่ละผลิตภัณฑ์หรือของยางแต่ละสูตร ซึ่งอาจไม่มีความเหมาะสมกับการใช้เครื่องทดสอบที่มีราคาสูงและค่อนข้างสิ้นเปลืองเวลาในการทดสอบ ในอุตสาหกรรมจริงจึงไม่นิยมทดสอบเพื่อหาอายุความล้าโดยเครื่องมือและค่าทดสอบที่มีราคาสูง และโดยอุตสาหกรรมยางของประเทศไทย พบว่า ส่วนใหญ่นิยมทดสอบด้วยเครื่อง De Mattia flexing และเครื่อง Fatigue tester ดังแสดงในภาพที่ 2 และ 3 ซึ่งสามารถหาอายุความล้าของชิ้นงานยางได้ดีในระดับหนึ่ง โดยต้องเตรียมชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 2 เครื่อง De Mattia flexing (Wu *et al.*, 2006)



ภาพที่ 3 เครื่อง Fatigue tester



(a)



(b)

ภาพที่ 4 ชิ้นงานทดสอบอายุความล้า (a) ชิ้นงานทดสอบอายุความล้าด้วยเครื่อง De Mattia flexing (b) ชิ้นงานทดสอบอายุความล้าด้วยเครื่อง Fatigue tester

3. วิธีการ

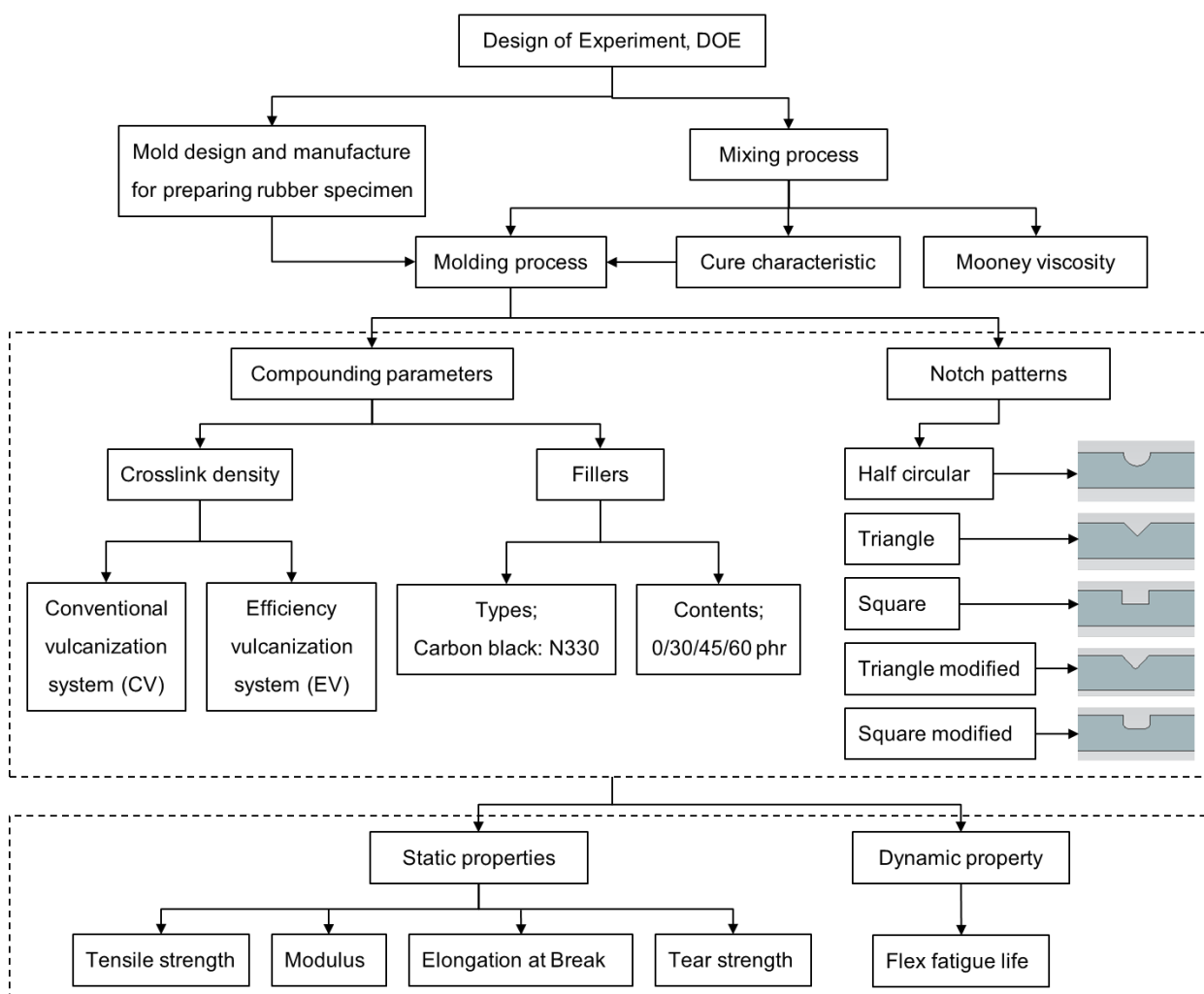
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์

- ยางธรรมชาติ (natural rubber) STR5L ของบริษัท ไทยรับเบอร์ลาเท็กซ์คอร์ปอเรชั่น (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)
- ซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide, ZnO) เกรดการค้า
- กรดสเตียริก (stearic acid) เกรดการค้า
- เขม่าดำ (carbon black) เกรด N330 ของห้างหุ้นส่วนจำกัด กิจไพบูลย์เคมี
- น้ำมันอะโรมาติก (aromatic oil)
- ไสโคลเฮกซิลเบนโซไทอะซิลซัลฟีนามายด์ (N-Cyclohexyl-2-Benzothiazyl- Sulfenamide, CBS) เกรดการค้า
- กำมะถัน (sulphur) เกรดการค้า
- เครื่องบดผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง (two roll mill) ขนาด ขนาด 8 x 20 นิ้ว นิ้ว ของ Kodair Seisakusho รุ่น R11-3FF
- เครื่องทดสอบความหนืดมูนนีของยาง (Mooney viscometer) ของ TECHPRO-visTECH รุ่น 123103
- เครื่องทดสอบหาเวลาในการคงรูปของยาง (Moving Die Rheometer, MDR) ของ TECHPRO-rheoTECH รุ่น 121105
- เครื่องอัดขึ้นรูปยาง (rubber compression machine) ของ GOTECH รุ่น GT-7014
- แม่พิมพ์อัดทดสอบอายุความล้ายาง
- แม่พิมพ์อัดแผ่นทดสอบความต้านทานแรงดึง
- เครื่องชั่งน้ำหนักของ METTER – TOLEDO รุ่น PM 30000-Kn
- เครื่องตัดยางระบบไฮดรอลิก ของ Daina รุ่น HD-30
- เครื่องตัดตัวอย่างยางแบบใช้กำลังลม (compress air sample cutting)
- เครื่องวัดความหนาขึ้นงานทดสอบ
- เครื่องมือทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง ของ Instron รุ่น 1011
- เครื่องมือทดสอบอายุความล้า (De Mattia flexing machine) ของสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร

3.2 วิธีการทดลอง

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ดังแสดงในภาพที่ 5 เริ่มต้นด้วยการออกแบบแผนการทดลองเพื่อศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งกำหนดส่วนผสมยางคอมพาวนด์ที่ใช้ในการทดลอง แล้วจึงบดผสมยาง

คอมพาวนด์ที่กำหนด ซึ่งยางคอมพาวนด์ที่บดผสมแล้วถูกนำไปทดสอบค่าความหนืดมูนี (Mooney viscosity) และสมบัติการคงรูป (cure characteristic) ในขณะเดียวกันได้ออกแบบและจัดสร้างแม่พิมพ์เพื่อเตรียมชิ้นงานทดสอบ จากนั้นนำยางคอมพาวนด์มาอัดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ที่จัดสร้างไว้ แล้วนำชิ้นงานยางที่ได้ไปทดสอบสมบัติเชิงกลและอายุความล้าต่อไป



ภาพที่ 5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.2.1 การบดผสมยางคอมพาวนด์

ตารางที่ 1 แสดงส่วนผสมยางคอมพาวนด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยยางธรรมชาติเกรด STR5L ถูกนำมาบดผสมด้วยเครื่องบดผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง (two-roll mill) ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 3 นาที เพื่อลดน้ำหนักโมเลกุล แล้วผสมสารกระตุ้นปฏิกิริยาการคงรูป ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ และกรดสเตียริก บดผสมเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นผสมเขม่าดำ เกรด N330 ร่วมกับน้ำมันอะโรมาติก โดยแบ่งใส่ 3 ครั้ง ครั้ง

ละ 5 นาที แล้วผสมสารตัวเร่งปฏิกิริยาจนครบเป็นเวลา 2 นาที ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการผสมบดผสมก้ามะถันเป็นเวลา 3 นาที และนำยางคอมพาวนด์ไปทดสอบความหนืดมูนนี้ และสมบัติการคงรูป ตามมาตรฐาน ASTM D1646 และ ASTM D5289 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 สูตรยางคอมพาวนด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

Ingredients	Content (phr*)		
	Non-filled (CV)	Conventional	Efficient
		Vulcanization system (CV)	Vulcanization system (EV)
NR (STR5L)	100	100	100
ZnO	4	4	4
Stearic Acid	2	2	2
Carbon Black	-	30/45/60	60
Sulphur	2.4	2.4	0.8
CBS (N330)	0.8	0.8	2.4
Aromatic Oil	-	2/3/4	4
		A/S** = 3.00	A/S = 0.33

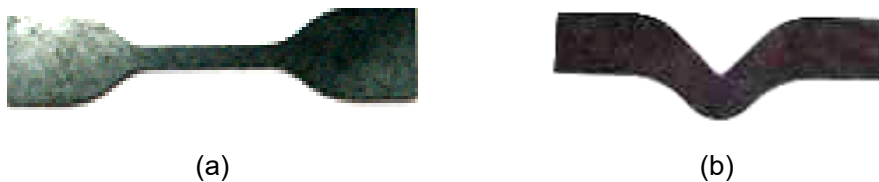
*Part per hundred of rubber by weight

** Accelerator/Sulphur

3.2.2 การทดสอบสมบัติเชิงกลแบบสถิตย์

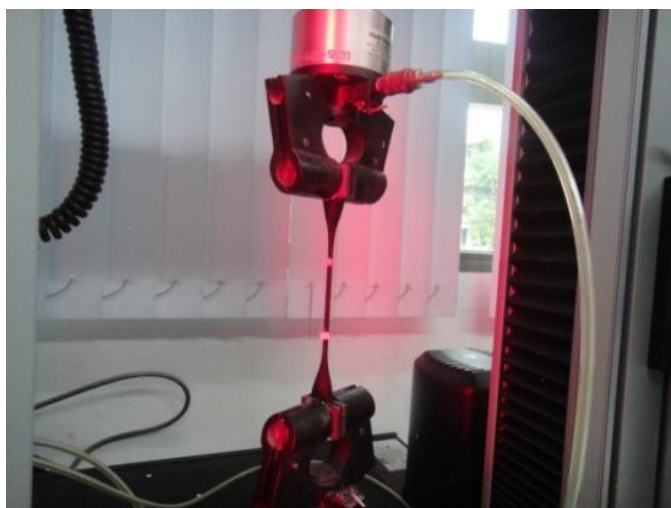
การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (*tensile strength*) ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100% (100% modulus) และค่าระยะยืด ณ จุดขาด (*elongation at break*)

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง เริ่มจากนำยางคอมพาวนด์มาอัดขึ้นรูปชิ้นงาน ซึ่งชิ้นงานยาวที่ผ่านการอัดขึ้นรูปถูกนำมาตัดให้มีลักษณะเป็นดัมเบลล์ (dumbbell) ตามมาตรฐาน ASTM D412 ดังแสดงในภาพที่ 6(a) จากนั้นวัดความหนาของชิ้นงานทั้งหมด 3 ตำแหน่ง เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการทดสอบสมบัติแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ดังแสดงในภาพที่ 7 ด้วยความเร็ว 500 mm/min. จนกระทั่งชิ้นงานขาด วัดค่าความต้านทานต่อแรงดึง (*tensile strength*) ระยะยืด ณ จุดขาด (*elongation at break*) และค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100 เปอร์เซ็นต์ (100% modulus)



ภาพที่ 6 ชิ้นงานทดสอบ

(a) ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (b) ทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด



ภาพที่ 7 การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง

การทดสอบสมบัติความต้านทานการฉีกขาด (tear strength)

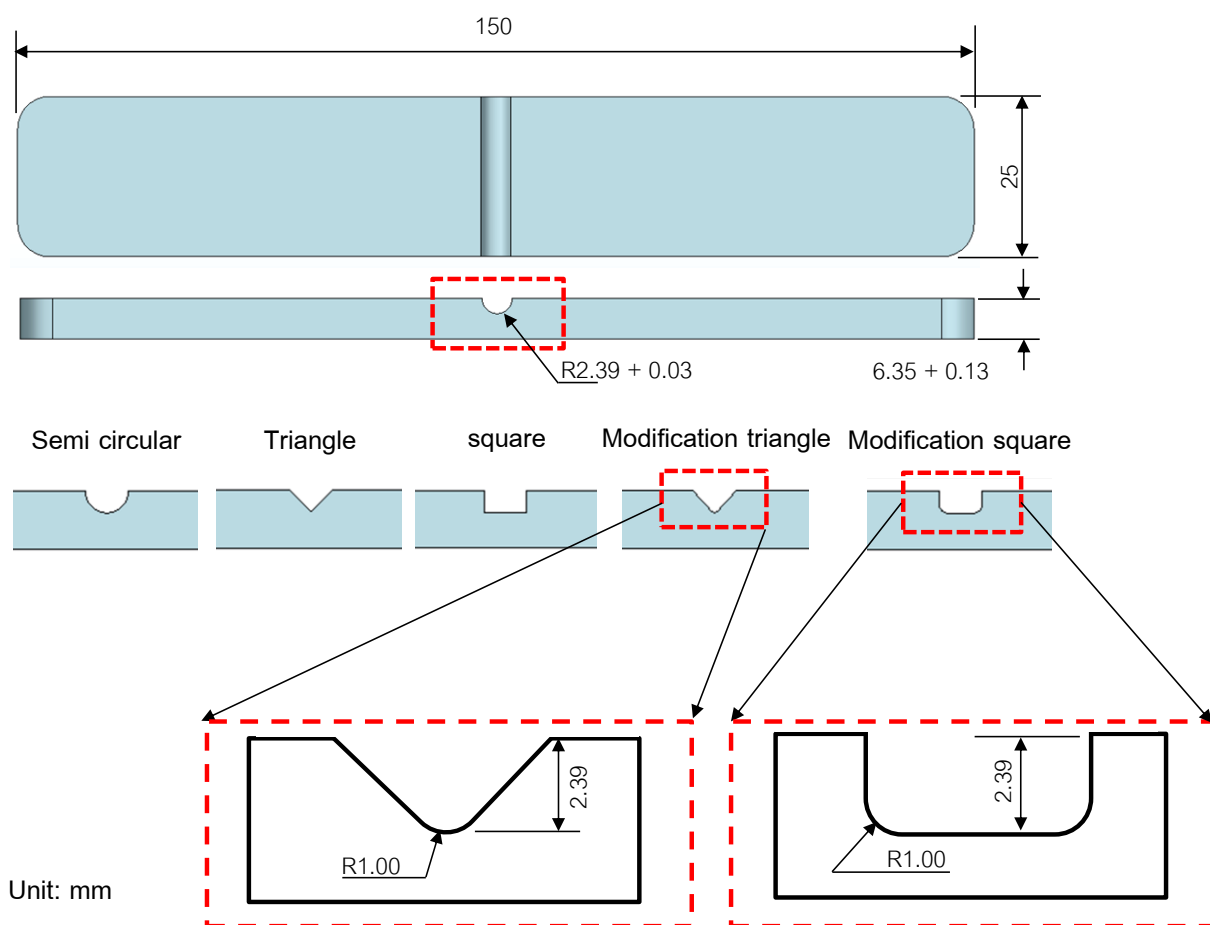
ชิ้นงานยางที่ผ่านการอัดขึ้นรูป ถูกนำมาตัดให้มีรูปร่างตามมาตรฐาน ASTM D624 (Die C) ดังแสดงในภาพที่ 6(b) โดยตัดชิ้นงานตัวอย่างละ 5 ชิ้น จากนั้นนำชิ้นงานไปวัดความหนา แล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการฉีกขาด ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ที่มี Load Cell 500 N และใช้ความเร็วในการดึงชิ้นงานเท่ากับ 500 mm/min. เช่นเดียวกับการทดสอบสมบัติแรงดึง

การทดสอบความแข็งของยาง (hardness)

การทดสอบความแข็งของยางใช้เครื่อง Shore Durometer ตามมาตรฐาน ASTM D2240 แบบ Shore A โดยการนำชิ้นงานที่มีความหนาประมาณ 6 mm กดหัวกดลงไปที่ชิ้นงาน เป็นเวลา 1 วินาที จากนั้นอ่านค่าที่ได้จากเครื่อง ทำซ้ำทั้งหมด 5 ครั้ง โดยแต่ละครั้งให้กดที่ตำแหน่งต่างกัน แล้วบันทึกค่าทั้งหมดลงไป หาค่ามัธยฐาน (Median) ทั้งนี้ในแต่ละครั้งของการกดต้องปรับค่าให้เท่ากับศูนย์

3.2.3 การทดสอบอายุความล้าของชิ้นงานยาง

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและจัดสร้างแม่พิมพ์อัดขึ้นรูป สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานยางเพื่อทดสอบอายุความล้า ดังแสดงในภาพที่ 8 โดยแม่พิมพ์ที่จัดสร้างขึ้นสามารถปรับเปลี่ยนอินเลิร์ทเพื่อสร้างร่องบาก (notch pattern) บนชิ้นงานลักษณะต่างๆ ได้แก่ ร่องบากครึ่งวงกลม ร่องบากสี่เหลี่ยม ร่องบากสามเหลี่ยม และร่องบากที่ปรับปรุง โดยการเพิ่มส่วนโค้งรัศมี 1 mm ที่บริเวณขอบมุมของร่องบาก



ภาพที่ 8 ชิ้นงานทดสอบอายุความล้า

นำยางคอมพาวนด์ที่บดผสมไว้ซึ่งน้ำหนักให้ได้ 60 กรัม จากนั้นนำไปวางในแม่พิมพ์อัดขึ้นรูป อัดขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 150°C โดยใช้แรงดันแม่พิมพ์ 20 MPa จนกระทั่งได้ตามระยะเวลาคงรูปที่ 90% (Tc90) แล้วจึงนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ ซึ่งได้ชิ้นงานทดสอบอายุความล้า ดังแสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ชิ้นงานทดสอบอายุความล้าที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์

จากนั้นนำชิ้นงานยางที่ขึ้นรูปแล้วไปทดสอบทดสอบอายุความล้า (flex-fatigue life) โดยใช้เครื่อง De Mattia Flexing ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากสถาบันวิจัย กรมวิชาการเกษตร ดังแสดงในภาพที่ 10 ตามมาตรฐาน ASTM D430 ที่อัตราเร็วในการทดสอบเท่ากับ 300 ± 10 rpm.

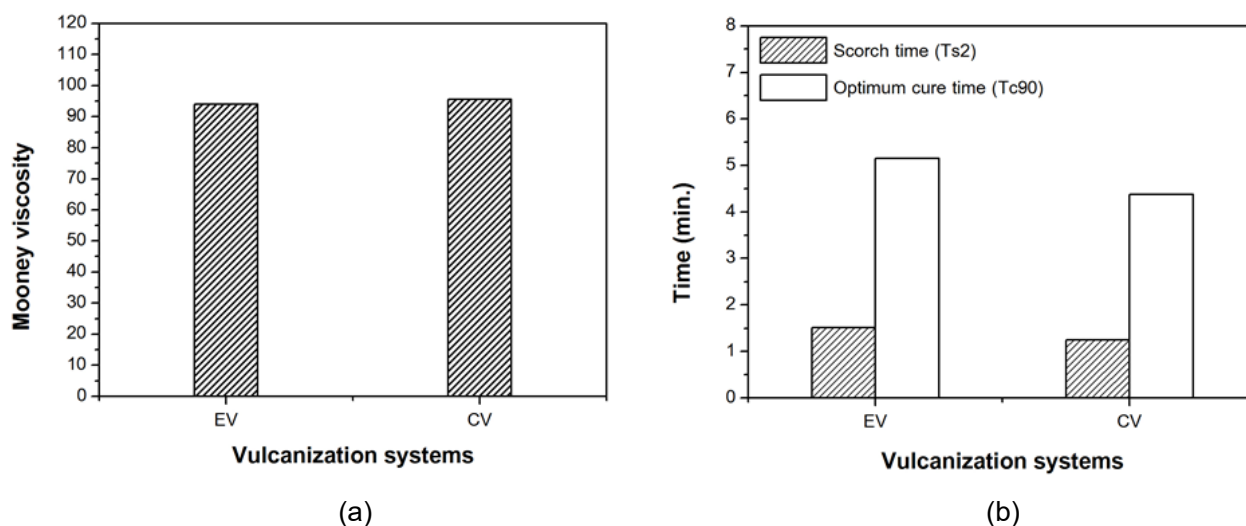


ภาพที่ 10 เครื่อง De Mattia flexing

4. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

4.1 อิทธิพลของระบบการคงรูปที่มีต่อความหนืดมูนี่และสมบัติการคงรูปของยางคอมพาวนด์

เมื่อพิจารณาค่าความหนืดมูนี่ของยางคอมพาวนด์ที่ผสมเขม่าดำ 60 phr ซึ่งใช้ระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพ (EV system) และระบบการคงรูปแบบดั้งเดิม (CV system) ดังแสดงในภาพที่ 11(a) พบว่า มีค่าความหนืดมูนี่ไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากยางคอมพาวนด์ทั้งสองสูตรใช้เวลาในการบดผสมเท่ากัน ดังนั้นการขาดกันของสายโซ่โมเลกุลหรือน้ำหนักโมเลกุลที่ลดลงมีค่าใกล้เคียงกัน ภาพที่ 11(b) แสดงเวลาเริ่มคงรูป (scorch time, T_{s2}) และเวลาคงรูปของยางคอมพาวนด์ ซึ่งพบว่า มีเวลาเริ่มคงรูปที่ไม่แตกต่างกัน ในขณะที่เวลาคงรูปของยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ EV ใช้ระยะเวลาที่นานกว่ายางที่คงรูปด้วยระบบ CV ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากยางที่คงรูปด้วยระบบ EV ซึ่งใช้สารตัวเร่ง ชนิด CBS ในปริมาณสูง ซึ่งเป็นสารตัวเร่งในกลุ่มที่ต้องการระยะเวลาในการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวาง ที่เรียกว่า “Delayed action” (พงษ์ธร, 2550) ส่งผลให้ต้องใช้ระยะเวลาในการคงรูปเพิ่มมากขึ้น



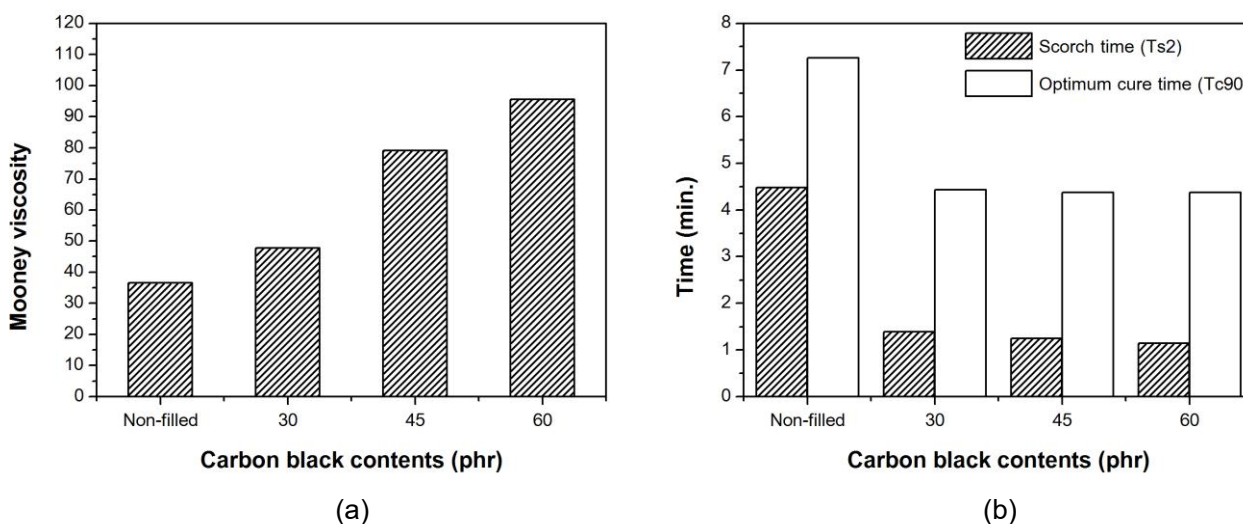
ภาพที่ 11 สมบัติของยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ EV และ CV

(a) ความหนืดมูนี่ (b) เวลาเริ่มคงรูปและเวลาคงรูป

4.2 อิทธิพลของปริมาณเขม่าดำที่มีต่อความหนืดมูนี่และสมบัติการคงรูปของยางคอมพาวนด์

เมื่อพิจารณาค่าความหนืดมูนี่ของยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมเขม่าดำและผสมเขม่าดำในปริมาณ 30, 45 และ 60 phr พบว่า ค่าความหนืดมูนี่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อบดผสมกับเขม่าดำในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 12(a) เนื่องจากเขม่าดำมีอนุภาคขนาดเล็กและมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงจึงเกิดอันตรกิริยา (Interaction) กับเนื้อยางได้มาก เมื่อบดผสมในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางเคลื่อนที่ได้ยากยิ่งขึ้น

และนอกจากนี้ยังมีสาเหตุมาจากเขม่าดำซึ่งมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากเกิดความร้อนสะสม (heat build up) ในระหว่างการบดผสมด้วยเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง ส่งผลทำให้ยางคอมพาวนด์พร้อมที่จะเกิดปฏิกิริยา (Rattanasom and Prasertsri, 2009) ดังนั้นเมื่อนำไปทดสอบความหนืดที่อุณหภูมิ 100°C อาจทำให้เกิดการเชื่อมขวางบางส่วน ซึ่งทำให้ยางมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาเวลาเริ่มคงรูปและเวลาคงรูปของยางคอมพาวนด์ระหว่างยางที่ไม่ผสมเขม่าดำกับยางที่ผสมเขม่าดำในปริมาณต่างๆ พบว่ายางคอมพาวนด์ของยางที่ผสมเขม่าดำมีเวลาเริ่มคงรูปและเวลาคงรูปที่ต่ำกว่ายางที่ไม่ผสมเขม่าดำ และมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณเขม่าดำเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 12(b) เนื่องจากเขม่าดำมีค่าการนำความร้อนสูง รวมถึงสามารถบดผสมกับเนื้อยางได้ดี ส่งผลให้ความร้อนแพร่กระจาย (thermal distribution) เข้าสู่เนื้อยางได้ดี อีกทั้งที่ผิวของเขม่าดำมีหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์บางกลุ่ม ได้แก่ ฟีนอลิก (phenolic) ไฮดรอกซิล (hydroxyl) ควิโนน (quinone) คาร์บอกซิล (carboxyl) และแล็กโตน (lactone) ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีกับโมเลกุลยางได้ดี (Hofmann, 1989; Rattanasom and Prasertsri, 2008) นอกจากนี้เขม่าดำที่ใช้เป็นประเภท Furnace Black ซึ่งมีความเป็นด่าง (alkalinity) และพื้นผิวของเขม่าดำมีออกซิเจนในปริมาณต่ำ (พงษ์ธร, 2550; Rattanasom and Prasertsri, 2009) จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น ส่งผลให้ยางที่ผสมเขม่าดำเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางได้อย่างรวดเร็ว

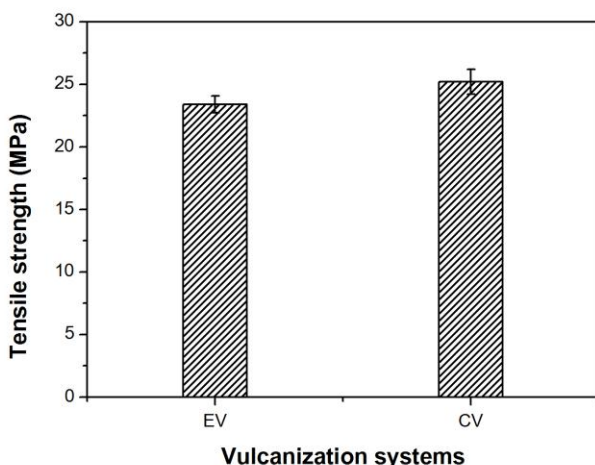


ภาพที่ 12 สมบัติของยางคอมพาวนด์ที่ผสมเขม่าดำในปริมาณต่างๆ กัน
(a) ความหนืดมูนีนี (b) เวลาเริ่มคงรูปและเวลาคงรูป

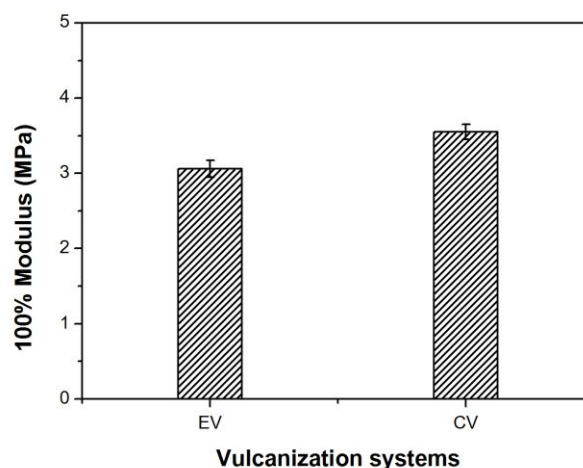
4.3 อิทธิพลของระบบคงรูปที่มีต่อสมบัติแรงดึงของชิ้นงานยาง

เมื่อพิจารณาค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100% ของชิ้นงานยางผสมเขม่าดำปริมาณ 60 phr ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ EV และ CV ดังแสดงในภาพที่ 13(a-c) พบว่า ยางที่คงรูปแบบ

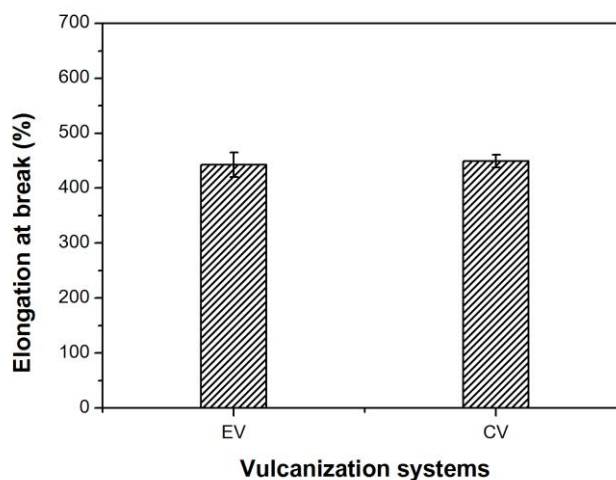
CV มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่ามอดูลัสที่สูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญแบบ EV ในขณะที่ระยะยืด ณ จุดขาด มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากพันธะเชื่อมขวางของระบบการคงรูปแบบ CV เป็นแบบ Poly-sulphidic ซึ่งมีช่องว่างระหว่างสายโซ่โมเลกุล (free volume) ที่มากกว่า สายโซ่โมเลกุลจึงเคลื่อนตัวและยืดตัว (chain flexibility) ได้ดีกว่า ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดี แต่ในกรณีของยางที่คงรูปแบบด้วยระบบ EV มีพันธะเชื่อมขวางแบบ Mono หรือ Di-sulphidic ซึ่งมีช่องว่างระหว่างสายโซ่โมเลกุลที่น้อยกว่า จึงมีสมบัติเชิงกลที่ด้อยกว่า (Rattanasom *et al.*, 2005)



(a)



(b)



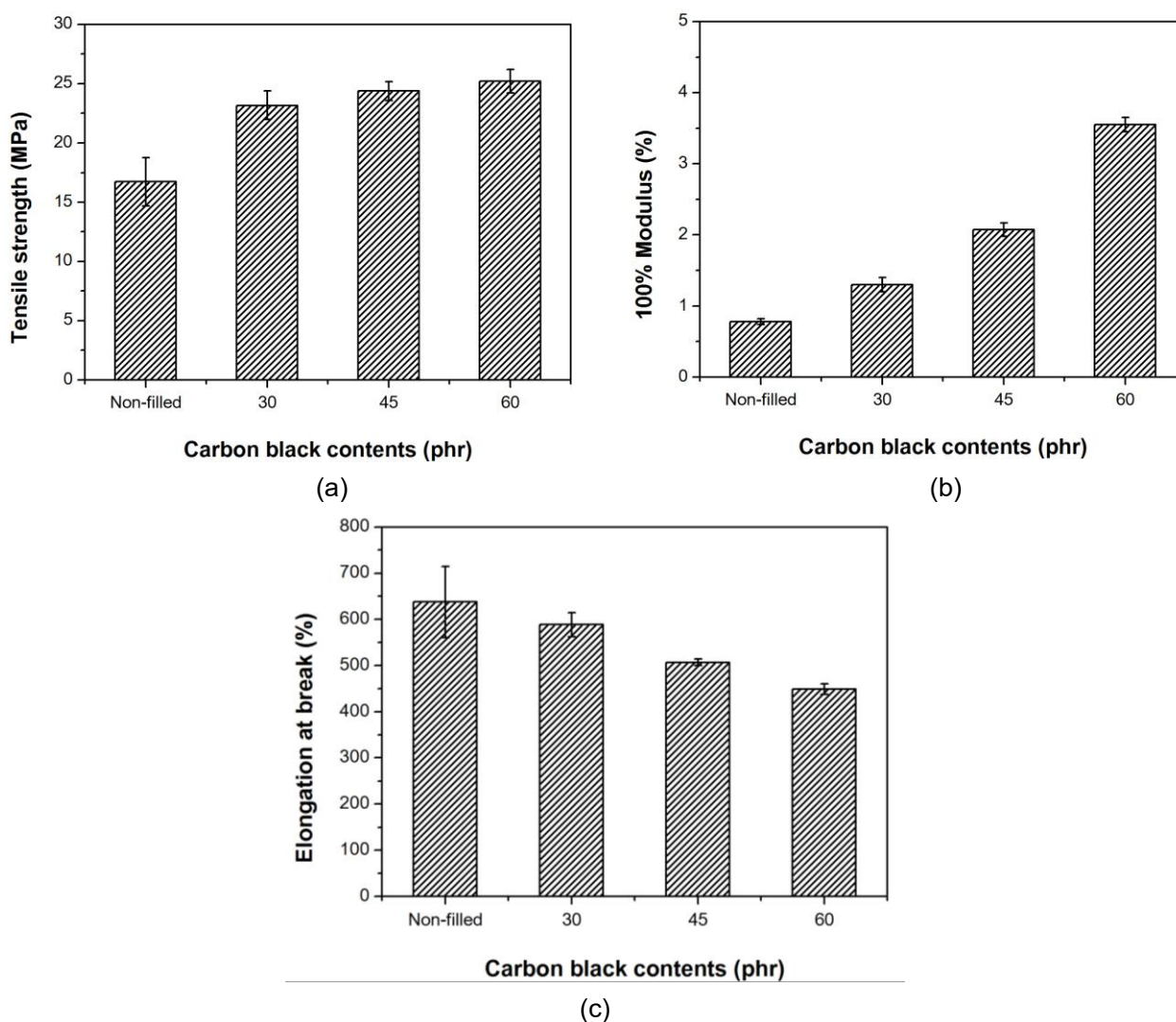
(c)

ภาพที่ 13 ผลการทดสอบสมบัติแรงดึงของชิ้นงานยางที่คงรูปแบบด้วยระบบ EV และ CV

(a) ความต้านทานต่อแรงดึง (b) มอดูลัสที่ระยะยืด 100% (c) ระยะยืด ณ จุดขาด

4.4 อิทธิพลของปริมาณเขม่าดำที่มีต่อสมบัติแรงดึงของชิ้นงานยาง

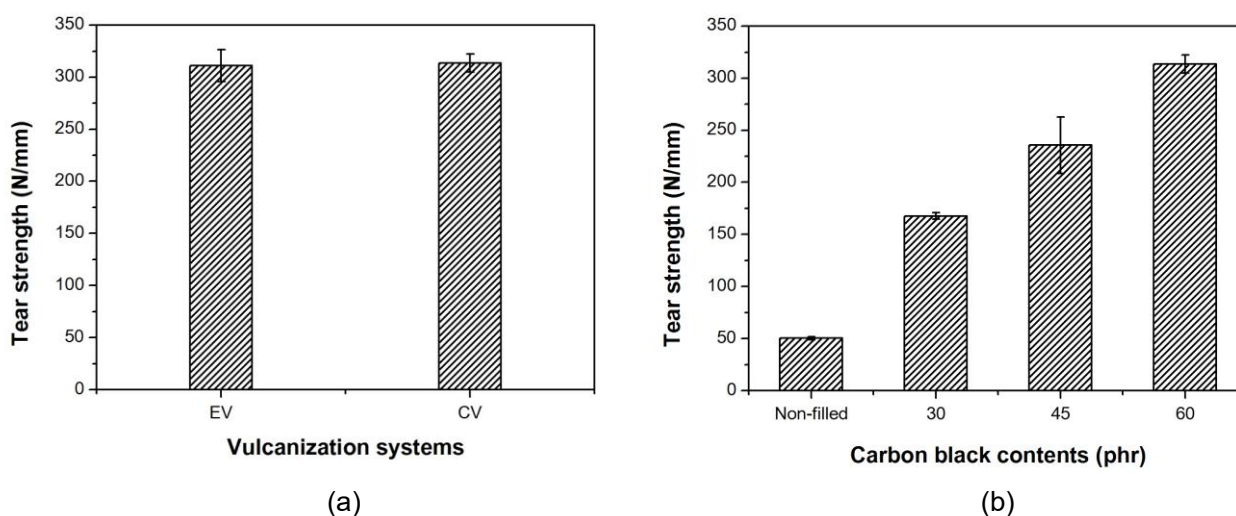
เมื่อพิจารณาผลการทดสอบสมบัติแรงดึงของชิ้นงานยางที่ไม่ผสมสารตัวเติม (non-filled rubber) และชิ้นงานยางที่ผสมเขม่าดำในปริมาณ 30 45 และ 60 phr ซึ่งใช้ระบบการคงรูปแบบ CV ดังแสดงในภาพที่ 14(a-c) พบว่า อิทธิพลของการเพิ่มปริมาณเขม่าดำ ส่งผลให้ชิ้นงานยางมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100% เพิ่มขึ้น (Donnet and Voet, 1976; Gent, 2001; Harris and Piersol, 2002) ในขณะที่ระยะยืด ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างยางกับเขม่าดำทั้งทางเคมีและทางกลที่กระจายตัวอยู่ในชิ้นงานยาง โดยเขม่าดำที่มีอนุภาคขนาดเล็ก (มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง) จะเกิดอันตรกิริยาเพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อปริมาณการผสมเพิ่มขึ้นทำให้ระยะห่างระหว่างกลุ่มก้อนของเขม่าดำลดลง ทำให้ความสามารถในการเคลื่อนตัวของสายโซ่โพลิเมอร์ลดลง (Chuayujit, 2002; Niedermeier *et al.*, 2002)



ภาพที่ 14 ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานยางผสมเขม่าดำในปริมาณต่างๆ กัน
(a) ความต้านทานต่อแรงดึง (b) มอดูลัสที่ระยะยืด 100% (c) ระยะยืด ณ จุดขาด

4.5 อิทธิพลของระบบคงรูปและปริมาณเขม่าดำที่มีต่อความต้านทานการฉีกขาดของชั้นงานยาง

จากภาพที่ 15(a) เมื่อพิจารณาอิทธิพลของระบบการคงรูปในยางผสมเขม่าดำปริมาณ 60 phr แสดงให้เห็นว่า ชั้นงานยางที่คงรูปแบบ EV และแบบ CV มีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งมีสาเหตุมาจากอิทธิพลของเขม่าดำที่ช่วยในการเสริมแรงจึงทำให้ค่าที่ได้ไม่แตกต่างกันมาก แต่หากพิจารณาปริมาณเขม่าดำที่บดผสมในยางคอมพาวนด์ ดังแสดงในภาพที่ 15(b) พบว่า ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อปริมาณการบดผสมเขม่าดำเพิ่มขึ้น ซึ่งมีสาเหตุมาจากประสิทธิภาพการเสริมแรงของเขม่าดำที่เพิ่มขึ้น โดยผลที่ได้จากการทดสอบนี้สอดคล้องกับผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง

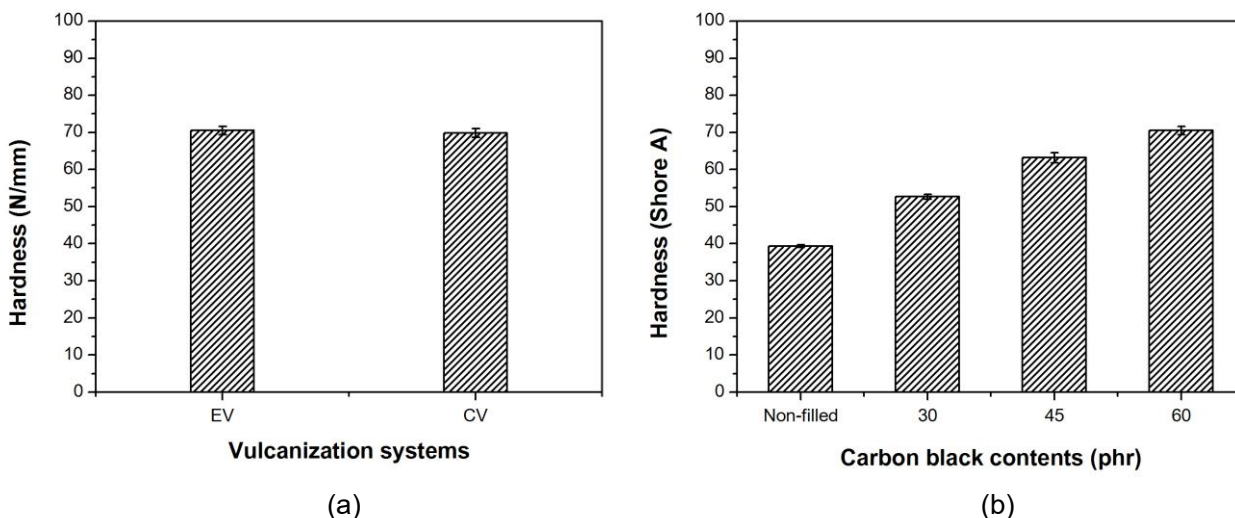


ภาพที่ 15 ความต้านทานการฉีกขาดของชั้นงานยาง

(a) ชั้นงานยางที่คงรูปแบบ EV และ CV (b) ชั้นงานยางผสมเขม่าดำในปริมาณต่างๆ กัน

4.6 อิทธิพลของระบบคงรูปและปริมาณเขม่าดำที่ส่งผลต่อความแข็งของยาง

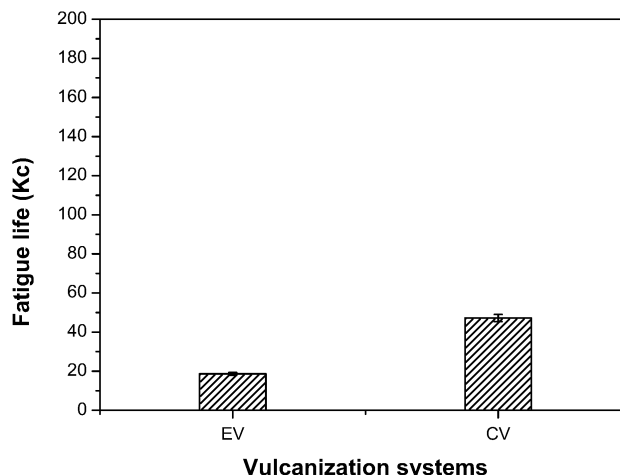
เมื่อพิจารณาผลการทดสอบความแข็งของยางผสมเขม่าดำ พบว่า ค่าความแข็งระหว่างการคงรูปด้วยระบบ EV และ CV มีค่าไม่แตกต่างกันเนื่องจากการผสมเขม่าดำในปริมาณเท่ากันทำให้มีความแข็งใกล้เคียงกัน และค่าความแข็งเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำ เนื่องจากเขม่าดำมีความแข็ง (rigid) มากกว่าเนื้อยาง เมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำทำให้กลุ่มก้อนของเขม่าดำที่มีความแข็งสูงเข้ามาใกล้ชิดกัน (Donnet and Voet, 1976; Harris and Piersol, 2002) ส่งผลให้ยางมีความแข็งเพิ่มสูงขึ้น



ภาพที่ 16 ค่าความแข็ง (a) ชี้นงานยางที่คงรูปแบบ EV และ CV
(b) ชี้นงานยางผสมเขม่าดำในปริมาณต่างๆ กัน

4.7 อิทธิพลของระบบคงรูปที่มีต่ออายุความล้าของชี้นงานยาง

ผลการศึกษาอายุความล้าของชี้นงานยางที่ผสมเขม่าดำในปริมาณ 60 phr ซึ่งคงรูปด้วยระบบ EV และ CV โดยใช้รูปแบบร่องบากแบบครึ่งวงกลม ตามมาตรฐาน ASTM D430 ดังแสดงในภาพที่ 17 พบว่า ชี้นงานยางที่คงรูปด้วยระบบ CV มีอายุความล้าที่สูงกว่า ยางที่คงรูปด้วยระบบ EV ประมาณ 2 เท่า ซึ่งมีสาเหตุมาจากในสถานะที่มีความเค้นสูง พันธะเชื่อมขวางของยางที่คงรูปด้วยระบบ CV ซึ่งเป็นแบบ Poly-sulphidic (S-S bond) และมีความแข็งแรงต่ำกว่าสายโซ่หลัก (C-C bond) เกิดการขาดที่บริเวณปลายรอยแตก (crack tip) จึงคายพลังงานหรือการกระจายตัวของความเค้น ส่งผลให้ชี้นงานมีอายุความล้าเพิ่มขึ้น (Lake and Thomas, 1988) หรืออาจมีสาเหตุมาจากโครงสร้างของพันธะเชื่อมขวางแบบ Poly-sulphidic มีโอกาสเกิดการแตกหักเมื่อมีการยืดตัวได้ดีกว่าพันธะเชื่อมขวางแบบ Mono-sulphidic หรือ Di-sulphidic (Brydson, 1978)

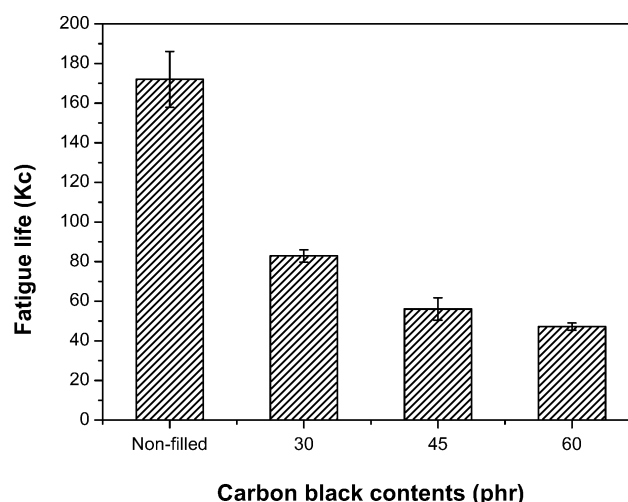


ภาพที่ 17 อายุความล้าของยางชั้นงานยางผสมเขม่าดำ 60 phr ที่คงรูปแบบ EV และ CV

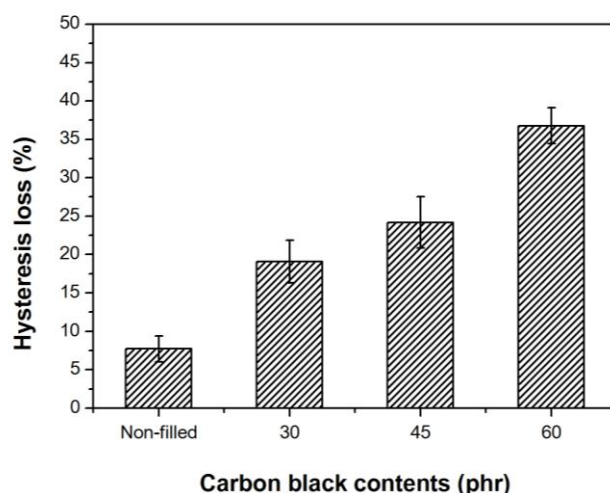
4.8 อิทธิพลของปริมาณเขม่าดำที่มีต่ออายุความล้าของชั้นงานยาง

ผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณเขม่าดำที่มีผลต่ออายุความล้า ดังแสดงในภาพที่ 18 พบว่า ยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารตัวเติมมีอายุความล้าที่สูงกว่ายางที่ผสมเขม่าดำ เนื่องจากชั้นงานยางที่ไม่ผสมสารตัวเติม สามารถกระจายพลังงานทางกลได้ดี (mechanical energy dissipation) หรือมีค่า Hysteresis ต่ำ (ดังแสดงในภาพที่ 19) และนอกจากนี้ยังมีสาเหตุมาจากรอยแตกขนาดเล็ก (micro crack) ภายในยางนั้นเกิดขึ้นที่บริเวณสัมผัสระหว่างยางและสารตัวเติม (Mars and Fatemi, 2002) แต่ในกรณีชั้นงานยางที่ไม่ผสมสารตัวเติมนั้น ชั้นงานยางไม่ได้เกิดความเสียหายจากสาเหตุดังกล่าว แต่ความเสียหายเกิดขึ้นจากความเค้นหนาแน่นที่บริเวณขอบมุมของชั้นงาน ซึ่งต้องใช้ระยะเวลาที่นานกว่าในการที่จะทำให้ชั้นงานเกิดความเสียหาย และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของการเพิ่มปริมาณเขม่าดำ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการเพิ่มปริมาณเขม่าดำทำให้ชั้นงานมีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด ความต้านทานต่อแรงดึง ค่ามอดูลัส รวมถึงทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของค่ามอดูลัสและค่าความแข็ง ส่งผลให้ชั้นงานมีอายุความล้าที่สั้นลง (Donnet and Voet, 1976; Gent, 2001; Mark *et al.*, 2005; Rattanasom, 2009) เนื่องจากการทดสอบอายุความล้าแบบหักงอ เป็นการทดสอบแบบควบคุมระยะยืด (displacement control) ชั้นงานยางที่มีค่ามอดูลัสหรือค่าความแข็งสูง เกิดการสะสมพลังงานความเครียด (strain energy density) ที่สูงกว่า ดังแสดงในภาพที่ 20 ทำให้มีโอกาสเกิดความเสียหายเนื่องจากความล้าได้รวดเร็วกว่า และนอกจากนี้ชั้นงานยางที่ผสมเขม่าดำเพิ่มขึ้น มีค่า Hysteresis เพิ่มขึ้น (ดังแสดงในภาพที่ 19) ประกอบกับเขม่าดำมีค่าการนำความร้อนที่ดี ส่งผลให้พลังงานที่ชั้นงานยางเก็บสะสมไว้ในขณะที่รับภาระแบบสลับ เปลี่ยนไปเป็นความร้อน ชั้นงานจึงเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน (thermal degradation) ได้ และยังมีสาเหตุมาจากค่าความแข็ง และค่ามอดูลัสที่เพิ่มขึ้นทำให้ปลายรอยแตก (crack tip) มีลักษณะที่แหลมคมกว่า จึงเกิดความเค้นหนาแน่นสูง

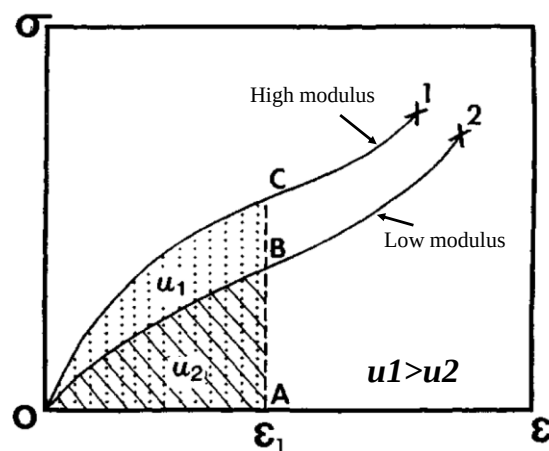
(stress concentration) และรอยแตกขยายตัวได้รวดเร็ว ถึงแม้ว่าชิ้นงานยางที่ผสมเขม่าดำเพิ่มขึ้นมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานการฉีกขาดเพิ่มขึ้นก็ตาม



ภาพที่ 18 อายุความล้าของชิ้นงานยางที่ผสมเขม่าดำในปริมาณต่างๆ กัน



ภาพที่ 19 ค่า hysteresis ของยางที่ผสมเขม่าดำ

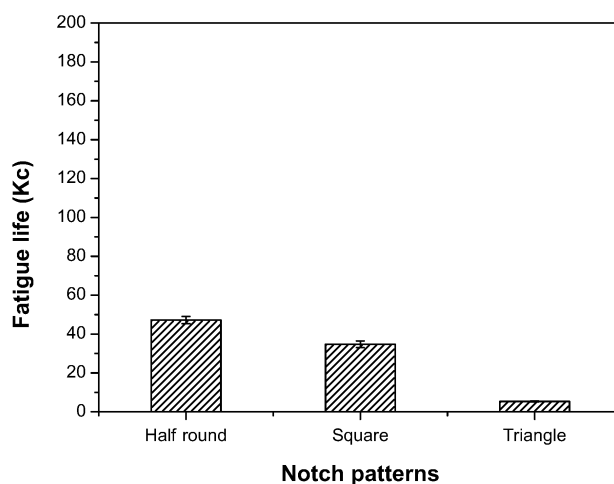


ภาพที่ 20 พลังงานความเครียดของยางที่ทดสอบแบบควบคุมระยะยืด (Gent, 2001)

4.9 อิทธิพลของรูปแบบร่องบากบนชิ้นงานที่มีต่ออายุความล้าของชิ้นงานยาง

จากผลการศึกษาอิทธิพลของรูปแบบร่องบากบนชิ้นงานที่มีผลต่ออายุความล้า ดังแสดงในภาพที่ 21 พบว่า ร่องบากครึ่งวงกลมมีอายุความล้ามากกว่าร่องบากสี่เหลี่ยมและร่องบากสามเหลี่ยม เนื่องจากความเค้นหนาแน่น (stress concentration) ที่เกิดขึ้นของร่องบากครึ่งวงกลมมีค่าต่ำที่สุด แต่หากพิจารณาในกรณีของร่องบากสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยมซึ่งมีขอบมุมที่แหลมคม (sharply notch) เช่นเดียวกัน พบว่า ร่องบาก

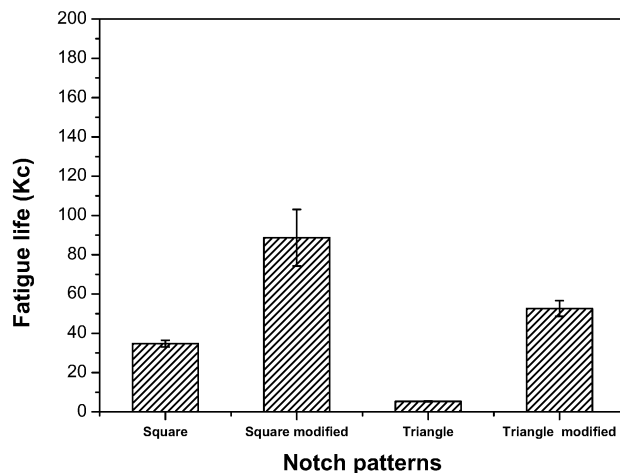
สี่เหลี่ยมมีอายุความล้าที่มากกว่าร่องบากสามเหลี่ยม โดยมีสาเหตุมาจากร่องบากสี่เหลี่ยมเกิดความเค้นหนาแน่นที่ต่ำกว่า เนื่องจากมุมภายในร่องบากมีขนาดใหญ่กว่าร่องบากสามเหลี่ยม อีกทั้งการทดสอบอายุความล้าแบบหักงอ (flex fatigue life) บริเวณส่วนกลางชิ้นงานที่เป็นร่องบากมีการยึดตัวสูง โดยในกรณีของร่องบากสี่เหลี่ยมนั้นที่บริเวณดังกล่าวมีพื้นที่ในการกระจายแรงได้มากกว่าแบบร่องบากแบบสามเหลี่ยม



ภาพที่ 21 อายุความล้าของชิ้นงานยางผสมเขม่าดำซึ่งใช้รูปแบบร่องบากแตกต่างกัน

4.10 อิทธิพลของรูปแบบร่องบากที่ได้รับการปรับปรุงร่องที่มีต่ออายุความล้าของชิ้นงานยาง

ภาพที่ 22 เป็นการทดสอบอายุความล้าของชิ้นงานที่ได้รับการปรับปรุงรูปแบบร่องบากโดยการลดส่วนที่แหลมคมของร่องบากแบบสี่เหลี่ยมและร่องบากแบบสามเหลี่ยม (รายละเอียดดังแสดงในภาพที่ 8) พบว่า ร่องบากที่ปรับปรุงแล้วมีค่าอายุความล้าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับร่องบากครึ่งวงกลมและร่องบากที่ไม่ได้ปรับปรุง โดยเฉพาะอย่างยิ่งร่องบากแบบสี่เหลี่ยมที่ปรับปรุงแล้ว ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากความเค้นหนาแน่นมีค่าลดลง เนื่องจากส่วนโค้งของร่องบากที่เพิ่มขึ้น ทำให้ชิ้นงานมีพื้นที่ในการกระจายแรงเพิ่มมากขึ้น



ภาพที่ 22 อายุความล้าของชิ้นงานยางผสมเขม่าดำซึ่งใช้รูปแบบร่องบากที่ปรับปรุงแล้ว

5. สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของสมบัติเชิงกลแบบสถิตย์ที่มีต่อสมบัติเชิงพลวัต คือ อายุความล้า ของ ชิ้นงานยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมเขม่าดำที่ปริมาณ 30-60 phr ซึ่งใช้ระบบการคงรูปแบบ ประสิทธิภาพและแบบดั้งเดิม โดยสมบัติเชิงกลแบบสถิตย์ของวัสดุยางที่ศึกษา ได้แก่ ความต้านทานต่อแรง ดึงสูงสุด ระยะยืด ณ จุดขาด ค่ามอดูลัส และความต้านทานต่อการฉีกขาด รวมทั้งปัจจัยที่มาจากรูปแบบของ ร่องบาก จากผลการทดสอบ พบว่า ยางที่คงรูปด้วยระบบ CV มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความ ต้านทานต่อการฉีกขาด รวมถึงค่ามอดูลัสที่มากกว่า ยางที่คงรูปด้วยระบบ EV ในขณะที่ระยะยืด ณ จุดขาด มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก และพบว่า ค่าความต้านทานต่อแรงดึง ค่ามอดูลัสมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่ม ปริมาณการบดผสมเขม่าดำเพิ่มขึ้น ในขณะที่ระยะยืด ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลง และผลจากการศึกษาอายุ ความล้าของชิ้นงานยาง แสดงให้เห็นว่า รูปแบบการเชื่อมขวางแบบ Poly-sulphidic (ยางที่คงรูปด้วยระบบ CV) มีอายุความล้ามากกว่ารูปแบบการเชื่อมขวางแบบ Mono หรือ Di-sulphidic (ยางที่คงรูปแบบ EV) ในขณะที่อายุความล้ามีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำ และเมื่อพิจารณาผลของรูปแบบร่องบากที่มี ต่ออายุความล้าของชิ้นงานยาง พบว่า ร่องบากครึ่งวงกลมมีอายุความล้ามากกว่าร่องบากสี่เหลี่ยมและร่อง บากสามเหลี่ยม แต่หากพิจารณาในกรณีของร่องบากสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยมซึ่งมีขอบมุมที่แหลมคม พบว่า ร่องบากสี่เหลี่ยมมีอายุความล้าที่มากกว่าร่องบากสามเหลี่ยม และผลจากการปรับปรุงรูปแบบร่องบากโดย การลดส่วนที่แหลมคมของร่องบากแบบสี่เหลี่ยมและร่องบากแบบสามเหลี่ยม แสดงให้เห็นว่า ร่องบากที่ ปรับปรุงแล้วมีค่าอายุความล้าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับร่องบากครึ่งวงกลมและร่องบากที่ไม่ได้ปรับปรุง โดยเฉพาะอย่างยิ่งร่องบากแบบสี่เหลี่ยมที่ปรับปรุงแล้ว ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้สรุปได้ว่า ผลการทดสอบ

สมบัติเชิงกลแบบสถิตยบางอย่าง เช่น ความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด ไม่สามารถบ่งชี้หรือคาดการณ์สมบัติเชิงพลวัต (ในงานวิจัยนี้ คือ อายุความล้า) ได้ดี โดยสมบัติเชิงกายภาพและสมบัติเชิงกลแบบสถิตยที่สามารถบ่งชี้อายุความล้าได้ดี คือ รูปแบบการเชื่อมขวาง ค่าความแข็ง และค่ามอดุลัส นอกจากนี้ในการออกแบบชิ้นงานยางที่มีร่องบากซึ่งรับภาระแบบพลวัต สิ่งที่ต้องพิจารณานอกจากเหนือจากความเค้นหนาแน่นบริเวณขอบมุมที่แหลมคมแล้ว ยังต้องคำนึงถึงลักษณะการกระจายแรงในขณะที่เกิดการหักงอสูงอีกด้วย

6. ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยเป็นการศึกษาอายุความล้าของชิ้นงานทดสอบ ซึ่งควรขยายผลการศึกษาและวิจัยเพื่อหาแนวทางการออกแบบชิ้นงานยางที่มีความซับซ้อนมากขึ้น ทั้งนี้ต้องอาศัยการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (Computer Aided Engineering, CAE) เพื่อวิเคราะห์หาตำแหน่งและขนาดของความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน จากนั้นนำไปออกแบบแม่พิมพ์ทดสอบเพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นหนาแน่นและอายุความล้าของชิ้นงาน ซึ่งผู้วิจัยคาดว่าแนวทางนี้สามารถนำไปประเมินอายุการใช้งานของชิ้นงานที่มีความซับซ้อนมากขึ้นโดยใช้เครื่องมือที่มีราคาถูกลงได้

เอกสารอ้างอิง

พงษ์ธร แซ่ฮ้อย. 2550. สารเคมียาง. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.), ปทุมธานี.

ASTM D1642. **Standard Test Methods for Elasticity or Toughness of Varnishes.**

ASTM D2240. **Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness. Standards.**

ASTM D412. **Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers—Tension.**

ASTM D430. **Standard Test Methods for Rubber Deterioration—Dynamic Fatigue.**

ASTM D5289. **Standard Test Method for Rubber Property—Vulcanization Using Rotorless Cure Meters.**

ASTM D5289. **Standard Test Method for Rubber Property—Vulcanization Using Rotorless Cure Meters.**

ASTM D624. **Standard Test Method for Tear Strength of Conventional Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers.**

Brydson, J. A. 1978. **Rubber Chemistry**, Applied Science Publishers, London.

Chou, H.-W., J.-S. Huang and S.-T. Lin. 2006. Effects of thermal aging on fatigue of carbon black–reinforced EPDM rubber. **Journal of Applied Polymer Science** 103: 1244-1251.

Chuayjuljit, S., A. Imvittaya, N. Na-Ranong and P. Potiyaraj. 2002. Effect of particle size and amount of carbon black and calcium carbonate on curing characteristics and dynamic mechanical properties of natural rubber. **Journal of Metals, Materials and Minerals** 12(1): 51-57.

De, D. and A.N. Gent. 1996. Tear strength of carbon-black-filled compounds. **Rubber Chemistry and Technology** 69: 834-850.

Donnet J. B. and A. Voet. 1976. **Carbon black: Chemistry and Elastomer Reinforcement.** Marcell Dekker, Inc. New York.

Gent, A.N. 2001. **Engineering with Rubber: How to Design Rubber Components.** 2nd Edition, Hanser Publishers, Munich.

Griffith A. 1920. The phenomena of rupture and flow in solids. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A** 221:163-198.

Harris C. M., and A. G. Piersol. 2002. **Harris' Shock and Vibration Handbook.** 5th ed. McGraw-Hill, Inc. USA.

Hofmann, W. 1989. **Rubber Technology Handbook.** Hanser Publishers, Munich Vienna, New York,

United State.

- Johnson, P. S. 2001. **Rubber Processing: An Introduction**. Carl Hanser Verlag. Munich, Germany.
- 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.
- Kim, J.-H. and H.-Y. Jeong. 2004. Effects of carbon black on the fatigue life, critical J-value and fracture morphology and a new estimated equation for natural rubber. **Journal of Mechanical Science and Technology** 18: 915-923.
- Kim, J. H. and H. Y. Jeong. 2005. A study on the material proper-ties and fatigue life of natural rubber with different carbon blacks. **Internal Journal of Fatigue** 27: 263-272.
- Lake, G.J. 1972. Mechanical fatigue of rubber. **Rubber Chemistry and Technology** 45: 309-328.
- Lake, G. J. and A. G. Thomas, in A. D. Roberts, Ed. 1988. **Natural Rubber Science and Technolog**. Oxford University Press, Oxford.
- Mars, W.V. and A. Fatemi. 2002. A literature survey on fatigue analysis approaches for rubber. **International Journal of Fatigue** 24: 949–961.
- Niedermeier, W., J. Frohlich and H.-D. Luginsland, Koln. 2002. Reinforcement Mechanism in the Rubber Matrix by Active Fillers. *In* **KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe**, 55. Jahrgang, Nr. 7-8/2002.
- Rattanasom, N. and S. Prasertsri. 2009. Relationship among mechanical properties, heat ageing resistance, cut growth behavior and morphology in natural rubber: partial replacement of clay with various types of carbon black at similar hardness level. **Polymer Testing**. 28: 270-276.
- Rattansom, N., A. Poonsuk and T. Makmoon. 2005. Effect of curing system on the mechanical properties and heat aging resistance of natural rubber/tire tread reclaimed rubber blends. **Polymer Testing** 24: 728-732.
- Rivlin, R. S. and Thomas, A. G. 1953. Rupture of rubber I. Characteristic energy for tearing. **Journal of Polymer engineering and Science** 10: 291–318.
- Wu, Y.-P., W. Zhao, L.-Q. Zhang. 2006. Improvement of Flex-Fatigue Life of Carbon-Black-Filled Styrene-Butadiene Rubber by Addition of Nanodispersed Clay. **Macromolecular Materials and Engineering** 291: 944-949.

ภาคผนวก: ร่างโปสเตอร์



การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่ออายุความล้าของผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ Investigation on Parameters affecting Fatigue Life of Natural Rubber Product

ดร.สมเจตน์ พัทธพันธ์

(ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.))

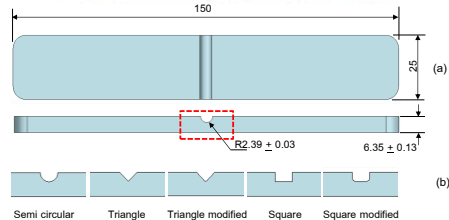


บทนำ

ยางธรรมชาติถูกนำมาใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์อย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ ยางตัวอย่างเช่น ด้อยาง ยางกันกระแทก เป็นต้น โดยส่วนมาก รับภาระสลับ (fluctuating load) หรือภาระหลายแกน (multi-axial loading) ซึ่งเมื่อรับภาระดังกล่าวเป็นระยะเวลานานๆ อาจทำให้ชิ้นส่วนเริ่มแตกร้าว (crack initiation) และเกิดการขยายตัวของรอยแตก (crack propagation) เนื่องจากความล้า (fatigue) ส่งผลให้เกิดความเสียหายที่ระบบหรือทั้งโครงสร้างได้ ดังนั้นในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางจึงมีความจำเป็นต้องคำนึงถึงความแข็งแรง รวมถึงความล้าทางกลของชิ้นงานในด้านหนึ่งที่เป็นจุดบกพร่องหรือตำแหน่งที่มีความอ่อนแอของชิ้นงานนับตั้งแต่เริ่มต้นของกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง เพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายในระหว่างการใช้งาน อย่างไรก็ตามมีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่ออายุความล้าของยาง ซึ่งมีสาเหตุมาจากความหลากหลายของส่วนผสมยางคอมพาวนด์ที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานแต่ละบท ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่ออายุความล้าของชิ้นงานยางธรรมชาติ ได้แก่ ระบบการอบ (curing system) ความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) โมดูลัส (modulus) ระยะยืด ณ จุดขาด (elongation at break) ความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear strength) และค่าความแข็ง (hardness) รวมทั้งปัจจัยที่มาจากรูปแบบของรอยบากเริ่มต้น (initial notch pattern) เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการออกแบบผลิตภัณฑ์ยางให้มีความเหมาะสมและเกิดประสิทธิภาพสูงสุดต่อการนำไปใช้งาน

อุปกรณ์และวิธีการ

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและจัดสร้างแม่พิมพ์ขึ้นรูป สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานยางเพื่อทดสอบอายุความล้า ดังแสดงในภาพที่ 1(a) โดยแม่พิมพ์ที่ขึ้นรูปสามารถปรับเปลี่ยนเส้นโค้งเพื่อสร้างรอยบาก (notch pattern) บนชิ้นงานในลักษณะต่างๆ ได้แก่ ร่องบากครึ่งวงกลม ร่องบากสี่เหลี่ยม ร่องบากสี่เหลี่ยมปรับปรุง ร่องบากสามเหลี่ยม และร่องบากสามเหลี่ยมปรับปรุง ดังแสดงในภาพที่ 2(b)



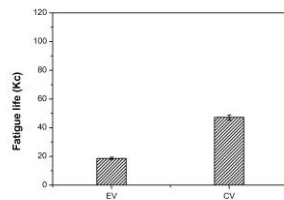
ภาพที่ 1 ชิ้นงานทดสอบอายุความล้า

(a) ขนาดชิ้นงานทดสอบ (b) ลักษณะรูปแบบรอยบากที่ใช้ในการทดสอบ

ผลและอภิปรายผล

อิทธิพลของระบบอบที่มีต่ออายุความล้าของชิ้นงานยาง

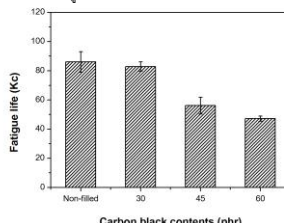
ภาพที่ 2 เป็นผลการศึกษายูนิฟอร์มของชิ้นงานยางผสมเขม่าดำ 60 phr ที่ใช้ระบบการอบ EV และ CV โดยใช้รูปแบบครึ่งวงกลม ตามมาตรฐาน ASTM 430 แสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานยางที่อบด้วยระบบ CV มีอายุความล้าที่สูงกว่าชิ้นงานยางที่อบด้วยระบบ EV ทั้งนี้สาเหตุมาจากพื้นที่ระเหยของยางที่อบด้วยระบบ CV ซึ่งเป็นแบบ Poly-sulphidic มีช่องว่าง (free volume) ระหว่างสายโซ่โพลีเมอร์มากกว่าของระบบ EV ส่งผลให้สามารถเคลื่อนตัวและดูดซับแรงได้ดีกว่า ทำให้บริเวณหน้าสัมผัสสามารถทนต่อการสลับได้ดี



ภาพที่ 2 อายุความล้าของชิ้นงานยางที่อบด้วยระบบ EV และ CV

อิทธิพลของปริมาณเขม่าดำที่มีต่ออายุความล้าของชิ้นงานยาง

ผลการศึกษายูนิฟอร์มปริมาณเขม่าดำที่มีต่ออายุความล้า ดังแสดงในภาพที่ 3 พบว่า ยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารตัวเติมมีอายุความล้าที่สูงกว่ายางที่ผสมเขม่าดำ เนื่องจากชิ้นงานยางที่ไม่ผสมสารตัวเติม สายโซ่โพลีเมอร์สามารถเคลื่อนที่ได้ดีกว่ายางที่ผสมเขม่าดำ ทำให้ยางสามารถดูดซับพลังงานที่ให้แก่ชิ้นงาน และนอกจากนี้ยังได้เสริมสารตัวเติมไม่เกิดรอยแตกขนาดเล็กภายในเนื้อยาง โดยในกรณีชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติม ชิ้นงานเกิดความเสียหายจากความเค้นหนาแน่นที่เกิดขึ้นบริเวณขอบของชิ้นงาน และรอยแตกขยายตัวจากขอบเข้าสู่ศูนย์กลางของชิ้นงานจนกระทั่งชิ้นงานเสียหาย



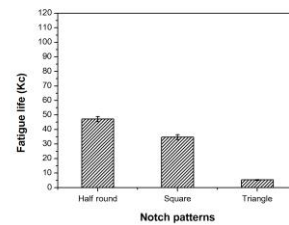
ภาพที่ 3 อายุความล้าของชิ้นงานยางผสมเขม่าดำในปริมาณต่างๆ กัน

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของการเพิ่มปริมาณเขม่าดำ พบว่า อายุความล้ามีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณเขม่าดำในเนื้อยางเพิ่มขึ้น ทั้งนี้สาเหตุมาจากพื้นที่ที่รับรอยแตกขนาดเล็กเพิ่มมากขึ้น (พื้นที่การฉีกขาด)

ระหว่างสารตัวเติมและยาง) และยังมีสาเหตุมาจากค่ามอดูลัสลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำ โดยค่ามอดูลัสที่สูงขึ้นนี้ ส่งผลให้มีรอยแตกที่แหลมคมกว่า จึงสามารถเกิดความเค้นหนาแน่นได้มาก ทำให้รอยแตกขยายตัวได้รวดเร็วกว่ายางที่มีค่ามอดูลัสต่ำ (Rattanasom, 2009) ถึงแม้ว่าชิ้นงานยางที่ผสมเขม่าดำเพิ่มขึ้นมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานการฉีกขาดเพิ่มขึ้นก็ตาม

อิทธิพลของรูปแบบรอยบากชิ้นงานที่มีต่ออายุความล้าของชิ้นงานยาง

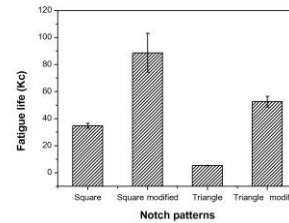
จากผลการศึกษายูนิฟอร์มของรูปแบบรอยบากชิ้นงานที่มีผลต่ออายุความล้า ดังแสดงในภาพที่ 4 พบว่า ร่องบากครึ่งวงกลมมีอายุความล้ามากกว่าร่องบากสี่เหลี่ยมและร่องบากสามเหลี่ยม เนื่องจากความเค้นหนาแน่น (stress concentration) ที่เกิดขึ้นของร่องบากครึ่งวงกลมมีค่าต่ำที่สุด แต่หากพิจารณาในกรณีของร่องบากสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยมซึ่งมีขอบมุมที่แหลมคม (sharply notch) เช่นเดียวกัน พบว่า ร่องบากสี่เหลี่ยมมีอายุความล้าที่มากกว่าร่องบากสามเหลี่ยม โดยมีส่วนแตกต่างจากร่องบากสี่เหลี่ยมเกิดความเค้นหนาแน่นที่ต่ำกว่า เนื่องจากมุมภายในร่องบากมีขนาดใหญ่กว่าร่องบากสามเหลี่ยม อีกทั้งการทดสอบอายุความล้าแบบหักงอ (flex fatigue life) บริเวณส่วนกลางชิ้นงานที่เป็นรอยบากมีการยึดติดสูง โดยในกรณีของร่องบากสี่เหลี่ยมนั้นบริเวณดังกล่าวมีพื้นที่ในการกระจายแรงได้มากกว่าแบบร่องบากแบบสามเหลี่ยม



ภาพที่ 4 อายุความล้าของชิ้นงานยางผสมเขม่าดำที่ใช้รูปแบบรอยบากแตกต่างกัน

อิทธิพลของรูปแบบรอยบากที่ได้รับการปรับปรุงที่มีต่ออายุความล้าของชิ้นงานยาง

ผลจากการปรับปรุงรูปแบบรอยบากโดยการลดส่วนที่แหลมคมของร่องบากแบบสี่เหลี่ยมและร่องบากแบบสามเหลี่ยม ดังแสดงในภาพที่ 5 พบว่า ร่องบากที่ปรับปรุงแล้วมีอายุความล้าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับร่องบากครึ่งวงกลมและร่องบากที่ไม่ได้ปรับปรุง โดยเฉพาะอย่างยิ่งร่องบากแบบสี่เหลี่ยมที่ปรับปรุงแล้วทั้งนี้สาเหตุมาจากความเค้นหนาแน่นมีค่าลดลง เนื่องจากส่วนโค้งของร่องบากที่เพิ่มขึ้น ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า การออกแบบชิ้นงานยางที่มีร่องบากซึ่งรับภาระแบบพลวัต สิ่งที่ต้องพิจารณาอีกเหนือจากความเค้นหนาแน่นบริเวณขอบมุมที่แหลมคมแล้ว ยังต้องคำนึงถึงลักษณะการกระจายแรงในขณะที่เกิดการหักงอสูงอีกด้วย



ภาพที่ 5 อายุความล้าของชิ้นงานยางผสมเขม่าดำที่ใช้รูปแบบรอยบากที่ปรับปรุงแล้ว

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่ออายุความล้า (fatigue life) ของชิ้นงานยางธรรมชาติ ซึ่งจากผลการทดสอบ พบว่า รูปแบบการเชื่อมขวางแบบ Poly-sulphidic (ยางที่อบด้วยระบบ CV) ทำให้ชิ้นงานยางมีอายุความล้ามากกว่ารูปแบบการเชื่อมขวางแบบ Mono หรือ Di-sulphidic (ยางที่อบด้วยระบบ EV) ในขณะที่ยูนิฟอร์มของยางมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำ และเมื่อพิจารณาผลของรูปแบบรอยบากที่มีต่ออายุความล้าของชิ้นงานยาง พบว่า ร่องบากครึ่งวงกลมมีอายุความล้ามากกว่าร่องบากสี่เหลี่ยมและร่องบากสามเหลี่ยม แต่หากพิจารณาในกรณีของร่องบากสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยมซึ่งมีขอบมุมที่แหลมคม (sharply notch) เช่นเดียวกัน พบว่า ร่องบากสี่เหลี่ยมมีอายุความล้าที่มากกว่าร่องบากสามเหลี่ยม และผลจากการปรับปรุงรูปแบบรอยบากโดยการลดส่วนที่แหลมคมของร่องบากแบบสี่เหลี่ยมและร่องบากแบบสามเหลี่ยม แสดงให้เห็นว่า ร่องบากที่ปรับปรุงแล้วมีอายุความล้าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับร่องบากครึ่งวงกลมและร่องบากที่ไม่ได้ปรับปรุง โดยเฉพาะอย่างยิ่งร่องบากแบบสี่เหลี่ยมที่ปรับปรุงแล้ว ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้สรุปได้ว่า ผลการทดสอบแบบเชิงกลแบบสถิตย์บางอย่างเช่น ความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด ไม่สามารถบ่งชี้หรือคาดการณ์ผลบัพติษณ์พลวัต (ในทางวิจัยนี้ คือ อายุความล้า) ได้ดี โดยสมบัติเชิงกลกายภาพและสมบัติเชิงกลแบบสถิตย์ที่สามารถบ่งชี้อายุความล้าได้ดี คือ รูปแบบการเชื่อมขวาง และค่ามอดูลัส และนอกจากนี้ในการออกแบบชิ้นงานยางที่มีร่องบากซึ่งรับภาระแบบพลวัต สิ่งที่ต้องพิจารณาอีกเหนือจากความเค้นหนาแน่นบริเวณขอบมุมที่แหลมคมแล้ว ยังต้องคำนึงถึงลักษณะการกระจายแรงในขณะที่เกิดการหักงอสูงอีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

- Mars, W.V. and A. Fatemi. 2002. A literature survey on fatigue analysis approaches for rubber. *International Journal of Fatigue* 24: 949-961.
- Rattanasom, N. and S. Prasertari. 2009. Relationship among mechanical properties, heat ageing resistance, cut growth behavior and morphology in natural rubber: partial replacement of clay with various types of carbon black at similar hardness level. *Polymer Testing* 28: 270-276.

คำขอบคุณ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ภายใต้โครงการโครงการวิจัยขนาดเล็กระยะยาว (SPR) ประจำปี 2554 สนับสนุนค่า RDG5450056 รวมทั้งได้รับการสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการเตรียมยางคอมพาวนด์จากสำนักวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์



การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่ออายุความล้าของผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ

Investigation on Parameters affecting Fatigue Life of Natural Rubber Product

ดร.สมเจตน์ พันธ์พันธ์

(ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.))

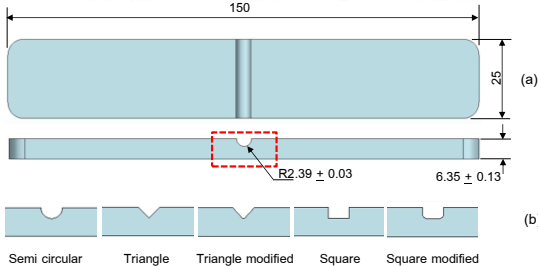


บทนำ

ยางธรรมชาติถูกนำมาใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์อย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ ยกตัวอย่างเช่น ล้อยาง ยางกันกระแทก เป็นต้น โดยส่วนมากรับภาระสลับ (fluctuating load) หรือภาระหลายแกน (multi-axial loading) ซึ่งเมื่อรับภาระดังกล่าวเป็นระยะเวลานานๆ อาจทำให้ชิ้นส่วนเริ่มแตกร้าว (crack initiation) และเกิดการขยายตัวของรอยแตก (crack propagation) เนื่องจากความล้า (fatigue) ส่งผลให้เกิดความเสียหายทั้งระบบหรือทั้งโครงสร้างได้ ดังนั้นในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางจึงมีความจำเป็นที่ต้องคำนึงถึงความแข็งแรง รวมถึงความล้าทางกลของชิ้นงานในตำแหน่งที่เป็นจุดบกพร่องหรือตำแหน่งที่มีความอ่อนแอบนชิ้นงานนับตั้งแต่เริ่มต้นของกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง เพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายในระหว่างการใช้งาน อย่างไรก็ตามมีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่ออายุความล้าของยาง ซึ่งมีสาเหตุมาจากความหลากหลายของส่วนผสมยางคอมพาวนด์ที่เหมาะสมกับการนำไปใช้ในใช้งานแต่ละประเภท ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่ออายุความล้าของชิ้นงานยางธรรมชาติ ได้แก่ ระบบการจรรูป (curing system) ความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) โมดูลัส (modulus) ระยะยืด ณ จุดขาด (elongation at break) ความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear strength) และค่าความแข็ง (hardness) รวมทั้งปัจจัยที่มาจากรูปแบบของร่องบากเริ่มต้น (initial notch pattern) เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการออกแบบผลิตภัณฑ์ยางให้มีความเหมาะสมและเกิดประสิทธิภาพสูงสุดต่อการนำไปใช้งาน

อุปกรณ์และวิธีการ

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและจัดสร้างแม่พิมพ์อัดขึ้นรูป สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานยางเพื่อทดสอบอายุความล้า ดังแสดงในภาพที่ 1(a) โดยแม่พิมพ์ที่จัดสร้างขึ้นสามารถปรับเปลี่ยนอินเล็ทเพื่อสร้างร่องบาก (notch pattern) บนชิ้นงานในลักษณะต่างๆ ได้แก่ ร่องบากครึ่งวงกลม ร่องบากสี่เหลี่ยม ร่องบากสี่เหลี่ยมปรับปรุง ร่องบากสามเหลี่ยม และร่องบากสามเหลี่ยมปรับปรุง ดังแสดงในภาพที่ 2(b)

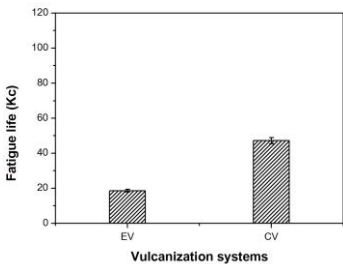


ภาพที่ 1 ชิ้นงานทดสอบอายุความล้า
(a) ขนาดชิ้นงานทดสอบ (b) ลักษณะรูปแบบร่องบากที่ใช้ในการทดสอบ

ผลและอภิปรายผล

อิทธิพลของระบบจรรูปที่มีต่ออายุความล้าของชิ้นงานยาง

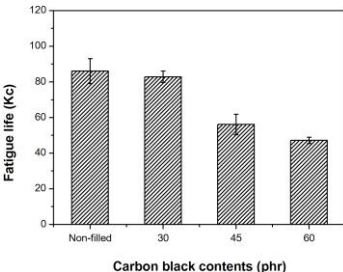
ภาพที่ 2 เป็นผลการศึกษาอายุความล้าของชิ้นงานยางผสมเขม่าดำ 60 phr ที่ใช้ระบบการจรรูป EV และ CV โดยใช้รูปแบบร่องบากแบบครึ่งวงกลม ตามมาตรฐาน ASTM 430 แสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานยางที่จรรูปด้วยระบบ CV มีอายุความล้าที่สูงกว่าชิ้นงานยางที่จรรูปด้วยระบบ EV ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากพันธะเชื่อมขวางของยางที่จรรูปแบบ CV ซึ่งเป็นแบบ Poly-sulphidic มีช่องว่าง (free volume) ระหว่างสายโซ่เลกุลที่มากกว่ายางจรรูปแบบ EV ส่งผลให้สามารถเคลื่อนตัวและดูดซับแรงได้ดีกว่า ทำให้บริเวณหน้าสัมผัสสามารถทนต่อการสลับได้ดี



ภาพที่ 2 อายุความล้าของชิ้นงานยางชิ้นงานยางที่จรรูปแบบ EV และ CV

อิทธิพลของปริมาณเขม่าดำที่มีต่ออายุความล้าของชิ้นงานยาง

ผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณเขม่าดำที่มีผลต่ออายุความล้า ดังแสดงในภาพที่ 3 พบว่า ยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารตัวเติมมีอายุความล้าที่สูงกว่ายางที่ผสมเขม่าดำ เนื่องจากชิ้นงานยางที่ไม่ผสมสารตัวเติม สายโซ่โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ได้ดีกว่ายางที่ผสมเขม่าดำ ทำให้ยางสามารถดูดซับพลังงานที่ให้แก่ชิ้นงาน และนอกจากนี้ยางที่ไม่เติมสารตัวเติมไม่เกิดรอยแตกขนาดเล็กภายในเนื้อยาง โดยในกรณีชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติม ชิ้นงานเกิดความเสียหายจากความเค้นหนาแน่นที่เกิดขึ้นบริเวณขอบมุมของชิ้นงาน และรอยแตกขยายตัวจากขอบเข้าสู่ส่วนกลางของชิ้นงานจนกระทั่งชิ้นงานเสียหาย



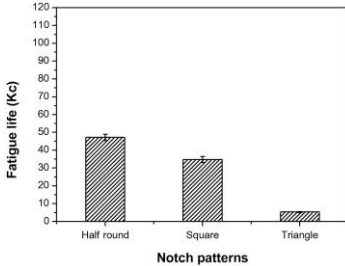
ภาพที่ 3 อายุความล้าของชิ้นงานยางผสมเขม่าดำในปริมาณต่างๆ กัน

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของการเพิ่มปริมาณเขม่าดำ พบว่า อายุความล้ามีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณเขม่าดำในเนื้อยางเพิ่มขึ้น ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากพื้นที่ที่เริ่มรอยแตกขนาดเล็กเพิ่มมากขึ้น (พื้นที่การสัมผัสกับ

ระหว่างสารตัวเติมและยาง) และยังมีสาเหตุมาจากค่ามอดูลัสลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำ โดยค่ามอดูลัสที่สูงขึ้นนี้ ส่งผลให้มีปลายรอยแตกที่แหลมคมกว่า จึงสามารถเกิดความเค้นหนาแน่นได้มาก ทำให้อย่างแตกขยายตัวได้รวดเร็วกว่ายางที่มีค่ามอดูลัสต่ำ (Rattanasom, 2009) ถึงแม้ว่าชิ้นงานยางที่ผสมเขม่าดำเพิ่มขึ้นมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานการฉีกขาดเพิ่มขึ้นก็ตาม

อิทธิพลของรูปแบบร่องบากบนชิ้นงานที่มีต่ออายุความล้าของชิ้นงานยาง

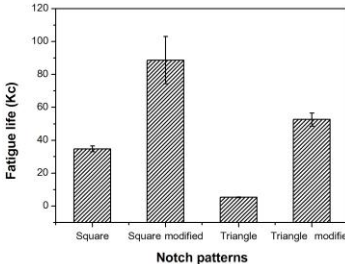
จากผลการศึกษาอิทธิพลของรูปแบบร่องบากบนชิ้นงานที่มีผลต่ออายุความล้า ดังแสดงในภาพที่ 4 พบว่า ร่องบากครึ่งวงกลมมีอายุความล้ามากกว่าร่องบากสี่เหลี่ยมและร่องบากสามเหลี่ยม เนื่องจากความเค้นหนาแน่น (stress concentration) ที่เกิดขึ้นของร่องบากครึ่งวงกลมมีค่าต่ำที่สุด แต่หากพิจารณาในกรณีของร่องบากสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยมซึ่งมีขอบมุมที่แหลมคม (sharply notch) เช่นเดียวกัน พบว่า ร่องบากสี่เหลี่ยมมีอายุความล้าที่มากกว่าร่องบากสามเหลี่ยม โดยมีสาเหตุมาจากร่องบากสี่เหลี่ยมเกิดความเค้นหนาแน่นที่ต่ำกว่า เนื่องจากมุมภายในร่องบากมีขนาดใหญ่กว่าร่องบากสามเหลี่ยม อีกทั้งการทดสอบอายุความล้าแบบหักงอ (flex fatigue life) บริเวณส่วนกลางของชิ้นงานที่เป็นร่องบากมีการยืดตัวสูง โดยในกรณีของร่องบากสี่เหลี่ยมนั้นที่บริเวณดังกล่าวมีพื้นที่ในการกระจายแรงได้มากกว่าแบบร่องบากแบบสามเหลี่ยม



ภาพที่ 4 อายุความล้าของชิ้นงานยางผสมเขม่าดำซึ่งใช้รูปแบบร่องบากแตกต่างกัน

อิทธิพลของรูปแบบร่องบากที่ได้รับการปรับปรุงร่องที่มีต่ออายุความล้าของชิ้นงานยาง

ผลการการปรับปรุงรูปแบบร่องโดยการลดส่วนที่แหลมคมของร่องบากแบบสี่เหลี่ยมและร่องบากแบบสามเหลี่ยม ดังแสดงในภาพที่ 5 พบว่า ร่องบากที่ปรับปรุงแล้วมีค่าอายุความล้าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับร่องบากครึ่งวงกลมและร่องบากที่ไม่ได้ปรับปรุง โดยเฉพาะอย่างยิ่งร่องบากแบบสี่เหลี่ยมที่ปรับปรุงแล้วทั้งนี้มีสาเหตุมาจากความเค้นหนาแน่นมีค่าลดลง เนื่องจากส่วนโค้งของร่องบากที่เพิ่มขึ้น ผลที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่า การออกแบบชิ้นงานยางที่มีร่องบากซึ่งรับภาระแบบพลวัต สิ่งที่เราพิจารณานอกเหนือจากความเค้นหนาแน่นบริเวณขอบมุมที่แหลมคมแล้ว ยังต้องคำนึงถึงลักษณะการกระจายแรงในขณะที่เกิดการหักงอสูงอีกด้วย



ภาพที่ 5 อายุความล้าของชิ้นงานยางผสมเขม่าดำซึ่งใช้รูปแบบร่องบากที่ปรับปรุงแล้ว

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่ออายุความล้า (fatigue life) ของชิ้นงานยางธรรมชาติ ซึ่งจากผลการทดสอบ พบว่า รูปแบบการเชื่อมขวางแบบ Poly-sulphidic (ยางที่จรรูปแบบ CV) ทำให้ชิ้นงานยางมีอายุความล้ามากกว่ารูปแบบการเชื่อมขวางแบบ Mono หรือ Di-sulphidic (ยางที่จรรูปแบบ EV) ในขณะที่อายุความล้ามีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำ และเมื่อพิจารณาผลของรูปแบบร่องบากที่มีต่ออายุความล้าของชิ้นงานยาง พบว่า ร่องบากครึ่งวงกลมมีอายุความล้ามากกว่าร่องบากสี่เหลี่ยมและร่องบากสามเหลี่ยม แต่หากพิจารณาในกรณีของร่องบากสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยมซึ่งมีขอบมุมที่แหลมคม (sharply notch) เช่นเดียวกัน พบว่า ร่องบากสี่เหลี่ยมมีอายุความล้าที่มากกว่าร่องบากสามเหลี่ยม และจากการปรับปรุงรูปแบบร่องโดยการลดส่วนที่แหลมคมของร่องบากแบบสี่เหลี่ยมและร่องบากแบบสามเหลี่ยม แสดงให้เห็นว่า ร่องบากที่ปรับปรุงแล้วมีค่าอายุความล้าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับร่องบากครึ่งวงกลมและร่องบากที่ไม่ได้ปรับปรุง โดยเฉพาะอย่างยิ่งร่องบากแบบสี่เหลี่ยมที่ปรับปรุงแล้ว ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้สรุปได้ว่า ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลแบบสถิตียังอย่างเช่น ความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด ไม่สามารถบ่งชี้หรือคาดการณ์สมบัติเชิงพลวัต (ในงานวิจัยนี้ คือ อายุความล้า) ได้ดี โดยสมบัติเชิงกายภาพและสมบัติเชิงกลแบบสถิตยที่สามารถบ่งชี้อายุความล้าได้ดี คือ รูปแบบการเชื่อมขวาง และค่ามอดูลัส และนอกจากนี้ในการออกแบบชิ้นงานยางที่มีร่องบากซึ่งรับภาระแบบพลวัต สิ่งที่เราพิจารณานอกเหนือจากความเค้นหนาแน่นบริเวณขอบมุมที่แหลมคมแล้ว ยังต้องคำนึงถึงลักษณะการกระจายแรงในขณะที่เกิดการหักงอสูงอีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

- Mars, W.V. and A. Fatemi. 2002. A literature survey on fatigue analysis approaches for rubber. *International Journal of Fatigue* 24: 949-961.
- Rattanasom, N. and S. Prasertsri. 2009. Relationship among mechanical properties, heat ageing resistance, cut growth behavior and morphology in natural rubber: partial replacement of clay with various types of carbon black at similar hardness level. *Polymer Testing* 28: 270-276.

คำขอบคุณ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ภายใต้โครงการโครงการวิจัยขนาดเล็กเรื่องยางพารา (SPR) ประจำปี 2554 สัญญาเลขที่ RDG5450056 รวมทั้งได้รับการสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการเตรียมยางคอมพาวนด์จากสำนักวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์