

สมบัติเชิงกลและสัญญาณวิทยาของวัสดุยางผสมยางธรรมชาติและยางคลอโรพรีน ที่มีถั่วลอยเป็นสารตัวเติมภายใต้สภาวะบ่มเร่งด้วยความร้อนและน้ำมัน

นภาลักษณ์ คงวาสน์¹ เอกชัย วิมลมาลา² ธีระศักดิ์ หมาภิน²

ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ³ และ อภิสัทธี โฆษิตชัยยงค์^{4*}

กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ (กลุ่มวิจัย P-PROF)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ศึกษาสมบัติของวัสดุยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางคลอโรพรีนที่สัดส่วนการผสมต่างๆ โดยมีสารตัวเติมคือถั่วลอยที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของซิลิกาในถั่วลอย ซึ่งปริมาณการเติมถั่วลอยในวัสดุยางผสมคิดเทียบจากปริมาณของซิลิกาที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในถั่วลอย โดยเติมในช่วง 0 ถึง 50 ส่วนในยางร้อยละ สำหรับการปรับเปลี่ยนสัดส่วนวัสดุยางผสมทำได้โดยการปรับปริมาณการเติมยางธรรมชาติที่ร้อยละ 0 10 25 50 และ 100 โดยน้ำหนัก ผลการวิจัยพบว่า การปรับปรุงผิวถั่วลอยด้วยสารคู่ควบไซเลนส่งผลต่อสมบัติเชิงกลเพิ่มสูงขึ้น ยกเว้นค่าการยืดตัว ณ จุดขาด และความแข็งที่ผิว ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาค การเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติส่งผลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมของวัสดุยางผสมในสภาวะก่อนการบ่มเร่งลดลงเล็กน้อย ในขณะที่ขึ้นงานที่ผ่านการบ่มเร่งเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลโดยรวมโดยมีค่าลดลงอย่างชัดเจน ส่วนผลของการเพิ่มปริมาณถั่วลอยส่งผลให้ค่ามอดุลัสและความแข็งที่ผิวของวัสดุยางผสมเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ค่าความแข็งแรงสูงสุด ระยะยืดตัว ณ จุดขาด และความต้านทานการฉีกขาดลดลง สำหรับอิทธิพลของการบ่มเร่งวัสดุยางผสมพบว่า ขึ้นงานที่ผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนมีสมบัติเชิงกลส่วนใหญ่เพิ่มสูงขึ้น ยกเว้นค่าความแข็งแรงสูงสุด และการยืดตัว ณ จุดขาด ทั้งนี้เกิดจากผลของการบ่มตัวต่อเนื่องหลังปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันในเฟสของยาง สำหรับการบ่มเร่งด้วยความร้อนในน้ำมันส่งผลต่อสมบัติเชิงกลทั้งหมดมีค่าลดลงอย่างชัดเจน โดยเฉพาะวัสดุยางผสมที่มีสัดส่วนปริมาณยางธรรมชาติสูง วัสดุยางผสมที่มียางธรรมชาติต่อยางคลอโรพรีนในสัดส่วน 25 ต่อ 75 และมีถั่วลอยผสมอยู่ที่ปริมาณ 40 ส่วนในยางร้อยละ มีสมบัติเชิงกลโดยรวมที่ดีเมื่อเทียบกับการผลิตภัณฑ์ยางคลอโรพรีนทางการค้า

คำสำคัญ : ยางคลอโรพรีน / ยางธรรมชาติ / ถั่วลอย / การบ่มเร่ง

* Corresponding author: apisit.kos@kmutt.ac.th

¹ นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

³ ศาสตราจารย์ กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

⁴ นักวิจัย กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

Mechanical Properties and Morphology of Natural Rubber/Chloroprene Rubber Blends Filled with Fly-Ash under Thermal and Oil Aging

Napalai Kongvasana ¹, Ekachai Wimolmala ², Teerasak Markpin ²,
Narongrit Sombatsompop ³, and Apisit Kositchaiyong ^{4*}

Polymer Processing and Flow (P-PROF) Research Group

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Toongkru, Bangkok 10140

Abstract

This work studied the properties of natural rubber (NR) / chloroprene rubber (CR) blends using fly ash with and without surface treatment by a silane coupling agent (Bis [3-(triethoxysilyl) propyl] tetrasulfide], Couplink89) at 2% wt of silica content in fly ash. The concentrations of fly ash particles in blends were also varied taking account of the amount of silica (FASi) content between 0-50 parts per 100 parts of rubbers. The NR contents in NR/CR blends were varied at 0, 10, 25, 50 and 100 %wt. The results showed that treatment of fly ash particle with silane coupling agent could improve overall mechanical properties except for elongation at break and hardness. Increasing NR contents in NR/CR blends slightly decreased most of the mechanical properties for the un-aged samples, while clearly decreased those properties for the aged samples. Increases in fly ash particle in NR/CR blends tended to improve tensile modulus and hardness while slightly decreases were observed for tensile strength, elongation at breaks and tear properties. Thermal ageing slightly improved most of mechanical properties except for tensile strength and elongation at break due to post-curing effect. Thermal-oil ageing obviously deteriorated the properties of filled NR/CR vulcanizates, especially for high NR contents. When comparing with commercial CR products in terms of mechanical properties, the most appropriate formula of filled NR/CR from this work was NR/CR of 25/75 blend ratio with 40 phr FASi content.

Keywords : Chloroprene Rubber / Natural Rubber / Fly Ash / Aging

* Corresponding author: apisit.kos@kmutt.ac.th

¹ Graduated Student, Division of Material Technology, Polymer Processing and Flow (P-PROF) Group, School of Energy, Environment and Materials.

² Assistant Professor, Polymer Processing and Flow (P-PROF) Group, School of Energy, Environment and Materials.

³ Professor, Polymer Processing and Flow (P-PROF) Group, School of Energy, Environment and Materials.

⁴ Researcher, Polymer Processing and Flow (P-PROF) Group, School of Energy, Environment and Materials.

1. บทนำ

โดยทั่วไปแล้ว การผสมกันระหว่างยางคลอโรพรีนและยางธรรมชาติ มีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถทนทานต่อน้ำมันหรือตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว โดยยังคงสมบัติด้านความแข็งแรง เนื่องจากยางทั้งสองชนิดสามารถเกิดผลึกได้เมื่อได้รับการดึงยืด (Strain-induced crystallization) จึงทำให้ยางผสมคู่นี้ได้รับความสนใจและการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อสามารถที่จะนำไปใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ผลิตภัณฑ์ยางรองแท่นเครื่องจักรอุตสาหกรรม ยางซีล ยางหุ้มสายเคเบิล และยางหุ้มสายไฟฟ้าหุ้มเทียนได้ [1] เมื่อพิจารณาสัดส่วนผสมแล้ว พบว่าสัดส่วนของยางธรรมชาติและยางคลอโรพรีนในวัสดุผสม ที่ทำให้มีสมบัติการทนทานต่อน้ำมันและสภาพแวดล้อมได้ดีนั้น เป็นสัดส่วนผสมที่มีปริมาณยางคลอโรพรีนมากกว่ายางธรรมชาติ โดยมียางคลอโรพรีนอย่างน้อยร้อยละ 50 ในเนื้อวัสดุผสม [2-3] อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาในด้านของต้นทุนการผลิตแล้วยางคลอโรพรีนมีราคาสูงกว่ายางธรรมชาติถึง 2 เท่า

สารตัวเติมเสริมแรงที่นิยมใช้ในวัสดุยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางคลอโรพรีน คือ ผงเขม่าดำและซิลิกา [4-5] จากรายงานการวิจัยที่ผ่านมา [6-9] พบว่า แก้วลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินซึ่งจัดเป็นวัสดุเหลือใช้และมีลักษณะเฉพาะคือมีการมีรูปร่างอนุภาคที่ค่อนข้างกลมมัน มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบในปริมาณที่สูงถึงร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก และพบว่า การปรับปรุงผิวแก้วลอยด้วยสารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) [6] [10-13] สามารถเพิ่มสมบัติของวัสดุยางผสมได้ Sombatsompop และ Thongsang [11] ได้ศึกษาผลของการใช้ Bis [3-(triethoxysilyl) propyl] tetrasulfide, Si69 เพื่อปรับปรุงพื้นผิวของแก้วลอยที่ผสมอยู่ในยางธรรมชาติ พบว่าปริมาณ Si-69 ที่ใช้ผสมในแก้วลอยที่เหมาะสมอยู่ในช่วงร้อยละ 2.0-4.0 โดยน้ำหนักของซิลิกาในแก้วลอย โดยสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการยึดเกาะกันระหว่างยางธรรมชาติกับแก้วลอยและส่งผลให้สมบัติเชิงกลเพิ่มสูงขึ้น Ismail และ Leong [2] ได้ศึกษาสมบัติการสึกตัวและสมบัติเชิงกลของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน พบว่า ค่ามอดูลัสแรงดึงและค่าความแข็งแรงที่ผิวให้ค่าสูงสุดที่อัตราส่วนผสมของยางธรรมชาติต่อยาง

คลอโรพรีนเป็น 25 ต่อ 75 โดยน้ำหนัก Ramesan และคณะ [3] ศึกษาสมบัติการสึกตัวและสมบัติเชิงกลของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน (NR/CR) พบว่า เวลาการไหลก่อนการสึกตัวเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณยางคลอโรพรีน โดยสมบัติเชิงกลได้แก่ ความแข็งแรงสูงสุดและความแข็งที่ผิวมีค่าสูงที่สุดที่สัดส่วนระหว่างยางธรรมชาติต่อยางคลอโรพรีนเท่ากับ 30 ต่อ 70 โดยน้ำหนัก

สำหรับในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาผลของสัดส่วนวัสดุยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางคลอโรพรีนที่มีแก้วลอยเป็นสารตัวเติม โดยเปรียบเทียบผลของการบ่มเร่งขึ้นงานในสภาวะต่างๆ ตามมาตรฐานสากล ได้แก่ การบ่มเร่งด้วยความร้อน และการบ่มเร่งด้วยความร้อนในน้ำมันไฮดรอลิก ที่มีต่อสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพของชิ้นงานวัสดุยางผสม นอกจากนี้ ได้ทำการเลือกสูตรวัสดุผสมที่มีสมบัติทางกลที่เหมาะสมที่สุด เพื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลกับแผ่นยางคลอโรพรีนทางการค้า

2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

2.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้

- ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) เกรด STR20 จาก บริษัท ช่วยชวน จำกัด
- ยางคลอโรพรีน (Chloroprene rubber, CR) เกรด W จาก บริษัท ดูปองท์ จำกัด
- สารคู่ควบประเภทไซเลน (Silane coupling agent) ชนิด bis-(3-triethoxysilylpropyl) tetrasulfide (Couplink89), [(C₂H₅O)₃-Si-(CH₂)₃-S₄-(CH₂)₃-Si-(C₂H₅O)₃] จาก บริษัท Zhenjiang Wholemark Fine Chemical จำกัด
- สารกระตุ้นปฏิกิริยาการคงรูป (Activators) ชนิด Zinc oxide (ZnO) จากบริษัท ยูนิเวนเจอร์ จำกัด (มหาชน) Stearic acid จากบริษัท เคมีลูป อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด และ Magnesium oxide (MgO) จาก บริษัท โคโนซิม่า เคมีคอล จำกัด (มหาชน)
- สารเร่งปฏิกิริยาการคงรูป (Accelerators) ชนิด 2,2'-Dithiobis benzothiazole (perkacit-MBTS) และ Tetramethylthiuram disulfide (Perkacit-TMTD) จาก บริษัท Flexys จำกัด และ Ethylene thiourea (ETU) จาก บริษัท Sinrubtech จำกัด

- สารช่วยในการคงรูปร่าง (Curing agent) ชนิดกำมะถัน (Sulfur) โดยใช้ขนาด 325 mesh จาก บริษัทสยาม เหมมี จำกัด (มหาชน)
- สารป้องกันการเสื่อมสภาพจากออกซิเจนและสภาวะแวดล้อม (Antioxidant) ชนิด 2,2,4-Trimethy-1,2-dihydroquinoline (TMQ) เกรด Rubatan 184 จาก บริษัท General Quimica S.A. จำกัด
- สารตัวเติม (Filler) ชนิดเถ้าลอย (Fly ash) ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ของโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งมีองค์ประกอบของซิลิกาอยู่ประมาณร้อยละ 40 ร่วมกับออกไซด์ชนิดอื่นๆ เช่น อะลูมิเนียมออกไซด์ เหล็กออกไซด์ เป็นต้น ขนาดอนุภาคไม่เกิน 125 ไมครอน มีความหนาแน่น 2.65 ก./ซม.³ จากบริษัท K.N.R. Group จำกัด

ตารางที่ 1 หน้าที่และปริมาณของสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

สารเคมี	หน้าที่	ปริมาณ (phr*)
1. ยางธรรมชาติ (NR:STR20) : ยางคลอโรพรีน (CR:W)	องค์ประกอบหลัก	100:0, 10:90, 25:75, 50:50, 0:100
2. ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO)	ตัวกระตุ้นปฏิกิริยา	5.0
3. กรดสเตียริก (Stearic acid)	ตัวกระตุ้นปฏิกิริยา	2.0
4. ทีเอ็มคิว (Trimethylhydroquinone, TMQ)	สารแอนติออกซิแดนท์	1.0
5. เอ็มบีทีเอส (Dibenzothiazyl disulfide, MBTS)	ตัวเร่งปฏิกิริยา	1.0
6. ทีเอ็มทีดี (Tetramethylthiuram disulfide, TMTD)	ตัวเร่งปฏิกิริยา	1.0
7. แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide)	ตัวเร่งปฏิกิริยา	4.0
8. เอทิลีนไทโอยูเรีย (Ethylene thiourea, ETU)	ตัวเร่งปฏิกิริยา	0.6
9. ซิลิกาในเถ้าลอย (Silica in fly ash)	สารตัวเติม	0, 10, 20, 30, 40, 50
10. กำมะถัน (Sulfur 325 mesh)	ตัวเชื่อมพันธะข้าม	0.6

* ข้อสังเกต phr คือ parts per hundred of rubber by weight

- การผสมวัตถุดิบ เริ่มจากการบดยางด้วยเครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ (Two roll mill) ของบริษัท Yong Fong Machinery จำกัด แล้วเติมวัตถุดิบต่างๆ ตามลำดับการผสมและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัยดังตารางที่ 1 โดยใช้เวลาในการบดผสม 35 นาที อุณหภูมิเริ่มต้นในการผสมที่ 25 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ไม่เกินร้อยละ 50
- การหาเวลาที่ใช้ในการคงรูปร่าง จากการทดสอบโดยใช้เครื่อง Oscillating Disk Rheometer (ODR) ของ

2.2 ขั้นตอนการผสมและการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ในงานวิจัยนี้ ได้กำหนดสัดส่วนวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางคลอโรพรีน โดยการปรับสัดส่วนการเติมยางธรรมชาติในยางคลอโรพรีนที่ร้อยละ 0 10 25 50 และ 100 สำหรับการผสมเถ้าลอยในวัสดุผสมจะคิดเทียบจากการมีซิลิกาในวัสดุผสมดังกล่าวที่ปริมาณ 0 10 20 30 40 และ 50 ส่วนในยางร้อยละ 100 ทั้งนี้ที่ปริมาณดังกล่าวเทียบเท่ากับการมีเถ้าลอยผสมอยู่ในวัสดุผสมที่ปริมาณ 0 25 50 75 100 และ 125 ส่วนในยางร้อยละ 100 ซึ่งเถ้าลอยที่ใช้ได้ผ่านกระบวนการปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบประเภทไฮโดรเจนโดยผสมในเถ้าลอยปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก [12] ส่วนประกอบของสูตรวัสดุผสมในงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 1

บริษัท GOTECH Testing Machine รุ่น GT 70-70-S2 ตามมาตรฐาน ASTM D2084-01 อุณหภูมิทดสอบ 160 องศาเซลเซียส เพื่อหาค่าเวลาในการคงรูปที่ร้อยละ 90 (tc_{90})

- การเตรียมชิ้นงานทดสอบ โดยนำยางคอมปาวด์ที่เตรียมได้จากเครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ขึ้นไปขึ้นรูปเป็นแผ่นขึ้นงานทดสอบด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน (Hot press) ของบริษัท LAB TECH จำกัด อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป 160

องศาเซลเซียส แรงดันแม่พิมพ์ที่ 170 กก./ซม.² หลังจากนั้นตัดเป็นชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบ

2.3 การทดสอบสมบัติของยาง

สมบัติเชิงกล

- การทดสอบความต้านแรงดึงและความต้านแรงฉีกขาดของแผ่นยางคงรูปใช้เครื่อง Universal Testing Machines จากบริษัท Shimadzu รุ่น Autograph AG-I ความเร็วในการดึง 500 มม./นาที ตามมาตรฐาน ASTM D412-06 และตามมาตรฐาน ASTM D624-07 ตามลำดับ

- การทดสอบค่าความแข็งที่ผิวของแผ่นยางคงรูปใช้เครื่องทดสอบความแข็ง จากบริษัท Tech Lock จำกัด ตามมาตรฐาน ASTM D2240-05 Shore A

- การบ่มเร่งชิ้นงานทดสอบใช้ตู้อบยี่ห้อ GOTECH รุ่น GT-7017 โดยการบ่มเร่งด้วยความร้อน (Thermal aging) ใช้สภาวะการทดสอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 168 ชม. ตามมาตรฐาน ASTM D573-04 และการบ่มเร่งด้วยความร้อนในน้ำมันไฮดรอลิก (Thermal-oil aging) ใช้ น้ำมันไฮดรอลิกชนิด Shell ISO 46M ที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 70 ชม. ตามมาตรฐาน ASTM D471-06

สมบัติเชิงกายภาพ

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและการกระจายตัวของเถ้าลอยในวัสดุยางผสมใช้กล้องจุลทรรศน์

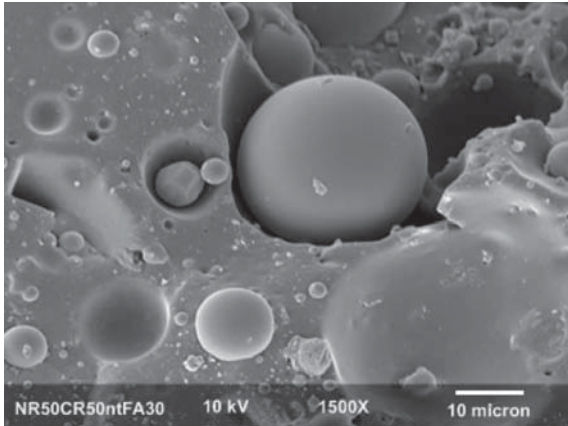
อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5,800 ด้วยศักย์ไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ ผิวชิ้นงานทดสอบเคลือบด้วยทอง

3. ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

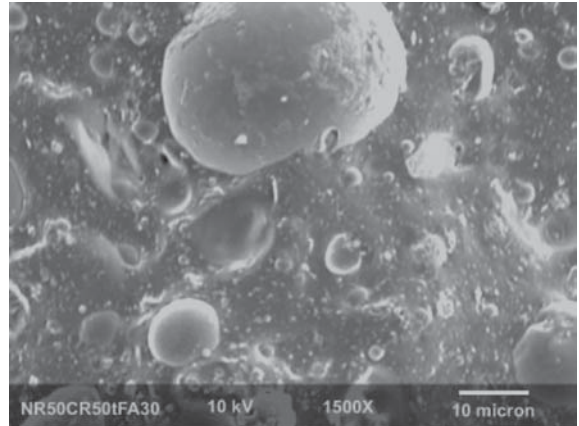
ผลการวิจัยส่วนนี้ ได้แสดงการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางคลอโรพรีนที่สัดส่วนการผสม 50 ต่อ 50 โดยมีซิลิกาในเถ้าลอยชนิดไม่ปรับปรุงและปรับปรุงผิวผสมอยู่ในปริมาณ 30 ส่วนในยางร้อยละ เป็นสารตัวเติมผลการทดลองในตารางที่ 2 พบว่า การปรับปรุงผิวเถ้าลอยด้วยสารคู่ควบไซเลนส่งผลให้สมบัติเชิงกลของวัสดุยางผสมดังกล่าวเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากสารคู่ควบไซเลนเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวของเถ้าลอยในเนื้อของวัสดุรวมทั้งสารดังกล่าวยังสามารถทำหน้าที่เชื่อมโยงระหว่างเฟสของยางกับเถ้าลอย โดยอาศัยหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของสารคู่ควบไซเลนที่ยึดเกาะกับหมู่ฟังก์ชันชนิดไฮดรอกซิล (-OH) ของซิลิกาในเถ้าลอย [14] จากรูปที่ 1 สามารถสังเกตเห็นได้ว่าเฟสของยางกับเถ้าลอยในกรณีที่มีการปรับปรุงผิวติดกัน (รูปที่ 1-ข) อย่างไรก็ตาม สำหรับค่าการยึดตัว ณ จุดขาด ของวัสดุผสมในกรณีที่ใช้เถ้าลอยชนิดปรับปรุงผิวมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจาก ผลของการเชื่อมกันระหว่างเฟสของยางและเถ้าลอยนั้นทำให้ความสามารถในการยึดตัวของยางลดลง

ตารางที่ 2 สมบัติเชิงกลของวัสดุยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางคลอโรพรีนที่สัดส่วน 50 ต่อ 50 ปริมาณซิลิกาในเถ้าลอย 30 ส่วนในยางร้อยละ

เถ้าลอย	มอดูลัสที่ระยะยืด 200 เปอร์เซ็นต์ (MPa)	ความแข็งแรง สูงสุด (MPa)	ระยะการยืด ณ จุดขาด (%)	ความต้านทาน การฉีกขาด (kN/m)	ความแข็งที่ผิว (Shore A)
ไม่ได้ปรับปรุงผิว	1.6 ± 0.1	4.8 ± 0.7	512 ± 39	15.7 ± 0.4	54.5 ± 0.6
ปรับปรุงผิว	2.5 ± 0.0	5.5 ± 0.4	458 ± 23	23.9 ± 0.8	56.3 ± 0.8



(ก) ถ้ำลอยที่ไม่ปรับปรุงผิว



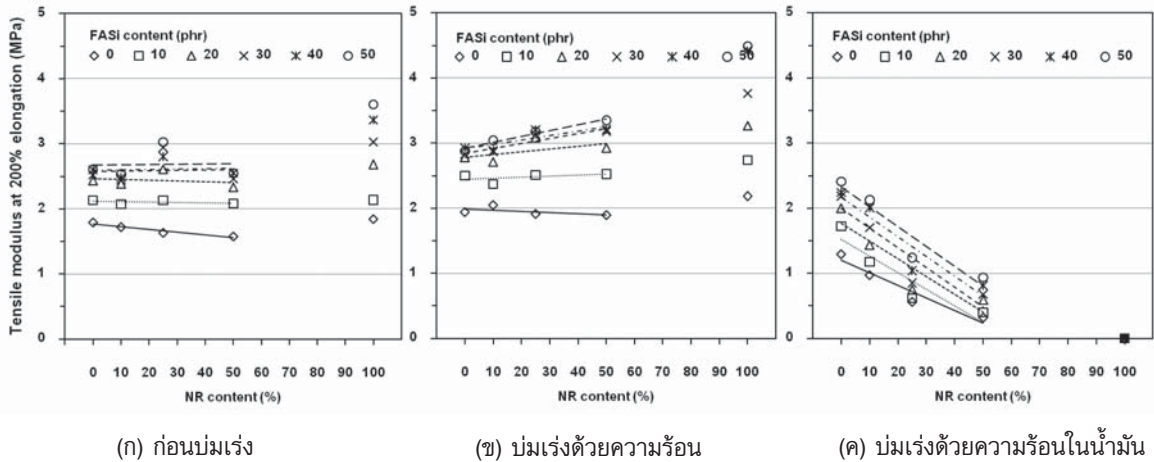
(ข) ถ้ำลอยที่ปรับปรุงผิว

รูปที่ 1 ภาพสัณฐานวิทยาของวัสดุยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีนที่สัดส่วน 50 ต่อ 50 ปริมาณซิลิกาในถ้ำลอย 30 ส่วนในยางร้อยละ

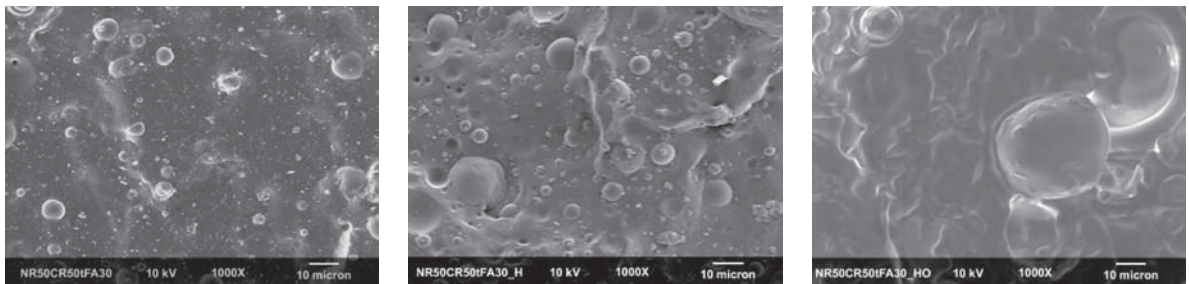
สำหรับการเปรียบเทียบผลของสภาวะการบ่มเร่งของวัสดุยางผสมใช้ถ้ำลอยชนิดปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน โดยทำการศึกษาสมบัติเชิงกลด้านต่างๆ ได้แก่ สมบัติการทนแรงดึง สมบัติความต้านทานการฉีกขาด และความแข็งที่ผิว ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2-6

รูปที่ 2 แสดงผลการทดสอบค่ามอดูลัสของวัสดุยางผสมที่ระยะยืด 200 เปอร์เซ็นต์ สำหรับในกรณีการทดสอบชิ้นงานก่อนการบ่มเร่ง พบว่า การเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติในวัสดุยางผสมส่งผลให้ค่าดังกล่าวลดลงเล็กน้อย เนื่องจากยางทั้งสองชนิดที่ใช้ในการวิจัยนี้ มีความแข็งแรงใกล้เคียงกัน สังเกตได้จากค่ามอดูลัสของยางธรรมชาติและยางคลอโรพรีนก่อนนำมาผสมกัน ส่วนการเพิ่มปริมาณซิลิกาในถ้ำลอยพบว่าค่ามอดูลัสเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเป็นผลมาจากสมบัติของถ้ำลอยที่จัดเป็นอนุภาคที่มีความแข็งแรงสูงกว่ายาง สำหรับในกรณีการบ่มเร่งด้วยความร้อนส่งผลให้ค่ามอดูลัสของวัสดุยางผสมเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้คาดว่าเกิดจากผลของการสุกตัวหลังการเกิดปฏิกิริยวัลคาไนเซชันที่เกิดขึ้นระหว่างการขึ้นรูป หรือเรียกว่าการเกิด Post curing ซึ่งส่งผลให้สายโซ่เชื่อมโยงหรือพันธะกำมะถันระหว่างโมเลกุลเปลี่ยนจากสายโซ่ยาว (Poly-sulfidic) เป็นสายโซ่ที่มีขนาดสั้นลง (Mono- หรือ Di-sulfidic) และส่งผลทำให้ความหนาแน่นของพันธะเชื่อม

ขวางเพิ่มสูงขึ้น [1] สำหรับกรณีบ่มเร่งด้วยความร้อนในน้ำมันไฮดรอลิก พบว่า ค่ามอดูลัสลดต่ำลงอย่างชัดเจนตามปริมาณยางธรรมชาติ ทั้งนี้คาดว่ามีความเสี่ยงมาจากยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อน้ำมันที่ต่ำกว่ายางคลอโรพรีนมาก ดังนั้นที่อุณหภูมิสูงจึงทำให้น้ำมันสามารถแทรกตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลของวัสดุยางผสมได้ง่าย เกิดปรากฏการณ์พลาสติกไซเซชัน (Plasticization Effect) ส่งผลให้วัสดุยางผสมนิ่มขึ้นหรือทำให้วัสดุมีค่ามอดูลัสต่ำลงโดยเฉพาะวัสดุยางผสมที่มีปริมาณยางธรรมชาติมาก จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลข้างต้นสามารถสังเกตได้จากภาพถ่ายสัณฐานวิทยาของวัสดุยางผสมที่แสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งเป็นวัสดุยางผสมที่มีปริมาณยางธรรมชาติร้อยละ 50 และมีซิลิกาในถ้ำลอยอยู่ที่ปริมาณ 30 ส่วนในยางร้อยละ จะสังเกตเห็นว่าภาพถ่ายชิ้นงานกรณีที่ผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนในน้ำมันไฮดรอลิกมีความขรุขระมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากปรากฏการณ์พลาสติกไซเซชันและการบวมตัวที่สูงขึ้นของวัฏภาคยาง (รูปที่ 3-ค) ซึ่งคาดว่า ผลของการแช่ชิ้นงานในน้ำมันที่อุณหภูมิสูง ทำให้น้ำมันสามารถแทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยาง ในขณะที่สัณฐานวิทยาของชิ้นงานในกรณีผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน (รูปที่ 3-ข) ไม่พบการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับกรณีชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการบ่มเร่ง (รูปที่ 3-ก)



รูปที่ 2 มอดุลัสที่ระยะยืด 200 เปอร์เซ็นต์ ของวัสดุยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางคลอโรพรีนที่มีซิลิกาในถ้ำลอยผสมอยู่ปริมาณต่างๆ (ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 0.05)



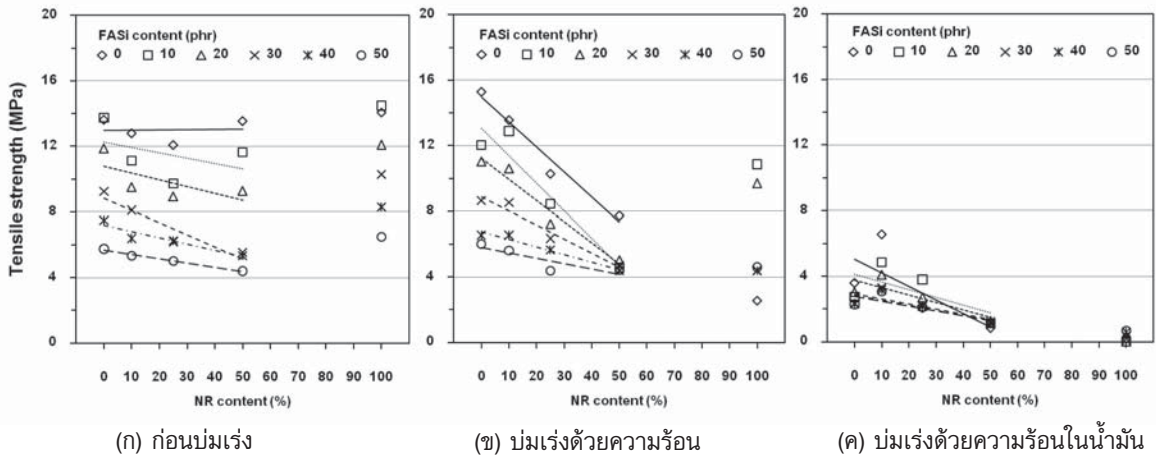
รูปที่ 3 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุยางผสมเปรียบเทียบที่สภาวะบ่มแรงต่างๆ (วัสดุยางผสมระหว่างยางคลอโรพรีนกับยางธรรมชาติที่สัดส่วน 50 ต่อ 50 ที่มีปริมาณซิลิกาในถ้ำลอย 30 ส่วนในยางร้อยละ)

ค่าความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุยางผสม แสดงดังรูปที่ 4 พบว่า กรณีการทดสอบชิ้นงานก่อนการบ่มแรง การเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติส่งผลต่อสมบัติดังกล่าวเล็กน้อย ทั้งนี้มีเหตุผลเช่นเดียวกับกรณีการทดสอบค่ามอดุลัส ในขณะที่กรณีการทดสอบชิ้นงานหลังการบ่มแรง พบว่า ผลของการเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติทำให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดลดลงอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากยางธรรมชาติมีความอ่อนไหวต่อสภาวะการบ่มแรงมากกว่ายางคลอโรพรีน ส่วนการเพิ่มปริมาณถ้ำลอยพบว่าค่าความแข็งแรงสูงสุดลดต่ำลง

เนื่องจาก วัสดุยางผสมมีเฟสของยางลดลง รวมทั้งผลของการที่อนุภาคถ้ำลอยทำให้เฟสของยางเกิดความไม่ต่อเนื่องหรือมีจุดบกพร่องเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ยังคาดว่าเนื่องจากอนุภาคถ้ำลอยที่มีขนาดใหญ่ในวัสดุยางผสมเกิดการแตกออกเป็นอนุภาคขนาดเล็กขณะทำการบดผสมทำให้อนุภาคของถ้ำลอยบางส่วนที่ไม่ได้รับการปรับปรุงผิวด้วยไซเลนเป็นจุดบกพร่องในชิ้นงาน และเกิดความไม่ต่อเนื่องของเฟสยาง [15] สำหรับกรณีการบ่มแรงชิ้นงานด้วยความร้อนพบว่า วัสดุยางผสมมีค่าความแข็งแรงลดลงเล็กน้อย

น้อย เนื่องจากผลของการเกิด Post curing [16] ส่วน
กรณีบ่มเร่งด้วยความร้อนในน้ำมันไฮดรอลิก พบว่า ค่า

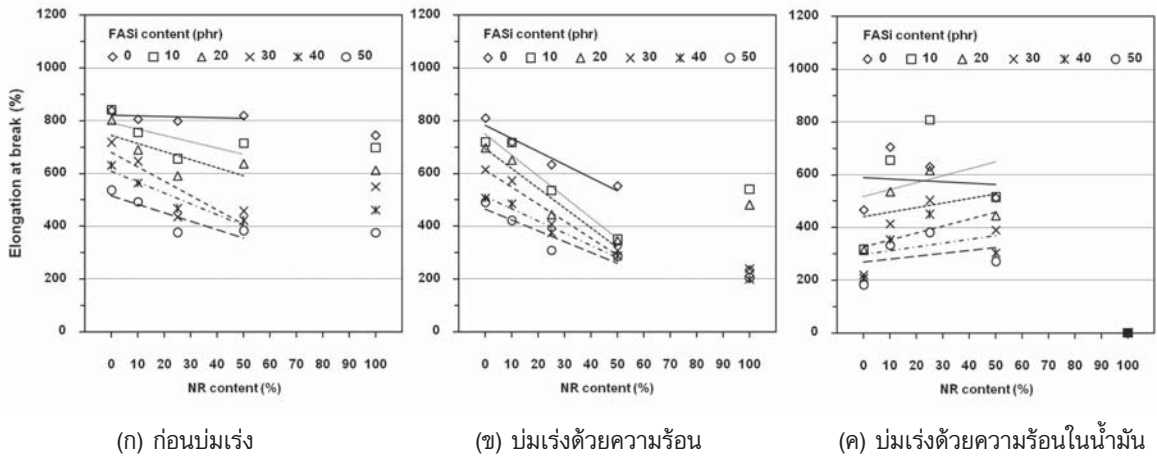
ความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุยางผสมลดลงอย่างชัดเจน
โดยมีคำอธิบายเช่นเดียวกับการทดสอบค่ามอดูลัส



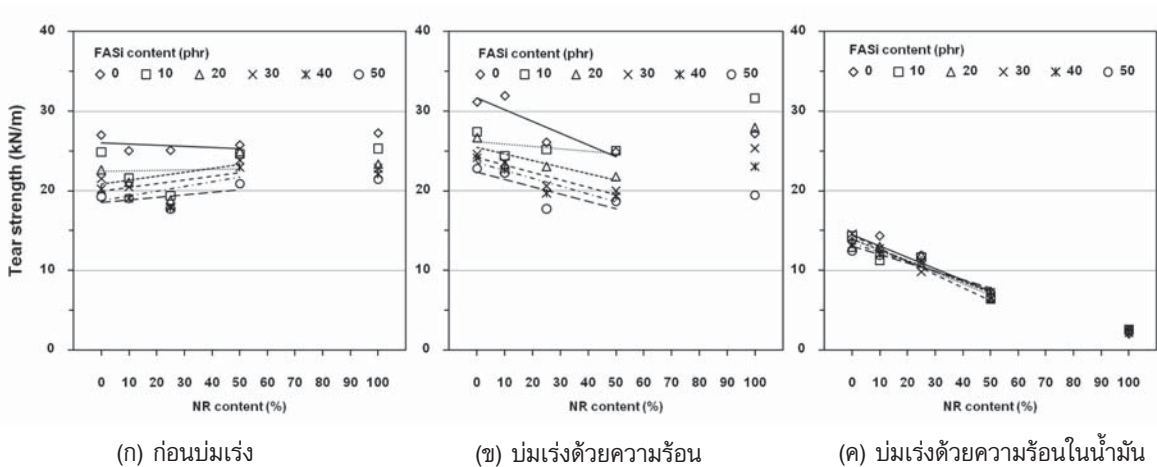
รูปที่ 4 ความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางคลอโรพรีนที่มีซิลิกาในแก้วลอยผสมอยู่ ปริมาณต่างๆ (ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 0.4)

ค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของวัสดุยางผสมแสดงดังรูปที่ 5 ผลของปริมาณยางธรรมชาติ พบว่า ส่งผลให้ค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของชิ้นงานก่อนการบ่มเร่งลดลงเล็กน้อย ส่วนกรณีชิ้นงานหลังผ่านการบ่มเร่ง พบว่า ปริมาณยางธรรมชาติส่งผลให้สมบัติดังกล่าวลดต่ำลง โดยมีคำอธิบายเช่นเดียวกับค่าความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุยางผสม ส่วนการเพิ่มปริมาณซิลิกาในแก้วลอย พบว่า ค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของวัสดุยางผสมลดต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุยางผสมมีเฟสของยางลดลง รวมทั้งผลของการที่อนุภาคแก้วลอยทำให้เฟสของยางเกิดความไม่ต่อเนื่องหรือมีจุดบกพร่องเพิ่มสูงขึ้น สำหรับผลของการบ่มเร่งด้วยความร้อนพบว่า ส่งผลให้สมบัติดังกล่าวลดต่ำลงเมื่อเทียบกับชิ้นงานก่อนผ่านการบ่มเร่ง ทั้งนี้คาดว่าเนื่องจากการเกิด Post curing เมื่อพิจารณาผลของการบ่มเร่งด้วยความร้อนในน้ำมันไฮดรอลิก พบว่า ผลของการเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติที่ส่งผลต่อค่าดังกล่าวมีแนวโน้มไม่ชัดเจน อย่างไรก็ตามสำหรับชิ้นงานที่เป็นยางธรรมชาติ ค่าการยึดตัว ณ จุดขาดมีค่าต่ำมาก

รูปที่ 6 แสดงค่าความต้านทานการฉีกขาดของวัสดุยางผสม สำหรับการทดสอบชิ้นงานก่อนการบ่มเร่ง พบว่าการเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติในวัสดุยางผสมไม่ส่งผลต่อค่าความต้านทานการฉีกขาด ส่วนผลกระทบดังกล่าวในกรณีการทดสอบชิ้นงานหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนและการบ่มเร่งด้วยความร้อนในน้ำมันไฮดรอลิกส่งผลให้ค่าความต้านทานการฉีกขาดของวัสดุยางผสมลดลง ในขณะที่ผลของการเพิ่มปริมาณซิลิกาในแก้วลอยส่งผลให้สมบัติดังกล่าวลดต่ำลงทั้งกรณีก่อนและหลังการบ่มเร่ง โดยการบ่มเร่งด้วยน้ำมันไฮดรอลิกมีผลทำให้วัสดุยางผสมมีความต้านทานการฉีกขาดลดลงมากที่สุด ซึ่งจะสังเกตเห็นว่ามีค่าใกล้เคียงกันทุกสัดส่วนการผสมซิลิกาในแก้วลอยอีกด้วย ทั้งนี้สามารถอธิบายเช่นเดียวกับผลการทดสอบค่าความแข็งแรงสูงสุด ซึ่งจะสังเกตเห็นว่ามีค่าใกล้เคียงกันทุกสัดส่วนการผสมซิลิกาในแก้วลอยอีกด้วย ทั้งนี้สามารถอธิบายเช่นเดียวกับผลการทดสอบค่าความแข็งแรงสูงสุด



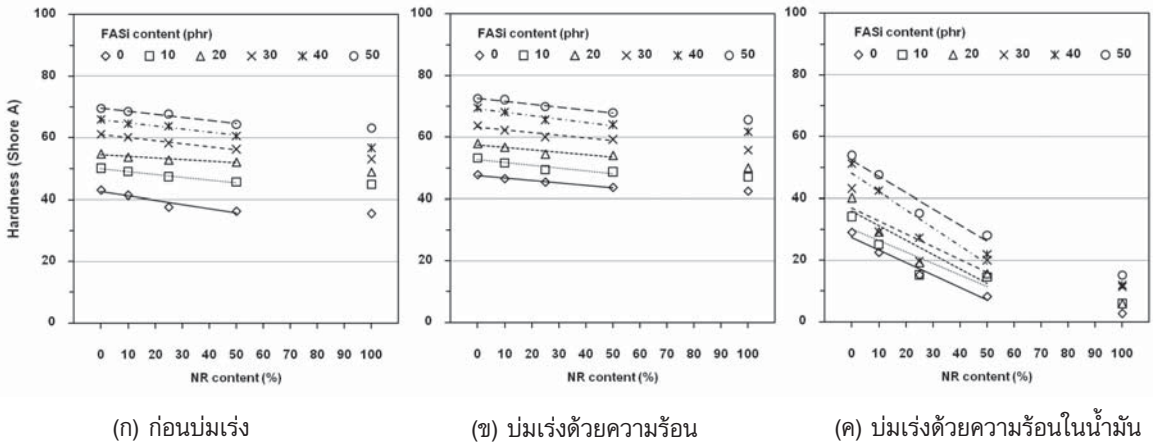
รูปที่ 5 ระยะการยืดตัว ณ จุดขาด ของวัสดุยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางคลอโรพรีนที่มีซิลิกาในถ้ำลอยผสมอยู่ปริมาณต่างๆ (ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 19)



รูปที่ 6 ความต้านทานการฉีกขาดของวัสดุยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางคลอโรพรีนที่มีซิลิกาในถ้ำลอยผสมอยู่ปริมาณต่างๆ (ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 1.1)

ผลการทดลองค่าความแข็งที่ผิวของวัสดุยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางคลอโรพรีน แสดงในรูปที่ 7 พบว่า ผลการทดลองสอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติโมดูลัสของวัสดุยางผสม โดยเฉพาะผลกระทบของการ

เพิ่มปริมาณถ้ำลอยนั้น ส่งผลต่อค่าความแข็งที่ผิวอย่างชัดเจน เนื่องจากอนุภาคถ้ำลอยที่ผสมในวัสดุยางผสมมีความแข็งแรงแรงสูง (Rigidity) จึงทำให้การวัดความแข็งที่ผิวของชิ้นงานมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณถ้ำลอย



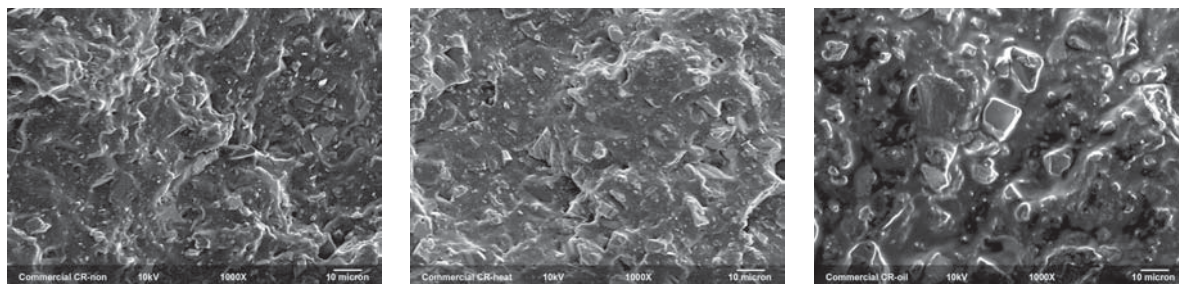
รูปที่ 7 ความแข็งที่ผิวของวัสดุยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางคลอโรพรีนที่มีเถ้าลอยผสมอยู่ปริมาณต่างๆ (ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 0.5)

การเปรียบเทียบระหว่างวัสดุยางผสมสูตรวิจัยและผลิตภัณฑ์ยางคลอโรพรีนทางการค้า

ในส่วนนี้ ได้ทำการคัดเลือกและเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุยางผสมในงานวิจัยนี้กับผลิตภัณฑ์ยางคลอโรพรีนทางการค้าในด้านสมบัติเชิงกลทั่วไปและต้นทุนราคาวัตถุดิบ โดยชิ้นงานจากผลิตภัณฑ์ทางการค้าเป็นยางคลอโรพรีนแผ่นเรียบ ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน แผ่นยางดังกล่าวมีความกว้าง 30 ซม. ความยาว 30 ซม. และความหนา 2 มม. จากบริษัท ยงไทยการยาง จำกัด ซึ่งชิ้นงานจากผลิตภัณฑ์ทางการค้าเป็นสูตรผลิตภัณฑ์ที่ใช้งานเป็นยางรองเครื่องจักร สายพาน และท่อยาง โดยสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางคลอโรพรีนทางการค้าเปรียบเทียบกับวัสดุยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางคลอโรพรีนที่สัดส่วนการผสม 25 ต่อ 75 ที่ปริมาณซิลิกาในเถ้าลอย 40 ส่วนในยางผสมหนึ่งร้อยส่วน ภายใต้สภาวะการบ่มแรงต่างๆ ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 3

ซึ่งพบว่า สมบัติเชิงกลโดยรวมของยางผสมที่พัฒนาขึ้นและผลิตภัณฑ์ยางคลอโรพรีนทางการค้ามีค่าใกล้เคียงกัน ผลกระทบของสภาวะการบ่มแรงด้วยความร้อนและการบ่มแรงด้วยความร้อนในน้ำมันของยางผสมที่พัฒนาขึ้นและผลิตภัณฑ์ยางคลอโรพรีนทางการค้าก็เปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน

สำหรับภาพลักษณ์ฐานวิทยาของชิ้นงานจากผลิตภัณฑ์ยางคลอโรพรีนทางการค้า ที่สภาวะการบ่มแรงต่างๆ แสดงดังรูปที่ 8 โดยทั้งนี้คณะผู้วิจัยไม่ได้ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบและส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ดังกล่าว อย่างไรก็ตามจากการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวระดับจุลภาคของยางคลอโรพรีนทางการค้า สามารถสังเกตเห็นถึงความไม่ต่อเนื่องในเฟสของยางทั้งในกรณีก่อนการบ่มแรงและหลังการบ่มแรง ทำให้เชื่อได้ว่าผลิตภัณฑ์ยางคลอโรพรีนทางการค้ามีการเติมสารเติมแต่งชนิดอื่นๆ



(ก) ก่อนบ่มแรง

(ข) บ่มแรงด้วยความร้อน

(ค) บ่มแรงด้วยความร้อนในน้ำมัน

รูปที่ 8 ภาพสัณฐานวิทยาของยางคลอโรพรีนทางการค้าเปรียบเทียบที่สภาวะบ่มแรงต่างๆ

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลระหว่างวัสดุยางผสมที่ได้จากการวิจัยและชิ้นงานยางคลอโรพรีนทางการค้า

สมบัติ	วัสดุยางผสม NR:CR ที่สัดส่วน 25 : 75 ปริมาณซิลิกา ในแก้วลอย 40 phr	ยางคลอโรพรีน ทางการค้า
ก่อนการบ่มแรงชิ้นงาน		
มอดูลัสแรงดึงที่ 200 % (MPa)	2.9 ± 0.0	2.2 ± 0.1
ความแข็งแรงสูงสุด (MPa)	6.3 ± 0.2	4.9 ± 0.2
การยืดตัว ณ จุดขาด (%)	468 ± 12	475 ± 16
ความต้านทานแรงฉีกขาด (kN/m)	17.9 ± 0.5	17.5 ± 0.3
ความแข็งที่ผิว (Shore A)	64 ± 1	58 ± 1
สมบัติที่เปลี่ยนแปลงหลังการบ่มแรงชิ้นงานด้วยความร้อน*		
มอดูลัสแรงดึงที่ 200 % (MPa)	+0.3	+0.1
ความแข็งแรงสูงสุด (MPa)	-0.6	-1.2
การยืดตัว ณ จุดขาด (%)	-92	-106
ความต้านทานแรงฉีกขาด (kN/m)	+1.8	-1.4
ความแข็งที่ผิว (Shore A)	+2.0	+2
สมบัติที่เปลี่ยนแปลงหลังการบ่มแรงชิ้นงานด้วยความร้อนในน้ำมันไฮดรอลิก*		
มอดูลัสแรงดึงที่ 200 % (MPa)	-1.9	-1.5
ความแข็งแรงสูงสุด (MPa)	-4.1	-3.7
การยืดตัว ณ จุดขาด (%)	-17	-84
ความต้านทานแรงฉีกขาด (kN/m)	-6.7	-12.7
ความแข็งที่ผิว (Shore A)	-37	-43

* (+) หมายถึง สมบัติที่เพิ่มขึ้น และ (-) หมายถึง สมบัติที่ลดลงเมื่อเทียบกับก่อนบ่มแรง

4. สรุปผลการทดลอง

ผลการวิจัยพบว่า การปรับปรุงผิวเถ้าลอยโดยใช้สารคู่ควบไซเลนก่อนการผสมในวัสดุยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางคลอโรพรีนที่มีเถ้าลอยเป็นสารตัวเติมส่งผลให้สมบัติเชิงกลของวัสดุยางผสมดังกล่าวเพิ่มสูงขึ้นเมื่อพิจารณาชิ้นงานก่อนผ่านการบ่มเร่ง พบว่า การเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติส่งผลต่อสมบัติเชิงกลโดยรวมเล็กน้อย ส่วนการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยส่งผลให้ค่ามอดุลัสและความแข็งแรงที่ผิวเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ค่าความแข็งแรงสูงสุด การยึดตัว ณ จุดขาด และความต้านทานการฉีกขาดลดลง ส่วนอิทธิพลของสภาวะการบ่มเร่งด้วยความร้อนเมื่อเทียบกันชิ้นงานก่อนผ่านการบ่มเร่ง พบว่า ส่งผลให้สมบัติเชิงกลส่วนใหญ่เพิ่มสูงขึ้น ยกเว้นค่าความแข็งแรงสูงสุด และการยึดตัว ณ จุดขาด ส่วนผลของปริมาณยางธรรมชาติพบว่า ส่งผลให้สมบัติเชิงกลส่วนใหญ่ลดต่ำลง ยกเว้นค่ามอดุลัสและค่าความแข็งแรงที่ผิวที่พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย และเมื่อพิจารณาผลของปริมาณซิลิกาในเถ้าลอยพบว่าให้แนวโน้มเช่นเดียวกันกับผลของชิ้นงานก่อนผ่านการบ่มเร่ง สำหรับการบ่มเร่งด้วยความร้อนในน้ำมันส่งผลให้สมบัติเชิงกลทั้งหมดลดต่ำลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับชิ้นงานก่อนผ่านการบ่มเร่ง โดยเฉพาะวัสดุยางผสมที่มีสัดส่วนปริมาณยางธรรมชาติสูง ยกเว้นผลของค่าการยึดตัว ณ จุดขาด ในส่วนการเปรียบเทียบชิ้นงานจากผลิตภัณฑ์ทางการค้ากับวัสดุยางผสมสูตรวิจัย พบว่า วัสดุยางผสมระหว่างยางธรรมชาติต่อยางคลอโรพรีนที่สัดส่วน 25 ต่อ 75 ที่มีซิลิกาในเถ้าลอย 40 ส่วนในร้อยส่วน เป็นวัสดุยางผสมสูตรวิจัยที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ยางคลอโรพรีนทางการค้า

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยฯ ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2551

6. เอกสารอ้างอิง

1. Sae-oui, P., Sirisinha, C., Wantana, Th. and Hatthapanit, K., 2007, "Influence of Silica Loading on the Mechanical Properties and Resistance to

Oil and Thermal Aging of NR/CR Blends", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 104, No. 5, pp. 3478-3483.

2. Ismail, H. and Leong, H.C., 2001, "Curing Characteristics and Mechanical Properties of Natural Rubber/Chloroprene Rubber and Epoxidized Natural Rubber/Chloroprene Rubber Blends", *Polymer Testing*, Vol. 20, No. 5, pp. 509-516.

3. Ramesan, M.T., Alex. R. and Khanh, N.V., 2005, "Studies on the Cure and Mechanical Properties of Blends of Natural Rubber with Dichlorocarbene modified Styrene-Butadiene Rubber and Chloroprene Rubber", *Reactive and Functional Polymers*, Vol. 62, No. 1, pp. 41-50.

4. Sae-oui, P., Sirisinha, C., Thepsuwan, U. and Hatthapanit K., 2006, "Roles of Silane Coupling Agents on Properties of Silica-Filled Polychloroprene", *European Polymer Journal*, Vol. 42, No. 3, pp. 479-486.

5. วราภรณ์ ขจรไชยกูล, อัจฉรี ตระการวราภรณ์ และ ชูชาติ บารมี, 2545, "การพัฒนาทางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางคลอโรพรีนสำหรับการผลิตยางกันฝุ่น", *วารสารสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ*, ปีที่ 36, ฉบับที่ 2, หน้า 183-208.

6. ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ และศิรินทร ทองแสง, 2548, *รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์โครงการ สภาวะการผลิตและสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติที่มีเถ้าลอยเป็นสารเติมแต่ง*, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, หน้า 96-99.

7. ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, สุรเชษฐ์ จึงเกษมโชคชัย และวราภรณ์ คุณาวานากิจ, 2542, "คุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและกายภาพของเถ้าลอย", *วารสาร กฟผ.*, ปีที่ 8, ฉบับที่ 4, หน้า 13-23.

8. วราภรณ์ คุณาวานากิจ, 2540, "การวิเคราะห์ถ่านและเถ้าลิกไนต์ในโรงไฟฟ้า", *วารสาร กฟผ.*, ปีที่ 6, ฉบับที่ 7, หน้า 68-77.

9. สมชัย กกกำแหง, 2539, "ศักยภาพการนำเถ้าลอยลิกไนต์แม่เกาะไปใช้ประโยชน์", *วารสาร กฟผ.*, ปีที่ 5, ฉบับที่ 2, หน้า 48-57.

10. Garde, K., McGill, W.J. and Woolard, C.D., 1999, "Surface Modification of Fly Ash-Characterisation and Evaluation as Reinforcing Filler in Polyisoprene", *Plastics, Rubber and Composites*, Vol. 28, No. 1, pp. 1-10.
11. Sombatsompop, N. and Thongsang, S., 2006, "Effect of NaOH and Si-69 Treatments on the Properties of Fly Ash/Natural Rubber Composites", *Polymer Composites*, Vol. 27, No. 1, pp. 34-40.
12. ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ, เอกชัย วิมลมาลา และธีระศักดิ์ หมากรบิน, 2006, "การศึกษาวัสดุเชิงประกอบระหว่างเอสปีอาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นสารเติมแต่งโดยใช้สารคู่ควบไซเลนชนิด Si-69 สำหรับปรับปรุงผิวเถ้าลอย", *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.*, ปีที่ 29, ฉบับที่ 3, หน้า 353-373.
13. Hong-bo, Z. and Lu-bin, W., 2007, "Screening of Surface Medication Agents and Modification Mechanism of Fly Ash", *Journal of China University of Mining & Technology*, Vol. 17, No. 3, pp. 341-344.
14. ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ, เอกชัย วิมลมาลา และธีระศักดิ์ หมากรบิน, 2007, "อิทธิพลของการปรับปรุงผิวเถ้าลอยด้วย Si69 และการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่มีต่อสมบัติของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์", *วารสารสงขลานครินทร์ วทท.*, ปีที่ 29, ฉบับที่ 5, หน้า 1378-1391.
15. เอกชัย วิมลมาลา, กฤษรา คงนวล และณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ, 2552, *รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์โครงการยางเซลลูลาร์จากวัสดุผสมยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์สำหรับผลิตภัณฑ์ยางปะเก็นและยางรองกันกระแทก: เสริมแรงโดยผงเถ้าลอย พงชิลิกา และผงเขม่าดำ*, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, หน้า 45-54.
16. Buzar'e, J.Y., Silly, G., Emery, J., Boccaccio, G. and Rouault, E., 2001, "Aging Effects on Vulcanized Natural Rubber Studied by High Resolution Solid State ^{13}C -NMR", *European Polymer Journal*, Vol. 37, No. 1, pp. 85-91.