

สมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของวัสดุยางพาร์มอย่างธรรมชาติและยางคลอโรฟิลลิน ที่มีถ้าโลยเป็นสารตัวเติมภายในได้สภาวะบ่มเร่งด้วยความร้อนและน้ำมัน

นางลักษย คงวานิช¹ เอกชัย วิมลมาลา² ธีระศักดิ์ หมายกนิณ²
 ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ³ และ อภิสิทธิ์ โภษิตชัยยงค์^{4*}
 กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ (กลุ่มวิจัย P-PROF)
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ศึกษาสมบัติของวัสดุยางพาร์มอย่างธรรมชาติและยางคลอโรฟิลลินที่สัดส่วนการผสมต่างๆ โดยมีสารตัวเติมคือถ้าโลยที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารคุ้คุบใช้เลนปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของชิลิกาในถ้าโลยซึ่งปริมาณการเติมถ้าโลยในวัสดุยางพาร์มคิดเทียบจากปริมาณของชิลิกาที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในถ้าโลย โดยเติมในช่วง 0 ถึง 50 ส่วนในยางร้อยส่วน สำหรับการปรับเปลี่ยนสัดส่วนวัสดุยางพาร์มทำได้โดยการปรับปริมาณการเติมยางธรรมชาติที่ร้อยละ 0 10 25 50 และ 100 โดยน้ำหนัก ผลการวิจัยพบว่า การปรับปรุงผิวถ้าโลยด้วยสารคุ้คุบใช้เลนส่งผลต่อสมบัติเชิงกลเพิ่มสูงขึ้น ยกเว้นค่าการยึดตัว ณ จุดขาด และค่าความแข็งที่ผิว ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติส่งผลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมของวัสดุยางพาร์มในสภาวะก่อนการบ่มเร่งลดลงเล็กน้อย ในขณะที่ชั้นงานที่ผ่านการบ่มเร่งเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลโดยรวมโดยมีค่าลดลงอย่างชัดเจน ส่วนผลของการเพิ่มปริมาณถ้าโลยส่งผลให้ค่ามอดดูลัสและความแข็งที่ผิวของวัสดุยางพาร์มเพิ่มสูงขึ้นในขณะที่ค่าความแข็งแรงสูงสุดจะยึดตัว ณ จุดขาด และความต้านทานการฉีกขาดลดต่ำลง สำหรับอัตราพอลิเมอร์ของการบ่มเร่งวัสดุยางพาร์มพบว่า ชั้นงานที่ผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนมีสมบัติเชิงกลส่วนใหญ่เพิ่มสูงขึ้น ยกเว้นค่าความแข็งแรงสูงสุด และการยึดตัว ณ จุดขาดทั้งนี้เกิดจากผลของการบ่มตัวต่อเนื่องหลังปฏิริยาลักษณะในเชื้อเพลิงของยาง สำหรับการบ่มเร่งด้วยความร้อนในน้ำมันส่งผลต่อสมบัติเชิงกลทั้งหมดมีค่าลดต่ำลงอย่างชัดเจน โดยเฉพาะวัสดุยางพาร์มที่มีสัดส่วนปริมาณยางธรรมชาติสูง วัสดุยางพาร์มที่มียางธรรมชาติต่อยางคลอโรฟิลลินในสัดส่วน 25 ต่อ 75 และมีถ้าโลยผสมอยู่ที่ปริมาณ 40 ส่วนในยางร้อยส่วน มีสมบัติเชิงกลโดยรวมที่ดีเมื่อเทียบกับการผลิตภัณฑ์ยางคลอโรฟิลลินทางการค้า

คำสำคัญ : ยางคลอโรฟิลลิน / ยางธรรมชาติ / ถ้าโลย / 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 Kongvasana¹, Ekachai Wimolmala², Teerasak Markpin²,
Narongrit Sombatsompop³, 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 การผสมกันระหว่างยางคลอโรพรีน และยางธรรมชาติ มีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถทนทานต่อน้ำมันหรือตัวทำลายที่ไม่มีข้าว โดยยังคงสมบัติความแข็งแรง เนื่องจากยางหั้งสองชนิดสามารถเกิดผลึกได้เมื่อได้รับการดึงยืด (Strain-induced crystallization) จึงทำให้ยางผสมคุณภาพดีรับความสนใจและการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อสามารถที่จะนำไปใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ผลิตภัณฑ์ยางรองเทาในเครื่องจักรอุตสาหกรรม ยางชีล ยางหุ้มสายเคเบิล และยางหุ้มสายไฟฟ้าหัวเทียนได้ [1] เมื่อพิจารณาสัดส่วนผสมแล้ว พนักงานสัดส่วนของยางธรรมชาติและยางคลอโรพรีนในวัสดุผสม ที่ทำให้มีสมบัติการทนทานต่อน้ำมัน และสภาพแวดล้อมได้ดีนั้น เป็นสัดส่วนผสมที่มีปริมาณยางคลอโรพรีนมากกว่ายางธรรมชาติ โดยมียางคลอโรพรีนอย่างน้อยร้อยละ 50 ในเนื้อวัสดุผสม [2-3] อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาในด้านของต้นทุนการผลิตแล้วยางคลอโรพรีนมีราคาสูงกว่ายางธรรมชาติตึง 2 เท่า

สารตัวเติมเสริมแรงที่นิยมใช้ในวัสดุยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางคลอโรพรีน คือ ผงเขม่าดำเนะซิลิกา [4-5] จากรายงานการวิจัยที่ผ่านมา [6-9] พบว่า เถ้าโลยที่ได้จากการเผาถ่านหินซึ่งจัดเป็นวัสดุเหลือใช้และมีลักษณะเฉพาะคือการมีรูปร่างอนุภาคที่ค่อนข้างกลมนั้น มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบในปริมาณที่สูงถึงร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก และพบว่า การปรับปรุงผิวถ้วยโลยด้วยสารคู่ควบคุมประจุ (Silane coupling agent) [6] [10-13] สามารถเพิ่มสมบัติของวัสดุยางผสมได้ Sombatsompop และ Thongsang [11] ได้ศึกษาผลของการใช้ Bis [3-(triethoxysilyl) propyl] tetrasulfide, Si69 เพื่อปรับปรุงพื้นผิวของถ้วยโลยที่ผสมอยู่ในยางธรรมชาติ พบว่า ปริมาณ Si-69 ที่ใช้ผสมในถ้วยโลยที่เหมาะสมอยู่ในช่วงร้อยละ 2.0-4.0 โดยน้ำหนักของซิลิกาในถ้วยโลย โดยสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการยึดเกาะกันระหว่างยางธรรมชาติกับถ้วยโลยและส่งผลให้สมบัติเชิงกลเพิ่มสูงขึ้น Ismail และ Leong [2] ได้ศึกษาสมบัติการสกัดและสมบัติเชิงกลของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน พบว่า ค่ามอดดูลัสแรงดึงดีและค่าความแข็งที่ผิวให้ค่าสูงสุดที่อัตราส่วนผสมของยางธรรมชาติต่อยาง

คลอโรพรีนเป็น 25 ต่อ 75 โดยน้ำหนัก Ramesan และคณะ [3] ศึกษาสมบัติการสกัดตัวและสมบัติเชิงกลของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน (NR/CR) พบว่า เวลาการให้กลก่อนการสกัดเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณยางคลอโรพรีน โดยสมบัติเชิงกลได้แก่ ความแข็งแรงสูงสุด และความแข็งที่ผิวมีค่าสูงที่สุดที่สัดส่วนระหว่างยางธรรมชาติต่อยางคลอโรพรีนเท่ากับ 30 ต่อ 70 โดยน้ำหนัก

สำหรับในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาผลของสัดส่วนวัสดุยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางคลอโรพรีนที่มีถ้วยโลยเป็นสารตัวเติม โดยเปรียบเทียบผลของการบ่มร่วงชั้นงานในสภาวะต่างๆ ตามมาตรฐานสากล ได้แก่ การบ่มร่วงด้วยความร้อน และการบ่มร่วงด้วยความร้อนในน้ำมันไฮดรอลิก ที่มีต่อสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพของชั้นงานวัสดุยางผสม นอกจากนี้ ได้ทำการเลือกสูตรวัสดุผสมที่มีสมบัติทางกลที่เหมาะสมที่สุด เพื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลกับแผ่นยางคลอโรพรีนทางการค้า

2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

2.1 วัสดุดิบและสารเคมีที่ใช้

- ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) เกรด STR20 จาก บริษัท สยามชาน จำกัด
- ยางคลอโรพรีน (Chloroprene rubber, CR) เกรด W จาก บริษัท ดูปองท์ จำกัด

● สารคู่ควบคุมประจุไซเลน (Silane coupling agent) ชนิด bis-(3-triethoxysilylpropyl) tetrasulfide (Couplink89), $[(C_2H_5O)_3Si-(CH_2)_3-S_4-(CH_2)_3-Si-(C_2H_5O)_3]$ จาก บริษัท Zhenjiang Wholemark Fine Chemical จำกัด

● สารกระตุนปฏิกิริยาการคงรูป (Activators) ชนิด Zinc oxide (ZnO) จากบริษัท ยูนิเวนเจอร์ จำกัด (มหาชน) Stearic acid จากบริษัท เคเมลูน อินเตอร์เนชันแนล จำกัด และ Magnesium oxide (MgO) จาก บริษัท โคนิซิมาเคมีคอล 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

- สารช่วยในการคงรูปยาง (Curing agent) ชนิดกำมะถัน (Sulfur) โดยใช้ขนาด 325 mesh จากบริษัทสยาม เมมี จำกัด (มหาชน)

- สารป้องกันการเสื่อมสภาพจากออกซิเจนและสภาวะแวดล้อม (Antioxidant) ชนิด 2,2,4-Trimethyl-1,2-dihydroquinoline (TMQ) เกรด Rubatan 184 จากบริษัท General Quimica S.A. จำกัด

- สารตัวเติม (Filler) ชนิดเดือย (Fly ash) ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ของโรงงานผลิตกระเบ้าไฟฟ้า แม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งมีองค์ประกอบของซิลิกาอยู่ประมาณร้อยละ 40 ร่วมกับออกไซด์ชนิดอื่นๆ เช่น อะลูมิเนียมออกไซด์ เหล็กออกไซด์ เป็นต้น ขนาดอนุภาคไม่เกิน 125 ไมครอน มีความหนาแน่น 2.65 g/cm.³ จากบริษัท K.N.R. Group จำกัด

2.2 ขั้นตอนการผสมและการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ในงานวิจัยนี้ ได้กำหนดสัดส่วนวัสดุยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางคลอร์โพรีน โดยการปรับสัดส่วนการเติมยางธรรมชาติในยางคลอร์โพรีนที่ร้อยละ 0 10 25 50 และ 100 สำหรับการผสมเต้าloy ในวัสดุยางผสมจะคิดเทียบจากการเม็ดลิกในวัสดุยางผสมดังกล่าวที่ปริมาณ 0 10 20 30 40 และ 50 ส่วนในยางร้อยส่วน ทั้งนี้ที่ปริมาณดังกล่าวเทียบเท่ากับการเม็ดลิกอยู่ในวัสดุยางผสมที่ปริมาณ 0 25 50 75 100 และ 125 ส่วนในยางร้อยส่วน ซึ่งเดือยที่ใช้ได้ผ่านกระบวนการปรับปรุงผิวด้วยสารคุกคุวประเทกไซเลนโดยผสมในเดือยปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก [12] ส่วนประกอบของสูตรวัสดุยางผสมในงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 หน้าที่และปริมาณของสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

สารเคมี	หน้าที่	ปริมาณ (phr*)
1. ยางธรรมชาติ (NR:STR20) : ยางคลอร์โพรีน (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. ทีเอ็มควิโน (Trimethylhydroquinone, TMQ)	สารแอนตี้ออกซิเดนซ์	1.0
5. เอ็มบีทีเอส (Dibenzothiazyl disulfide, MBTS)	ตัวเร่งปฏิกิริยา	1.0
6. ทีเอ็มทีดี (Tetramethylthiuram disulfide, TMTD)	ตัวเร่งปฏิกิริยา	1.0
7. เมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide)	ตัวเร่งปฏิกิริยา	4.0
8. เอทิลีนไธโอยูเรีย (Ethylene thiourea, ETU)	ตัวเร่งปฏิกิริยา	0.6
9. ซิลิกาในเดือย (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 เริ่มจากการบดยางด้วยเครื่องบดผสมลูกกลังคู่ (Two roll mill) ของบริษัท Yong Fong Machinery จำกัด แล้วเติมวัตถุดิบต่างๆ ตามลำดับการผสมและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัยดังตารางที่ 1 โดยใช้เวลาในการบดผสม 35 นาที อุณหภูมิเริ่มต้นในการผสมที่ 25 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธิ์ไม่เกินร้อยละ 50

- การหาเวลาที่ใช้ในการคงรูปยาง จากการทดสอบโดยใช้เครื่อง Oscillating Disk Rheometer (ODR) ของ

บริษัท GOTECH Testing Machine รุ่น GT 70-70-S2 ตามมาตรฐาน ASTM D2084-01 อุณหภูมิทดสอบ 160 องศาเซลเซียส เพื่อหาค่าเวลาในการคงรูปที่ร้อยละ 90 (t_{c90})

- การเตรียมชิ้นงานทดสอบ โดยนำยางคอมปาร์ทที่เตรียมได้จากเครื่องบดผสมลูกกลังคู่นำไปขันรูปเป็นแผ่นชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องอัดขันรูปปั๊ว (Hot press) ของบริษัท LAB TECH จำกัด อุณหภูมิที่ใช้ในการขันรูป 160

องค์การเซลเซียส แรงดันแม่พิมพ์ที่ 170 กก./ซม.² หลังจากนั้นตัดเป็นชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบ

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

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 จากริชชัท Tech Lock จำกัด ตามมาตรฐาน ASTM D2240-05 Shore A

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

สมบัติเชิงกายภาพ

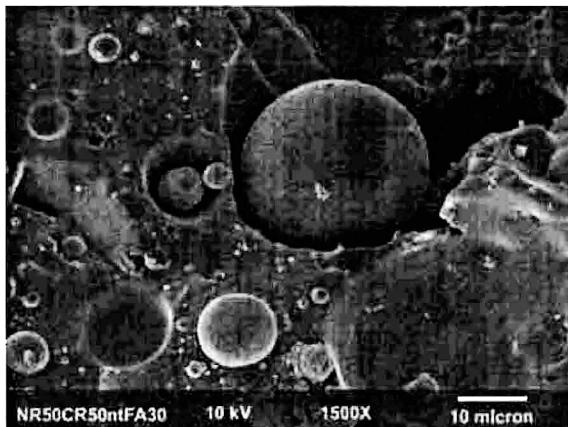
การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและการกระจายตัวของเดาโลยในวัสดุยางผสมใช้กล้องจุลทรรศน์

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

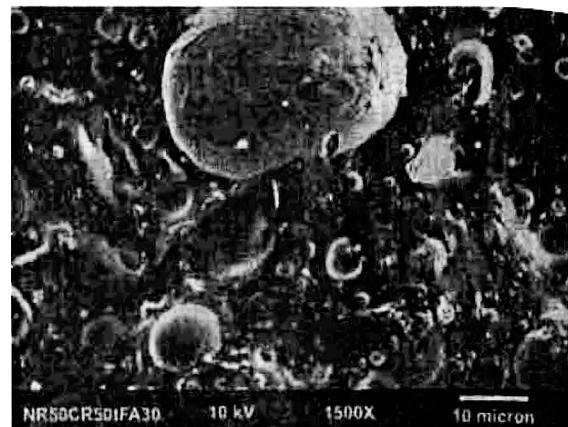
ผลการวิจัยส่วนนี้ ได้แสดงการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางคลอร์ไพรินที่สัดส่วนการผสม 50 ต่อ 50 โดยมีชิลิกาในเดาโลยชนิดไม่ปรับปรุงและปรับปรุงผิวผสมอยู่ในปริมาณ 30 ส่วนในยางร้อยส่วน เป็นสารตัวเติมผลการทดลองในตารางที่ 2 พบว่า การปรับปรุงผิวเดาโลยด้วยสารคู่ควบไชเลนส์เพลทให้สมบัติเชิงกลของวัสดุยางผสมดังกล่าวเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากสารคู่ควบไชเลนเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวของเดาโลยในเนื้อของวัสดุรวมทั้งสารดังกล่าวยังสามารถทำหน้าที่เชื่อมโยงระหว่างเฟลของยางกับเดาโลย โดยอาศัยหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของสารคู่ควบไชเลนที่ยึดเกาะกับหมู่ฟังก์ชันชนิดไฮdroกซิล (-OH) ของชิลิกาในเดาโลย [14] จากรูปที่ 1 สามารถสังเกตเห็นได้ว่าเฟลของยางกับเดาโลยในกรณีที่มีการปรับปรุงผิวติดกัน (รูปที่ 1-ช) อย่างไรก็ตาม สำหรับค่าการยึดตัว ณ จุดขาด ของวัสดุผสมในกรณีที่ใช้เดาโลยชนิดปรับปรุงผิวมีค่าลดต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจาก ผลของการเชื่อมกันระหว่างเฟลของยางและเดาโลยนั้นทำให้ความสามารถในการยึดตัวของยางลดลง

ตารางที่ 2 สมบัติเชิงกลของวัสดุยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางคลอร์ไพรินที่สัดส่วน 50 ต่อ 50 ปริมาณชิลิกา ในเดาโลย 30 ส่วนในยางร้อยส่วน

เดาโลย	มอดูลัสที่ระยะยืด 200 เมอร์เซนต์ (MPa)	ความแข็งแรง สูงสุด (MPa)	ระยะการยืด ณ จุดขาด (%)	ความต้านทานการฉีกขาด (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) เถ้าloyที่ไม่ปรับปรุงผิว



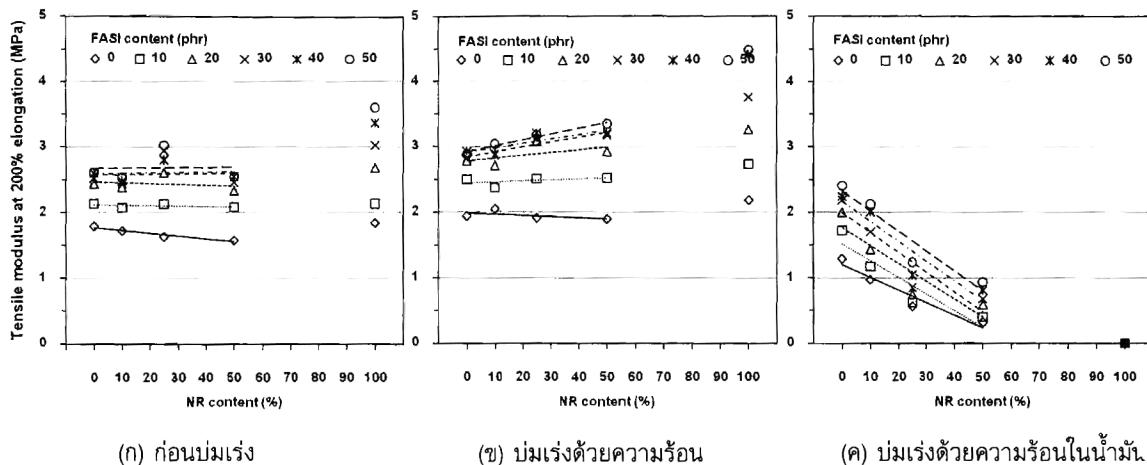
(ข) เถ้าloyที่ปรับปรุงผิว

รูปที่ 1 ภาพสัมผaanวิทยาของวัสดุยางพสมะห่วงยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีนที่สัดส่วน 50 ต่อ 50 ปริมาณชิลิกาในเถ้าloy 30 ส่วนในยางร้อยส่วน

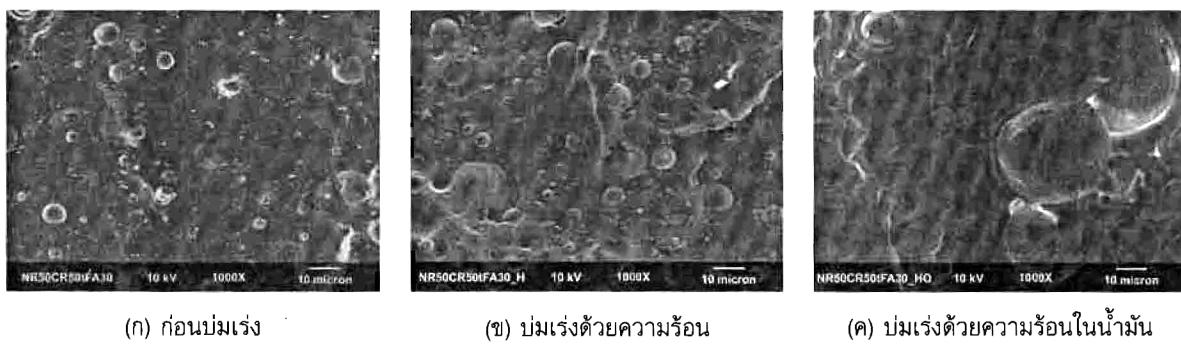
สำหรับการเปรียบเทียบผลของสภาวะการบ่มเร่งของวัสดุยางพสมใช้เถ้าloyชนิดปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบคุมใช้เลนโดยทำการศึกษาสมบัติเชิงกลด้านต่างๆ ได้แก่ สมบัติการทนแรงดึง สมบัติความด้านทานการฉีกขาด และความแข็งที่ผิว ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2-6

รูปที่ 2 แสดงผลการทดสอบค่ามอดุลัสของวัสดุยางพสมที่ระยะยืด 200 เปอร์เซ็นต์ สำหรับในการนีการทดสอบชิ้นงานก่อนการบ่มเร่ง พบว่า การเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติในวัสดุยางพสมส่งผลให้ค่าดังกล่าวลดลงเล็กน้อย เนื่องจากยางหักสองชนิดที่ใช้ในการวิจัยนี้ มีความแข็งแกร่งใกล้เคียงกัน สังเกตได้จากค่ามอดุลัสของยางธรรมชาติและยางคลอโรพรีนก่อนนำมาผสมกัน ส่วนการเพิ่มปริมาณชิลิกาในเถ้าloyพบว่าค่ามอดุลัสเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเป็นผลมาจากการบดของเถ้าloyที่จัดเป็นอนุภาคที่มีความแข็งสูงกว่ายาง สำหรับในการนีการบ่มเร่ง ด้วยความร้อนส่งผลให้ค่ามอดุลัสของวัสดุยางพสมเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้คาดว่าเกิดจากผลของการสูญตัวหลังการเกิดปฏิกิริยา วัลคาไนเซชันที่เกิดขึ้นระหว่างการขึ้นรูป หรือเรียกว่าการเกิด Post curing ซึ่งส่งผลให้สายโซ่เชื่อมโยงหรือพันธะกำมะถันระหว่างโมเลกุลเปลี่ยนจากสายโซ่ยาว (Poly-sulfidic) เป็นสายโซ่ที่มีขนาดสั้นลง (Mono- หรือ Di-sulfidic) และส่งผลทำให้ความหนาแน่นของพันธะเชื่อม

ขาวเพิ่มสูงขึ้น [1] สำหรับกรณีบ่มเร่งด้วยความร้อนในน้ำมันไฮดรอลิก พบว่า ค่ามอดุลัสลดต่ำลงอย่างชัดเจนตามปริมาณยางธรรมชาติ ทั้งนี้คาดว่ามีสาเหตุมาจากยางธรรมชาติมีความด้านทานทันต่อน้ำมันที่ต่ำกว่ายางคลอโรพรีนมาก ดังนั้นที่อุณหภูมิสูงจึงทำให้น้ำมันสามารถแทรกตัวอยู่ห่วงโมเลกุลของวัสดุยางพสมได้ง่าย เกิดปรากฏการณ์พลาสติไซเซชัน (Plasticization Effect) ส่งผลให้วัสดุยางพสมนีมีความยืดหยุ่นมากขึ้น ทำให้วัสดุมีค่ามอดุลัสต่ำลงโดยเฉพาะวัสดุยางพสมที่มีปริมาณยางธรรมชาติมาก จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลข้างต้นสามารถสังเกตได้จากภาพถ่ายสัมผaanวิทยาของวัสดุยางพสมที่แสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งเป็นวัสดุยางพสมที่มีปริมาณยางธรรมชาติร้อยละ 50 และมีชิลิกาในเถ้าloyอยู่ที่ปริมาณ 30 ส่วนในยางร้อยส่วน จะสังเกตเห็นว่าภาพถ่ายชิ้นงานกรณีที่ผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนในน้ำมันไฮดรอลิกมีความชรุขรุ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากปรากฏการณ์พลาสติไซเซชันและการบวนตัวที่สูงขึ้นของวัฎกากยาง (รูปที่ 3-ค) ซึ่งคาดว่า ผลของการแซชิ้นงานในน้ำมันที่อุณหภูมิสูง ทำให้น้ำมันสามารถแทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยาง ในขณะที่ลักษณะวิทยาของชิ้นงานในกรณีผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน (รูปที่ 3-ข) ไม่พบการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับกรณีชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการบ่มเร่ง (รูปที่ 3-ก)



รูปที่ 2 มอดูลัสที่ระยายปิด 200 เปอร์เซ็นต์ ของวัสดุยางพสมะห่วงยางธรรมชาติและยางคลอโรพรีนที่มีชิลิกาในเดาลอย ผสมอยู่ปริมาณต่างๆ (ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 0.05)



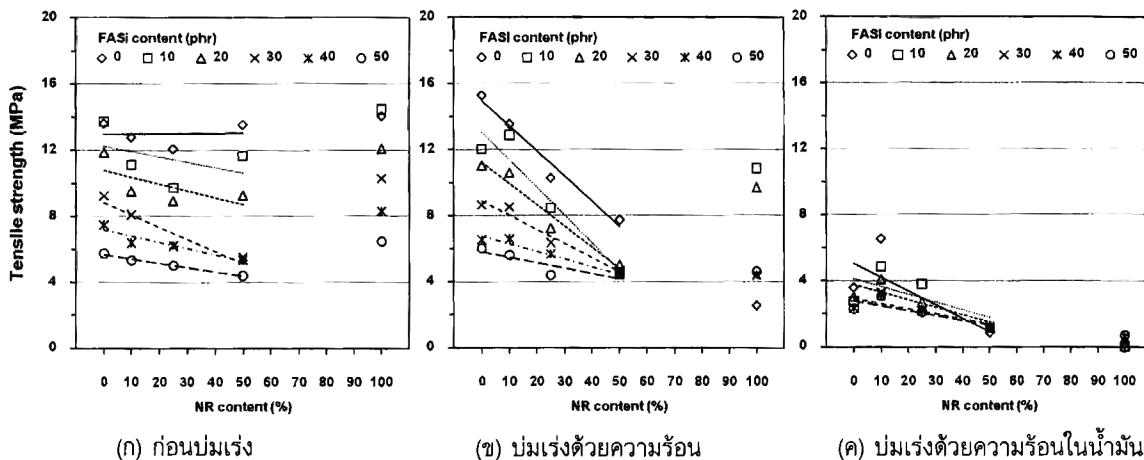
รูปที่ 3 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุยางพสมเปรียบเทียบที่สภาวะบ่มเร่งต่างๆ (วัสดุยางพสมะห่วงยางคลอโรพรีนกับยางธรรมชาติที่สัดส่วน 50 ต่อ 50 ที่มีปริมาณชิลิกาในเดาลอย 30 ส่วนในยางร้อยส่วน)

ค่าความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุยางพสม แสดงดังรูปที่ 4 พบว่า กรณีการทดสอบชิ้นงานก่อนการบ่มเร่ง การเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติสิ่งผลต่อสมบัติดังกล่าวเล็กน้อย ทั้งนี้ มีเหตุผลเช่นเดียวกับกรณีการทดสอบชิ้นงานหลังการบ่มเร่ง พบร่วมกับผลของการเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติทำให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดลดลงอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากยางธรรมชาติมีความว่องไวต่อสภาวะการบ่มเร่งมากกว่ายางคลอโรพรีน ส่วนการเพิ่มปริมาณเดาลอยพบว่าค่าความแข็งแรงสูงสุดลดต่ำลง

เนื่องจาก วัสดุยางพสมมีเฟลของยางลดลง รวมทั้งผลของการที่อนุภาคเดาลอยทำให้เฟลของยางเกิดความไม่ต่อเนื่องหรือมีจุดบกพร่องเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ยังคาดว่า เนื่องจากอนุภาคเดาลอยที่มีขนาดใหญ่ในวัสดุยางพสมเกิดการแตกออกเป็นอนุภาคขนาดเล็กขณะทำการบดผสมทำให้อนุภาคของเดาลอยบางส่วนที่ไม่ได้รับการบดปัจจุบันด้วยไซเลนเป็นจุดบกพร่องในชิ้นงาน และเกิดความไม่ต่อเนื่องของเฟลยาง [15] สำหรับกรณีการบ่มเร่งชิ้นงานด้วยความร้อนพบว่า วัสดุยางพสมมีค่าความแข็งแรงลดลงเล็ก

น้อย เนื่องจากผลของการเกิด Post curing [16] ส่วน
กรณีบ่มเร่งด้วยความร้อนในน้ำมันไอกرومลิก พบว่า ค่า

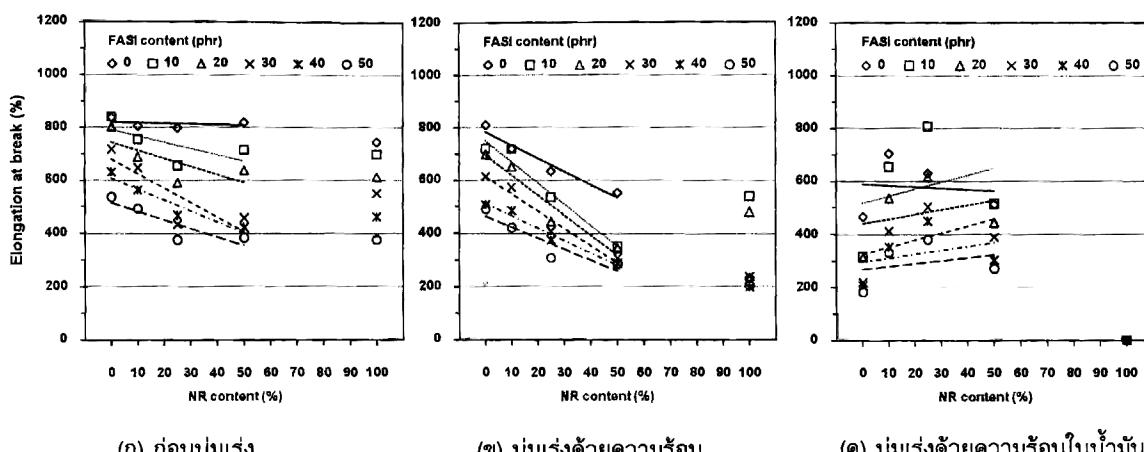
ความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุยางพสมลดลงอย่างชัดเจน
โดยมีคำอธิบายเช่นเดียวกับผลการทดสอบค่ามอดูลัส



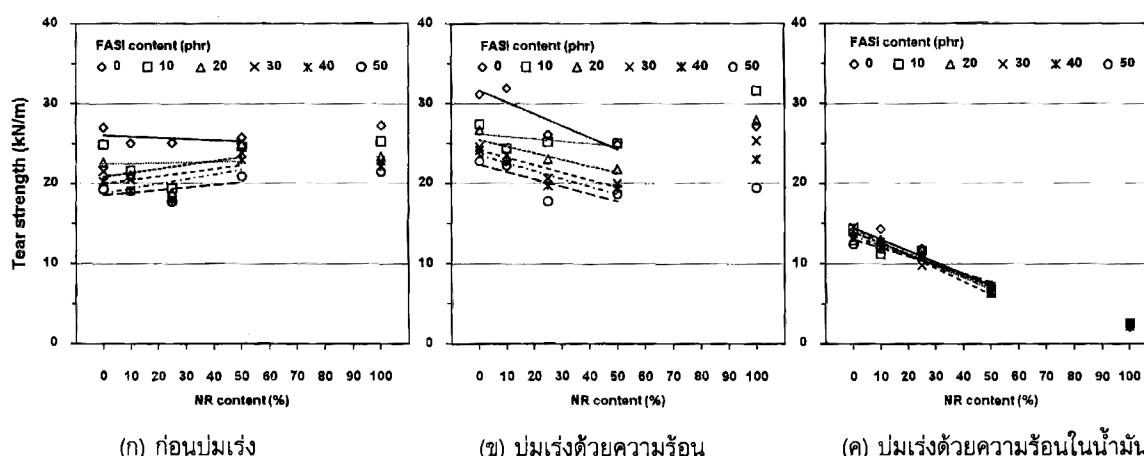
รูปที่ 4 ความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุยางพสมระหว่างยางธรรมชาติและยางคลอร์พาร์ฟินที่มีชิลิกาในเด้าโลยพสมอยู่
ปริมาณต่างๆ (ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 0.4)

ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของวัสดุยางพสมแสดงดังรูปที่ 5 ผลของปริมาณยางธรรมชาติ พบว่า ส่งผลให้ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของชิ้นงานก่อนการบ่มเร่งลดลงเล็กน้อย ส่วนกรณีชิ้นงานหลังผ่านการบ่มเร่ง พบว่า ปริมาณยางธรรมชาติส่งผลให้สมบัติดังกล่าวลดต่ำลง โดยมีคำอธิบาย เช่นเดียวกับค่าความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุยางพสม ส่วน การเพิ่มปริมาณชิลิกาในเด้าโลย พบว่า ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของวัสดุยางพสมลดต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุยางพสมมีเฟสของยางลดลง รวมทั้งผลของการท่ออุภาคนเด้าโลยทำให้เฟสของยางเกิดความไม่ต่อเนื่องหรือมีจุดบกพร่องเพิ่มสูงขึ้น สำหรับผลของการบ่มเร่งด้วยความร้อนพบว่า ส่งผลให้สมบัติดังกล่าวลดต่ำลงเมื่อเทียบกับชิ้นงานก่อนผ่านการบ่มเร่ง ทั้งนี้คาดว่าเนื่องจากการเกิด Post curing เมื่อพิจารณาผลของการบ่มเร่งด้วยความร้อนในน้ำมันไอกرومลิก พบว่า ผลของการเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติที่ส่งผลต่อค่าดังกล่าวมีแนวโน้มไม่ชัดเจน อย่างไรก็ตามสำหรับชิ้นงานที่เป็นยางธรรมชาติ ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าต่ำมาก

รูปที่ 6 แสดงค่าความต้านทานการฉีกขาดของวัสดุยางพสม สำหรับการทดสอบชิ้นงานก่อนการบ่มเร่ง พบว่า การเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติในวัสดุยางพสมไม่ส่งผลต่อค่าความต้านทานการฉีกขาด ส่วนผลกระทบดังกล่าวในกรณีการทดสอบชิ้นงานหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนและ การบ่มเร่งด้วยความร้อนในน้ำมันไอกرومลิกส่งผลให้ค่าความต้านทานการฉีกขาดของวัสดุยางพสมลดลง ในขณะที่ผลของการเพิ่มปริมาณชิลิกาในเด้าโลยส่งผลให้สมบัติดังกล่าวลดต่ำลงทั้งกรณีก่อนและหลังการบ่มเร่ง โดยการบ่มเร่งด้วยน้ำมันไอกرومลิกมีผลทำให้วัสดุยางพสมมีความต้านทานการฉีกขาดลดลงมากที่สุด ซึ่งจะสังเกตเห็นว่ามีค่าใกล้เคียงกันทุกสัดส่วนการทดสอบชิลิกาในเด้าโลยอีกด้วย ทั้งนี้สามารถอธิบายเช่นเดียวกับผลการทดสอบค่าความแข็งแรงสูงสุด ซึ่งจะสังเกตเห็นว่ามีค่าใกล้เคียงกันทุกสัดส่วนการทดสอบชิลิกาในเด้าโลยอีกด้วย ทั้งนี้สามารถ



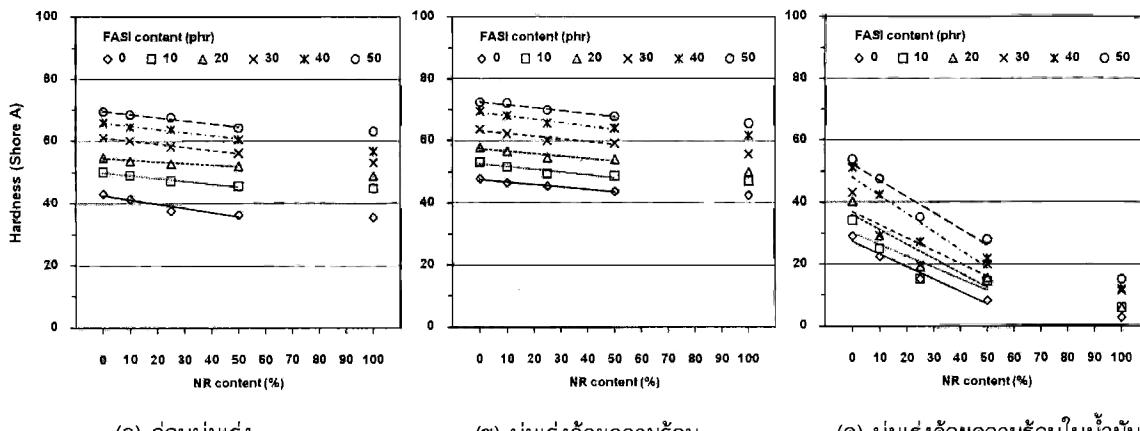
รูปที่ 5 ระยะการยืดตัว ณ จุดขาด ของวัสดุยางพสมะห่วงยางธรรมชาติและยางคลอโรพրีนที่มีชิลิกาในเด้าโลย
ผสมอยู่ปริมาณต่างๆ (ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 19)



รูปที่ 6 ความต้านทานการฉีกขาดของวัสดุยางพสมะห่วงยางธรรมชาติและยางคลอโรพรีนที่มีชิลิกาในเด้าโลย
ผสมอยู่ปริมาณต่างๆ (ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 1.1)

ผลการทดลองค่าความแข็งที่ผิวของวัสดุยางพสมะห่วงยางธรรมชาติและยางคลอโรพรีน แสดงในรูปที่ 7 พบว่า ผลการทดลองสอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติมอดุลล์ของวัสดุยางพสมะห์ โดยเฉพาะผลกระทบของการ

เพิ่มปริมาณเด้าโลยนั้น ส่งผลต่อค่าความแข็งที่ผิวอย่างชัดเจน เนื่องจากอนุภาคเด้าโลยที่ผสมในวัสดุยางพสมะห์ ความแข็งแกร่งสูง (Rigidity) จึงทำให้การวัดความแข็งที่ผิวของชั้นงานมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณเด้าโลย



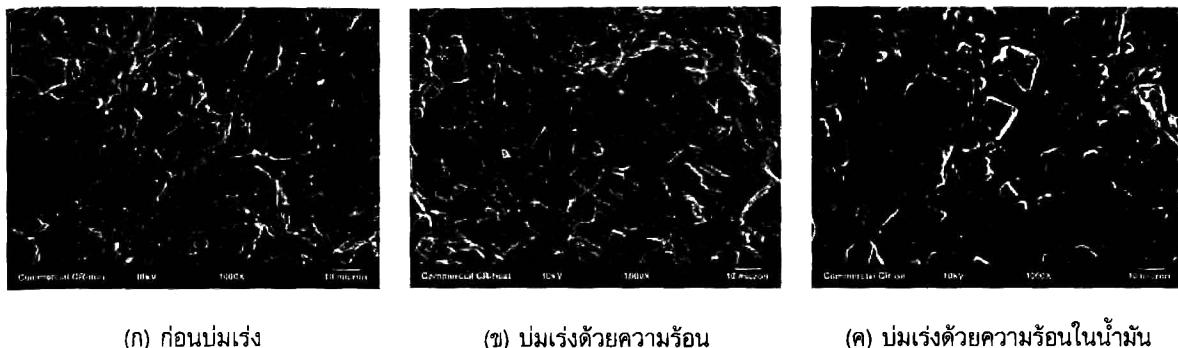
รูปที่ 7 ความแข็งที่ผิวของวัสดุยางพสมะห่วงยางธรรมชาติและยางคลอโรพรีนที่มีเต้าลอยผสมอยู่ปริมาณต่างๆ
(ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 0.5)

การเปรียบเทียบระหว่างวัสดุยางพสมสูตรวิจัยและผลิตภัณฑ์ยางคลอโรพรีนทางการค้า

ในส่วนนี้ ได้ทำการคัดเลือกและเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุยางพสมในงานวิจัยนี้กับผลิตภัณฑ์ยางคลอโรพรีนทางการค้าในด้านสมบัติเชิงกลทั่วไปและต้นทุนราคาวัสดุติด โดยชิ้นงานจากผลิตภัณฑ์ทางการค้าเป็นยางคลอโรพรีนแผ่นเรียบ ชิ้นรูปด้วยเครื่องอัดชิ้นรูปร้อนแผ่นยางดังกล่าวมีความกว้าง 30 ซม. ความยาว 30 ซม. และความหนา 2 มม. จากบริษัท ยังไทรการยาง จำกัด ซึ่งชิ้นงานจากผลิตภัณฑ์ทางการค้าเป็นสูตรผลิตภัณฑ์ที่ใช้งานเป็นยางรองเครื่องจักร สายพาน และห่อยาง โดยสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางคลอโรพรีนทางการค้า เปรียบเทียบกับวัสดุยางพสมะห่วงยางธรรมชาติและยางคลอโรพรีนที่สัดส่วนการผสม 25 ต่อ 75 ที่ปริมาณชิลิกาในเต้าลอย 40 ส่วนในยางพสมหนึ่งช้อนส่วน ภายใต้สภาวะการบ่มเร่งต่างๆ ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 3

ซึ่งพบว่า สมบัติเชิงกลโดยรวมของยางพสมที่พัฒนาขึ้นและผลิตภัณฑ์ยางคลอโรพรีนทางการค้ามีค่าใกล้เคียงกัน ผลกระทบของสภาวะการบ่มเร่งด้วยความร้อนและการบ่มเร่งด้วยความร้อนในน้ำมันของยางพสมที่พัฒนาขึ้น และผลิตภัณฑ์ยางคลอโรพรีนทางการค้าก็เปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน

สำหรับสภาพสัณฐานวิทยาของชิ้นงานจากผลิตภัณฑ์ยางคลอโรพรีนทางการค้า ที่สภาวะการบ่มเร่งต่างๆ แสดงดังรูปที่ 8 โดยทั้งนี้คุณะผู้วิจัยไม่ได้ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบและส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ดังกล่าวอย่างไรก็ตาม จากการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวระดับจุลภาคของยางคลอโรพรีนทางการค้า สามารถสังเกตได้ว่าความไม่ต่อเนื่องในเฟลของยางทั้งในกรณีก่อนการบ่มเร่งและหลังการบ่มเร่ง ทำให้เชื่อได้ว่าผลิตภัณฑ์ยางคลอโรพรีนทางการค้ามีการเติมสารเติมแต่งชนิดอื่นๆ



(ก) ก่อนบ่มเร่ง

(ข) บ่มเร่งด้วยความร้อน

(ค) บ่มเร่งด้วยความร้อนในน้ำมัน

รูปที่ 8 ภาพสัมฐานวิทยาของยางคลอโรพรีนทางการค้าเปรียบเทียบที่สภาวะบ่มเร่งต่างๆ

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลระหว่างวัสดุยางผสมที่ได้จากการวิจัยและชั้นงานยางคลอโรพรีนทางการค้า

สมบัติ	วัสดุยางผสม NR:CR ที่สัดส่วน 25 : 75 ปริมาณเชิงคิด ในเดาอย 40 phr	ยางคลอโรพรีน ทางการค้า
ก่อนการบ่มเร่งชั้นงาน		
มอดุลัสแรงดึงที่ 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
ความต้านทานแรงเฉียบชาต (kN/m)	17.9 ± 0.5	17.5 ± 0.3
ความแข็งที่ผิว (Shore A)	64 ± 1	58 ± 1
สมบัติที่เปลี่ยนแปลงหลังการบ่มเร่งชั้นงานด้วยความร้อน*		
มอดุลัสแรงดึงที่ 200 % (MPa)	+0.3	+0.1
ความแข็งแรงสูงสุด (MPa)	-0.6	-1.2
การยืดตัว ณ จุดขาด (%)	-92	-106
ความต้านทานแรงเฉียบชาต (kN/m)	+1.8	-1.4
ความแข็งที่ผิว (Shore A)	+2.0	+2
สมบัติที่เปลี่ยนแปลงหลังการบ่มเร่งชั้นงานด้วยความร้อนในน้ำมันไฮดรอลิก*		
มอดุลัสแรงดึงที่ 200 % (MPa)	-1.9	-1.5
ความแข็งแรงสูงสุด (MPa)	-4.1	-3.7
การยืดตัว ณ จุดขาด (%)	-17	-84
ความต้านทานแรงเฉียบชาต (kN/m)	-6.7	-12.7
ความแข็งที่ผิว (Shore A)	-37	-43

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

4. สรุปผลการทดลอง

ผลการวิจัยพบว่า การปรับปรุงผิวเด้าโลยโดยใช้สารคูนไชเลนก่อนการผสมในวัสดุยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางคลอร์โพรีนที่มีเด้าโลยเป็นสารตัวเติมส่งผลให้สมบัติเชิงกลของวัสดุยางผสมดังกล่าวเพิ่มสูงขึ้น เมื่อพิจารณาชั้นงานก่อนผ่านการบ่มเร่ง พบว่า การเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติส่งผลต่อสมบัติเชิงกลโดยรวมเล็กน้อย ส่วนการเพิ่มปริมาณเด้าโลยส่งผลให้ค่ามอดุลล์และความแข็งที่ผิวเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ค่าความแข็งแรงสูงสุด การยืดตัว ณ จุดขาด และความต้านทานการเจ็χาดลดลง ส่วนอิทธิพลของสภาวะการบ่มเร่งด้วยความร้อนเมื่อเทียบกับชั้นงานก่อนผ่านการบ่มเร่ง พบว่า ส่งผลให้สมบัติเชิงกล ส่วนใหญ่เพิ่มสูงขึ้น ยกเว้นค่าความแข็งแรงสูงสุด และการยืดตัว ณ จุดขาด ส่วนผลของปริมาณยางธรรมชาติพบว่า ส่งผลให้สมบัติเชิงกลส่วนใหญ่ลดต่ำลง ยกเว้นค่ามอดุลล์และค่าความแข็งที่ผิวที่พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย และเมื่อพิจารณาผลของปริมาณชิลิกาในเด้าโลยพบว่าให้แนวโน้มเช่นเดียวกันกับผลของชั้นงานก่อนผ่านการบ่มเร่ง สำหรับการบ่มเร่งด้วยความร้อนในน้ำมันส่งผลให้สมบัติเชิงกลทั้งหมดลดต่ำลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับชั้นงานก่อนผ่านการบ่มเร่ง โดยเฉพาะวัสดุยางผสมที่มีสัดส่วนปริมาณยางธรรมชาติสูง ยกเว้นผลของค่าการยืดตัว ณ จุดขาด ในส่วนการเปรียบเทียบชั้นงานจากผลิตภัณฑ์ทางการค้ากับวัสดุยางผสมสูตรวิจัย พบว่า วัสดุยางผสมระหว่างยางธรรมชาติต่อยางคลอร์โพรีนที่สัดส่วน 25 ต่อ 75 ที่มีชิลิกาในเด้าโลย 40 ส่วนในยางร้อยส่วน เป็นวัสดุยางผสมสูตรวิจัยที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี เมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ยางคลอร์โพรีนทางการค้า

5. กิตติกรรมประกาศ

คณบดีวิจัยฯ ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2551

6. เอกสารอ้างอิง

- 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 Poly-chloroprene", *European Polymer Journal*, Vol. 42, No. 3, pp. 479-486.

5. วาระณ์ ใจไชยกุล, ยัจฉรี ตระการวราภรณ์ และ ชูชาติ บารมี, 2545, "การพัฒนายางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางคลอร์โพรีนสำหรับการผลิตยางกันฝุ่น" วารสารสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, ปีที่ 36, ฉบับที่ 2, หน้า 183-208.

6. ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมgap และศรีวนิทร ทองแสง, 2548, รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์โครงการ สภาวะการผลิตและสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติที่มีเด้าโลยเป็นสารเติมแต่ง, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, หน้า 96-99.

7. ชัย ชาตรุพิทักษ์กุล, สุรเชษฐ์ จึงเงมไมค์ชัย และวราภรณ์ คุณนานาภิ, 2542, "คุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและการภาพของเด้าโลย", วารสาร กฟผ., ปีที่ 8, ฉบับที่ 4, หน้า 13-23.

8. วราภรณ์ คุณนานาภิ, 2540, "การวิเคราะห์ถ่านและเด้าโลยในต้นโรงไฟฟ้า", วารสาร กฟผ., ปีที่ 6, ฉบับที่ 7, หน้า 68-77.

9. สมชัย กอกำแหง, 2539, "ศักยภาพการนำเด้าโลยลิกในตัวเมืองไปใช้ประโยชน์", 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 มากิน, 2006, "การศึกษาวัสดุเชิงประยุกต์ระหว่างเอสบีอาร์ที่มีถ้าโลยเป็นสารเติมแต่งโดยใช้สารคูคูวน์ไชเลนชนิด Si-69 สำหรับปรับปรุงผิวถ้าโลย", *วารสารวิจัยและพัฒนา มนธ.*, 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 มากิน, 2007, "อิทธิพลของการปรับปรุงผิวถ้าโลยด้วย Si69 และการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่มีต่อสมบัติของยางพาราห่วงยางธรรมชาติกับยางเอสบีอาร์", *วารสารสหศาสตร์วิศวกรรมศาสตร์ วทท.*, ปีที่ 29, ฉบับที่ 5, หน้า 1378-1391.
15. เอกชัย วิมลมาลา, กฤษรา คงนวล และณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ, 2552, *รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์โครงการยางเชลลูโลอาเจ้าวัสดุสมมายางธรรมชาติกับยางเอสบีอาร์สำหรับผลิตภัณฑ์ยางปะเก็นและยางรองกันกระแทก: เสริมแรงโดยผงถ้าโลย พชีลิกา และผงเชม่าดำ*, 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.