



การพัฒนายางธรรมชาติเพื่อการติดโลหะ
Development of Natural Rubber for Rubber to Metal Bonding

วิไลพร คงศรีรอด
Wilaiporn Kongsrirod

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Polymer Science and Technology
Prince of Songkla University**

2552

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การพัฒนายางธรรมชาติเพื่อการติดโลหะ

ผู้เขียน นางสาววิไลพร คงศรีรอด

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรสา ภัทรไพบุญชัย) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิตยา รัตนโสม)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรสา ภัทรไพบุญชัย)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิราภรณ์ ไชยบัญญัติษฐ์)

.....กรรมการ
(ดร.พัชราภรณ์ จูติวงศ์เสวต)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์
และเทคโนโลยีพอลิเมอร์

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์ การพัฒนายางธรรมชาติเพื่อการติดโลหะ
ผู้เขียน นางสาววิไลพร คงศรีรอด
สาขาวิชา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์
ปีการศึกษา 2552

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ (เหล็ก อะลูมิเนียม และทองแดง) โดยเตรียมคอมเปานด์ยางใส่สารเสริมการยึดติดทางการค้า ได้แก่ ซิงค์ไดอะคริเลต (zinc diacrylate) ซิงค์ไดเมทาคริเลต (zinc dimethacrylate) และ โคบอลต์สเตียเรต (cobalt stearate) รวมทั้งสารเสริมการยึดติดที่ได้จากการสังเคราะห์กราฟต์ โคอพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต มาวัลคาไนซ์ติดกับแผ่นโลหะที่เตรียมผิวโดยใช้วิธีทางกลและทางเคมี พร้อมทั้งรองพื้นโลหะด้วยสารรองพื้นที่เตรียมขึ้นจาก ยางคอมเปานด์และสารรองพื้นทางการค้า (Chemlok 205A) ด้วยอุณหภูมิ 150°C (วัลคาไนซ์ ด้วยระบบกัมมะถัน) และอุณหภูมิ 160°C (วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์) จากนั้นทำการ ทดสอบสมบัติการติดประสานระหว่างยางกับโลหะแบบปกด้วยมุม 90 องศา ภายใต้แรงดึงคงที่ ที่อุณหภูมิห้อง ตามมาตรฐาน ASTM D429 Method B พบว่าความล้มเหลวของการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะมีลักษณะเป็นแบบแอดฮีซีฟ ทุกวิธีของการเตรียมผิวโลหะ ทุกชนิดของสาร รองพื้น และทุกชนิดของสารเสริมการยึดติด ทั้งในระบบการวัลคาไนซ์แบบกัมมะถันและเปอร์ ออกไซด์ ยกเว้น การติดประสานระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติดซิงค์ไดอะคริเลตที่วัลคาไนซ์ ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์กับโลหะทองแดง ที่เกิดความล้มเหลวของการติดประสานแบบโคฮีซีฟ ทุกวิธีของการเตรียมผิว อีกทั้งยังให้ความแข็งแรงในการติดประสานมีค่าสูงสุดอีกด้วย ทั้งที่ใช้ และไม่ใช่สารรองพื้น สำหรับค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะเหล็กมี ค่าสูงสุด เมื่อใช้สารเสริมการยึดติดซิงค์ไดอะคริเลตที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ และ เตรียมผิวด้วยการพ่นทราย โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารรองพื้นโลหะ สำหรับความแข็งแรงในการ ติดประสานระหว่างยางกับโลหะอะลูมิเนียมมีค่าสูงสุด เมื่อใช้สารเสริมการยึดติดโคบอลต์สเตีย เรตที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกัมมะถัน และเตรียมผิวด้วยการพ่นทราย โดยมีการรองพื้นโลหะด้วย สารรองพื้นที่เตรียมขึ้นจากยางคอมเปานด์ และความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับ โลหะทองแดงมีค่าสูงสุด เมื่อใช้สารเสริมการยึดติดซิงค์ไดอะคริเลตที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ ออกไซด์ ในทุกวิธีของการเตรียมผิว ทั้งที่ใช้และไม่ใช้สารรองพื้น

Thesis Title Development of Natural Rubber for Rubber to Metal Bonding
Author Miss Wilaiporn Kongsrirod
Major Program Polymer Science and Technology
Academic Year 2009

ABSTRACT

This research was studied the adhesion strength of natural rubber to metal bonding (steel, aluminium and copper). The rubber compound was prepared by adding adhesion promoters (commercial products) such as zinc diacrylate (ZDA), zinc dimethacrylate (ZDMA), cobalt stearate also adhesion promoter from grafting of 2-hydroxyethyl methacrylate onto natural rubber. Preliminary studies, peel test pieces were prepared by vulcanizing the natural rubber compounds at 150°C (sulphur cure) and 160°C (peroxide cure) in contact with steel, aluminium and copper substrates. The substrate to which rubber bonded was treated by mechanical and chemical treatment prior to coat with primer compound, primer commercial product (Chemlok 205A) and without primer. Adhesion properties of rubber to steel, aluminium and copper substrates were studied by means of peel tests. Peel tests were performed under constant load at an angle of 90° and at room temperature followed by ASTM D429 method B. It was found that bond failure occurred was adhesive failure in every types of surface pre-treatment, primers and adhesion promoters in sulphur and peroxide cured systems except zinc diacrylate on copper substrates with peroxide cure. This bond failure was cohesive failure at every types of surface pre-treatment also provided highest adhesion strength. The adhesion strength of natural rubber onto steel substrates by sand blasting treatment and without primer was highest when zinc diacrylate was used as adhesion promoter with peroxide cured system. For adhesion strength of natural rubber onto aluminium substrates by sand blasting treatment and with compound as primer was highest when cobalt stearate was used as adhesion promoter with sulphur cured system. In addition, adhesion strength of natural rubber onto copper substrates in every type of surface pre-treatment and with coated with and without primer was highest when zinc diacrylate was used as adhesion promoter with peroxide cured system.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถบรรลุวัตถุประสงค์และสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรสา ภัทรไพบุญชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่กรุณาแนะนำแนวทางในการทำวิจัย คอยให้คำปรึกษาและกำลังใจที่ดีมาโดยตลอด จนกระทั่งวิทยานิพนธ์มีความถูกต้องและเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิตยา รัตนโสม ที่กรุณารับเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิราภรณ์ ไชยบัญญัติษฐ์ และ ดร.พัชรภรณ์ ฐิตินวงศ์เสวต ที่รับเป็นกรรมการสอบและตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ที่สนับสนุนทุนโครงการทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. (TRF-MAG) สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สัญญาเลขที่ MRG495S033 และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สำหรับทุนอุดหนุนการทำวิจัยเป็นอย่างสูง ขอขอบคุณศูนย์ถ่ายทอดเทคโนโลยีผลิตภัณฑ์ยางพารา และสาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ที่ได้อนุเคราะห์สถานที่พร้อมทั้งอุปกรณ์ในการทำวิจัย ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องตัดแผ่นโลหะ และขอขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องฟันทราย

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คุณพ่อสุรินทร์ และคุณแม่เพ็ญ คงศรีรอด ด้วยความเคารพยิ่งที่ได้สนับสนุนทางด้านการศึกษา และให้กำลังใจมาโดยตลอด ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่าน ที่ได้ให้วิชาความรู้แก่ผู้วิจัยจนได้มีโอกาสทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน และขอขอบคุณครอบครัวลาภมา ครอบครัวบัวทอง พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ตลอดจนเจ้าหน้าที่สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ทุกท่านที่มีได้กล่าวนามไว้ ณ ที่นี้ ที่คอยให้คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยมาโดยตลอด คุณค่าและประโยชน์ใดๆ ที่พึงมีจากการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นเครื่องบูชาพระคุณบิดา มารดา และครูอาจารย์ทุกท่าน ที่ให้การอบรมสั่งสอนแก่ผู้วิจัยตลอดมา

วิไลพร คงศรีรอด

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| สารบัญ | (6) |
| รายการตาราง | (12) |
| รายการรูป | (20) |
| สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ | (24) |
| บทที่ | |
| 1. บทนำ | 1 |
| 1.1 บทนำต้นเรื่อง | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย | 2 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 3 |
| 2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 4 |
| 2.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber : NR) | 4 |
| 2.1.1 รูปแบบโดยทั่วไปของยางธรรมชาติ | 4 |
| 2.1.2 ข้อกำหนดการจัดชั้นยางแผ่นรมควัน | 5 |
| 2.1.3 สมบัติของยางธรรมชาติ | 6 |
| 2.2 การทำผลิตภัณฑ์ยางติดโลหะแบบทั่วไป และแบบปราศจากการใช้ชั้นกาว | 7 |
| 2.3 การพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชัน (Emulsion polymerization) | 11 |
| 2.4 การเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติด้วยเทคนิคการกราฟต์ | 12 |
| 2.5 กราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติ | 14 |
| 2.6 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (HEMA) | 15 |
| 2.7 การติดประสาน | 16 |
| 2.7.1 ทฤษฎีของการติดประสาน | 16 |
| 2.7.2 กลไกการยึดติด | 16 |
| 2.7.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการติดประสาน | 19 |
| 2.7.4 ปัจจัยในการเลือกวิธีการเตรียมผิว | 20 |
| 2.7.5 ผลของการเตรียมผิววัสดุ | 20 |
| 2.7.6 ข้อดีของการเตรียมผิว | 21 |
| 2.7.7 การทดสอบความแข็งแรงในการยึดติด | 21 |
| | (6) |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 2.7.8 ลักษณะของความล้มเหลวในการยึดติด | 22 |
| 2.8 การตรวจสอบเอกสาร | 22 |
| 2.8.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการติดประสาน | 22 |
| 2.8.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตัดแปรรูปโมเลกุลทางธรรมชาติ | 28 |
| 3. วิธีการวิจัย | 32 |
| 3.1 สารเคมี | 32 |
| 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย | 35 |
| 3.3 วิธีดำเนินการทดลอง | 38 |
| 3.3.1 การศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ | 38 |
| 3.3.1.1 ชนิดของสารเสริมการยึดติด (adhesion promoter) หรือปริมาณกราฟต์โคพอลิเมอร์ต่อความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ | 38 |
| 3.3.1.2 อิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ต่อความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ | 42 |
| 3.3.1.3 ชนิดของโลหะต่อความสามารถในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ | 42 |
| 3.3.1.4 วิธีการเตรียมผิวโลหะต่อความสามารถในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ | 42 |
| 3.3.1.5 ชนิดของสารรองพื้น (primer) ต่อความสามารถในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ | 44 |
| 3.3.2 การเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (HEMA) | 45 |
| 3.3.2.1 วิธีการเตรียม 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์ | 45 |
| 3.3.2.2 การสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต | 45 |
| 3.3.3 การศึกษาสมบัติเชิงกลของคอมปานด์ยางใส่สารเสริมการยึดติด (adhesion promoter) : ชนิดทางการค้า และจากการสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์ | 46 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 3.3.4 การทดสอบความสามารถในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ ด้วยวิธีการแบบลอก (peel test) ตามมาตรฐาน ASTM D429-03 Method B | 49 |
| 3.3.4.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบความสามารถในการติดประสาน | 49 |
| 3.3.4.2 การทดสอบการติดประสาน (adhesion strength) ระหว่างยางกับโลหะ | 50 |
| 4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง | 52 |
| 4.1 ผลการศึกษาลักษณะของผิวโลหะก่อน – หลังการเตรียมผิวด้วยวิธีทางกลและทางเคมี | 52 |
| 4.2 ผลของการใช้สารเสริมการยึดติด (adhesion promoter) ทางการค้าต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ | 53 |
| 4.2.1 ผลการใช้สารเสริมการยึดติดทางการค้าต่อสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ | 53 |
| 4.2.2 ความสามารถในการติดประสานระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติดทางการค้ากับโลหะ | 57 |
| 4.2.2.1 ชนิดของสารเสริมการยึดติด (adhesion promoter) ทางการค้าต่อความสามารถในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ | 57 |
| 1) การติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่เตรียมผิวด้วยวิธีทางกล (ขัดด้วยกระดาษทราย) | 58 |
| 2) การติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่เตรียมผิวด้วยวิธีทางกล (พ่นทราย) | 64 |
| 3) การติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่เตรียมผิวด้วยวิธีทางเคมี (กัดด้วยกรด) | 70 |
| 4.2.2.2 ผลของชนิดโลหะต่อความสามารถในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ | 75 |
| 1) การติดประสานระหว่างยางกับโลหะ โดยปราศจากสารรองพื้น (No primer) | 76 |
| 2) การติดประสานระหว่างยางกับโลหะ ที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมพอนด์ (Primer compound solution) | 81 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 3) การติดประสานระหว่างยางกับโลหะ ที่รองพื้นด้วยสาร รองพื้นทางการค้า (Primer chemlok205A) | 86 |
| 4.2.2.3 ผลของวิธีการเตรียมผิวโลหะต่อความสามารถในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะ | 91 |
| 1) การติดประสานระหว่างยางปราศจากสารเสริมการยึดติดกับ โลหะชนิดต่างๆ | 92 |
| 2) การติดประสานระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติดชนิด Zinc diacrylate กับโลหะชนิดต่างๆ | 98 |
| 3) การติดประสานระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติดชนิด Zinc dimethacrylate กับโลหะชนิดต่างๆ | 103 |
| 4) การติดประสานระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติดชนิด Cobalt stearate กับโลหะชนิดต่างๆ | 109 |
| 4.2.2.4 ผลของชนิดสารรองพื้นต่อความสามารถในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะ | 114 |
| 1) การติดประสานระหว่างยางกับโลหะชนิดต่างๆ ที่เตรียมผิว ด้วยวิธีทางกล (ขัดด้วยกระดาษทราย) | 115 |
| 2) การติดประสานระหว่างยางกับโลหะชนิดต่างๆ ที่เตรียมผิว ด้วยวิธีทางกล (ฟันทราย) | 123 |
| 3) การติดประสานระหว่างยางกับโลหะชนิดต่างๆ ที่เตรียมผิว ด้วยวิธีทางเคมี (กัดด้วยกรด) | 130 |
| 4.3 ผลจากการสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซี เอทิลเมทาคริเลต ที่อัตราส่วนโมลของ NR/HEMA ต่างๆ | 137 |
| 4.4 ผลของการใช้ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ ต่อสมบัติเชิงกล และสมบัติการติด ประสานระหว่างยางกับโลหะ | 143 |
| 4.4.1 ผลของการใช้ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซี เอทิลเมทาคริเลต ที่อัตราส่วนโมลของยางธรรมชาติ ต่อ 2-ไฮดรอกซีเอทิล เมทาคริเลต (NR/HEMA) : 90/10 และ 85/15 ต่อสมบัติเชิงกล | 143 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 4.4.2 ความสามารถในการติดประสานระหว่างคอมเปานด์ยางใส่ยางกราฟต์โค พอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (NR-g-HEMA) กับโลหะ | 147 |
| 4.4.2.1 ผลของปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ต่อความสามารถในการ ติดประสานระหว่างยางกับโลหะ | 147 |
| 1) การติดประสานระหว่างยางคอมเปานด์ที่ยางกราฟต์โค พอลิเมอร์กับโลหะที่เตรียมผิวทางกล (พ่นทราย) โดยมีการใช้ และไม่ใช้สารรองพื้น | 148 |
| 2) การติดประสานระหว่างคอมเปานด์ยางใส่ยางกราฟต์โค พอลิเมอร์กับโลหะที่เตรียมผิวทางกล (กัดด้วยกรด) โดยมี การใช้และไม่ใช้สารรองพื้น | 156 |
| 4.4.2.2 ผลของชนิดโลหะต่อความสามารถในการติดประสานระหว่าง คอมเปานด์ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์กับโลหะ | 162 |
| 1) การติดประสานระหว่างยางกับโลหะ โดยปราศจาก สารรองพื้น (Without primer) | 163 |
| 2) การติดประสานระหว่างยางกับโลหะ ที่รองพื้นด้วยสาร รองพื้นจากยางคอมเปานด์ (Primer compound solution) | 167 |
| 3) การติดประสานระหว่างยางกับโลหะ ที่รองพื้นด้วยสาร รองพื้นจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ (Primer NR-g-HEMA solution) | 171 |
| 4) การติดประสานระหว่างยางกับโลหะ ที่รองพื้นด้วยสาร รองพื้นทางการค้า (Primer chemlok205A) | 175 |
| 4.4.2.3 ผลของวิธีการเตรียมผิวโลหะต่อความสามารถในการติด ประสานระหว่างคอมเปานด์ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์กับโลหะ | 178 |
| 1) การติดประสานระหว่างยางปราศจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ กับโลหะชนิดต่างๆ | 179 |
| 2) การติดประสานระหว่างยางใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อัตรา ส่วนโมล NR-g-HEMA : 90/10 ปริมาณ 10 phr กับโลหะ ชนิดต่างๆ | 185 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 3) การติดประสานระหว่างยางใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนโมล NR-g-HEMA : 90/10 ปริมาณ 33 phr กับโลหะชนิดต่างๆ | 191 |
| 4.4.2.4 ผลของชนิดสารรองพื้นต่อความสามารถในการติดประสานระหว่างคอมเปานด์ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์กับโลหะ | 197 |
| 1) การติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่เตรียมผิวด้วยวิธีทางกล (พ่นทราย) และรองพื้นด้วยสารรองพื้นชนิดต่างๆ | 198 |
| 2) การติดประสานระหว่างยางกับโลหะชนิดต่างๆ ที่เตรียมผิวด้วยวิธีทางเคมี (กัดด้วยกรด) | 203 |
| 5. สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ | 208 |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง | 208 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 212 |
| บรรณานุกรม | 213 |
| ภาคผนวก | 219 |
| ก.1 ลักษณะพื้นผิวโลหะหลังผ่านการเตรียมผิวโดยการขัดด้วยกระดาษทราย (Sandpaper blasting) | 220 |
| ก.2 ลักษณะพื้นผิวโลหะหลังผ่านการเตรียมผิวโดยการพ่นทราย (Sand blasting) | 221 |
| ก.3 ลักษณะพื้นผิวโลหะหลังผ่านการเตรียมผิวโดยการกัดด้วยกรด (Acid etching) | 222 |
| ข.1 ตัวอย่างวิธีการคำนวณปริมาณน้ำยางและสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์ ในอัตราส่วนโมลของยางธรรมชาติต่อ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (NR/HEMA) เท่ากับ 95/5 | 223 |
| ข.2 การละลายของกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (NR-g-HEMA) | 224 |
| ข.3 ตัวอย่างการคำนวณ Transmittance ratio ของกราฟต์โคพอลิเมอร์ | 225 |
| ค เอกสารการตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานทางวิชาการ | 226 |
| ประวัติผู้เขียน | 239 |

รายการตาราง

| ตาราง | หน้า |
|---|------|
| 3.1 ลำดับการผสมยางกับสารเคมี (เมื่อใส่สารเสริมการยึดติด) | 39 |
| 3.2 สูตรยางธรรมชาติที่แปรชนิดสารเสริมการยึดติด (adhesion promoter) ปริมาณ 10 phr โดยใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน (Sulphur cure) | 40 |
| 3.3 สูตรยางธรรมชาติที่แปรชนิดสารเสริมการยึดติด (adhesion promoter) ปริมาณ 10 phr โดยใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์ (Peroxide cure) | 40 |
| 3.4 สูตรยางธรรมชาติดัดแปรโมเลกุล NR/HEMA : 90/10 และ 85/15 ที่แปรปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ในปริมาณต่างๆ โดยวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถัน | 41 |
| 3.5 สูตรยางธรรมชาติดัดแปรโมเลกุล NR/HEMA : 90/10 และ 85/15 ที่แปรปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ในปริมาณต่างๆ โดยวัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ | 41 |
| 3.6 การเตรียมสารละลาย และการเตรียมผิวโลหะด้วยวิธีทางเคมี | 43 |
| 3.7 ปริมาณน้ำยางและสารเคมีที่ใช้ในการกราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต | 46 |
| 3.8 ขนาดของตัวอย่างทดสอบความทนต่อแรงดึง | 47 |
| 3.9 ตัวอย่างตารางที่ใช้ในการบันทึกผลการทดสอบการติดประสาน | 51 |
| 4.1 ลักษณะการวัลคาไนซ์ยางคอมปานด์ใส่สารเสริมการยึดติดทางการค้าด้วยระบบกำมะถัน และเปอร์ออกไซด์ | 54 |
| 4.2 ผลของระบบการวัลคาไนซ์ และชนิดของสารเสริมการยึดติดทางการค้าที่ปริมาณ 10 phr ต่อสมบัติเชิงกล | 55 |
| 4.3 ชนิดของสารเสริมการยึดติด ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับ โลหะชนิดต่างๆ (ขัดด้วยกระดาษทราย) โดยปราศจากสารรองพื้น | 58 |
| 4.4 ชนิดของสารเสริมการยึดติด ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับ โลหะชนิดต่างๆ (ขัดด้วยกระดาษทราย) ที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมปานด์ | 59 |
| 4.5 ชนิดของสารเสริมการยึดติด ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับ โลหะชนิดต่างๆ (ขัดด้วยกระดาษทราย) ที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นทางการค้า | 60 |
| 4.6 ชนิดของสารเสริมการยึดติด ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับ โลหะชนิดต่างๆ (พ่นทราย) ที่ปราศจากสารรองพื้น | 64 |
| 4.7 ชนิดของสารเสริมการยึดติด ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับ โลหะชนิดต่างๆ (พ่นทราย) ที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมปานด์ | 65 |

รายการตาราง (ต่อ)

| ตาราง | หน้า |
|--|------|
| 4.33 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางปราศจากสารเสริมการยึดติดกับโลหะ (ขัดด้วยกระดาษทราย) | 115 |
| 4.34 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติดชนิด Zinc diacrylate กับโลหะ (ขัดด้วยกระดาษทราย) | 116 |
| 4.35 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติดชนิด Zinc dimethacrylate กับโลหะ (ขัดด้วยกระดาษทราย) | 117 |
| 4.36 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติดชนิด Cobalt stearate กับโลหะ (ขัดด้วยกระดาษทราย) | 118 |
| 4.37 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางปราศจากสารเสริมการยึดติดกับโลหะ (ฟันทราย) | 123 |
| 4.38 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติดชนิด Zinc diacrylate กับโลหะ (ฟันทราย) | 124 |
| 4.39 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติดชนิด Zinc dimethacrylate กับโลหะ (ฟันทราย) | 125 |
| 4.40 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติดชนิด Cobalt stearate กับโลหะ (ฟันทราย) | 126 |
| 4.41 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางปราศจากสารเสริมการยึดติดกับโลหะ (กัดผิวด้วยกรด) | 130 |
| 4.42 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติดชนิด Zinc diacrylate กับโลหะ (กัดผิวด้วยกรด) | 131 |
| 4.43 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติดชนิด Zinc dimethacrylate กับโลหะ (กัดด้วยกรด) | 132 |
| 4.44 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติดชนิด Cobalt stearate กับโลหะ (กัดผิวด้วยกรด) | 133 |
| 4.45 เปอร์เซนต์ประสิทธิภาพการกราฟต์ของน้ำยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนโมลของ NR/HEMA : 95/5, 90/10 และ 85/15 ที่อุณหภูมิ 50°C | 137 |

รายการตาราง (ต่อ)

| ตาราง | หน้า |
|--|------|
| 4.46 Transmittance ratio ของอัตราส่วนโมล NR/HEMA : 95/5, 90/10 และ 85/15 ที่อุณหภูมิ 50°C | 139 |
| 4.47 ลักษณะการวัลคาไนซ์คอมปานด์ยางใส่สารเสริมการยึดติดที่ได้จากการสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์ ด้วยระบบก้ำมะถันและเปอร์ออกไซด์ | 144 |
| 4.48 ผลของระบบการวัลคาไนซ์ และอัตราส่วนโมลของ NR/HEMA : 90/10 และ 85/15 ที่แปรปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ต่อสมบัติเชิงกล | 145 |
| 4.49 ปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ใช้ กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะ (พ่นทราย) ที่ปราศจากสารรองพื้น | 148 |
| 4.50 ปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ใช้ กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะ (พ่นทราย) ที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมปานด์ | 149 |
| 4.51 ปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะ (พ่นทราย) ที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ | 150 |
| 4.52 ปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะ (พ่นทราย) ที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นทางการค้า | 151 |
| 4.53 ปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ใช้ กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะ (กัดผิวด้วยกรด) ที่ปราศจากสารรองพื้น | 156 |
| 4.54 ปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะ (กัดผิวด้วยกรด) ที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมปานด์ | 157 |
| 4.55 ปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะ (กัดผิวด้วยกรด) ที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ | 158 |
| 4.56 ปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะ (กัดผิวด้วยกรด) ที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นทางการค้า | 159 |
| 4.57 ชนิดของโลหะ กับการใช้ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ปริมาณต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ (พ่นทราย) ที่ปราศจากสารรองพื้น | 163 |

รายการตาราง (ต่อ)

| ตาราง | หน้า |
|---|------|
| 4.69 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางที่ใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนโมล NR-g-HEMA : 90/10 ปริมาณ 10 phr กับโลหะ (ปราศจากสารรองพื้น) | 185 |
| 4.70 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางที่ใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนโมล NR-g-HEMA : 90/10 ปริมาณ 10 phr กับโลหะ (รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมปานด์) | 186 |
| 4.71 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางที่ใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนโมล NR-g-HEMA : 90/10 ปริมาณ 10 phr กับโลหะ (รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์) | 186 |
| 4.72 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางที่ใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนโมล NR-g-HEMA : 90/10 ปริมาณ 10 phr กับโลหะ (รองพื้นด้วยสารรองพื้นทางการค้า) | 187 |
| 4.73 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางที่ใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนโมล NR-g-HEMA : 90/10 ปริมาณ 33 phr กับโลหะ (ปราศจากสารรองพื้น) | 191 |
| 4.74 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางที่ใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนโมล NR-g-HEMA : 90/10 ปริมาณ 33 phr กับโลหะ (รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมปานด์) | 192 |
| 4.75 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางที่ใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนโมล NR-g-HEMA : 90/10 ปริมาณ 33 phr กับโลหะ (รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์) | 192 |
| 4.76 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางที่ใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนโมล NR-g-HEMA : 90/10 ปริมาณ 33 phr กับโลหะ (รองพื้นด้วยสารรองพื้นทางการค้า) | 193 |
| 4.77 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางคอมปานด์ปราศจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์กับโลหะ (พจนานุกรม) | 198 |
| 4.78 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนโมล NR-g-HEMA : 90/10 ปริมาณ 10 phr กับโลหะ (พจนานุกรม) | 199 |

รายการตาราง (ต่อ)

| ตาราง | หน้า |
|---|------|
| 4.79 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนโมล NR-g-HEMA : 90/10 ปริมาณ 33 phr กับโลหะ (พ่นทราย) | 200 |
| 4.80 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางคอมเปานด์ปราศจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์กับโลหะ (กัดผิวด้วยกรด) | 203 |
| 4.81 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนโมล NR-g-HEMA : 90/10 ปริมาณ 10 phr กับโลหะ (กัดผิวด้วยกรด) | 204 |
| 4.82 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนโมล NR-g-HEMA : 90/10 ปริมาณ 33 phr กับโลหะ (กัดผิวด้วยกรด) | 205 |

รายการรูป

| รูป | หน้า |
|---|------|
| 2.1 สูตรโครงสร้างยางธรรมชาติ | 4 |
| 2.2 การทำผลิตภัณฑ์ยางติดโลหะแบบทั่วไป (ใช้ชั้นกาวในการยึดติด) | 8 |
| 2.3 การใช้สาร Metallic Coagents ในการทำผลิตภัณฑ์ยางติดโลหะ | 8 |
| 2.4 กลไกการเชื่อมโยงของสาร metallic coagents | 9 |
| 2.5 สูตรโครงสร้างทางเคมีของ Zinc diacrylate (ZDA) | 10 |
| 2.6 สูตรโครงสร้างทางเคมีของ Zinc dimethacrylate (ZDMA) | 10 |
| 2.7 สูตรโครงสร้างทางเคมีของ Cobalt stearate | 11 |
| 2.8 สูตรโครงสร้างทางเคมีของ Cobalt naphthenate | 11 |
| 2.9 สูตรโครงสร้างทางเคมีของ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (HEMA) | 15 |
| 2.10 การยึดติดทางกล (Mechanical bonding) | 17 |
| 2.11 การแพร่เข้าหากันของสายโซ่ (Interdiffusion of chain) | 17 |
| 2.12 แรงดึงดูดประจุหรือไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic attraction) | 18 |
| 2.13 พันธะทางเคมี (Chemical bonding) | 19 |
| 2.14 การทดสอบความแข็งแรงของการยึดติด | 22 |
| 2.15 ลักษณะของความล้มเหลวในการยึดติด | 22 |
| 3.1 ขั้นตอนทดสอบรูปดัมเบลล์ (Die C) สำหรับทดสอบความทนต่อแรงดึง | 47 |
| 3.2 ขั้นตอนการเตรียมขั้นตอนทดสอบสมบัติการติดประสาน (Peel test) | 49 |
| 3.3 การทดสอบการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ | 50 |
| 4.1 ลักษณะพื้นผิวโลหะส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Optical microscope) ที่กำลังขยาย 100 เท่า (a) ก่อนเตรียมผิว (N), (b) เตรียมผิวด้วยวิธีการขัดกระดาษทราย (M1), (c) เตรียมผิวด้วยวิธีการพ่นทราย (M2) และ (d) เตรียมผิวด้วยวิธีการกัดด้วยกรด (C) | 52 |
| 4.2 โมดูลัสที่ 100% ของยางธรรมชาติที่มีสารเสริมการยึดติดทางการค้า | 55 |
| 4.3 ความทนต่อแรงดึงของยางธรรมชาติที่มีสารเสริมการยึดติดทางการค้า | 56 |
| 4.4 เปอร์เซ็นต์การยึดติด จุดขาดของยางธรรมชาติที่มีสารเสริมการยึดติดทางการค้า | 56 |
| 4.5 ชนิดของสารเสริมการยึดติด ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะชนิดต่างๆ (ขัดด้วยกระดาษทราย) | 61 |
| 4.6 ชนิดของสารเสริมการยึดติด ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะชนิดต่างๆ (พ่นทราย) | 67 |

รายการรูป (ต่อ)

| รูป | หน้า |
|--|------|
| 4.7 ชนิดของสารเสริมการยึดติด ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะชนิดต่างๆ (กัดผิวด้วยกรด) | 73 |
| 4.8 ชนิดของโลหะ กับการใช้สารเสริมการยึดติดชนิดต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะ (ปราศจากสารรองพื้น) | 79 |
| 4.9 ชนิดของโลหะ กับการใช้สารเสริมการยึดติดชนิดต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะ (รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมพอนด์) | 84 |
| 4.10 ชนิดของโลหะ กับการใช้สารเสริมการยึดติดชนิดต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะ (รองพื้นด้วยสารรองพื้นทางการค้า) | 89 |
| 4.11 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางที่ปราศจากสารเสริมการยึดติด กับโลหะชนิดต่างๆ | 95 |
| 4.12 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติดชนิด Zinc diacrylate กับโลหะชนิดต่างๆ | 101 |
| 4.13 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติดชนิด Zinc dimethacrylate กับโลหะชนิดต่างๆ | 106 |
| 4.14 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติดชนิด Cobalt stearate กับโลหะชนิดต่างๆ | 112 |
| 4.15 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ (ขัดด้วยกระดาษทราย) | 120 |
| 4.16 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ (พ่นทราย) | 128 |
| 4.17 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ (กัดผิวด้วยกรด) | 135 |
| 4.18 เปรอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตที่อัตราส่วนโมลของ NR/HEMA : 95/5, 90/10 และ 85/15 ที่อุณหภูมิ 50°C | 138 |
| 4.19 Transmittance ratio ของอัตราส่วนโมล NR/HEMA : 95/5, 90/10 และ 85/15 ที่อุณหภูมิ 50°C | 139 |
| 4.20 โครงสร้างของกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (NR-g-HEMA) | 140 |

รายการรูป (ตต)

| รูป | หน้า |
|--|------|
| 4.21 IR สเปกตรัมของยางธรรมชาติ พอลิ(2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต) และยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ (NR-g-HEMA) ที่อัตราส่วนโมลของ NR/HEMA : 95/5 | 141 |
| 4.22 IR สเปกตรัมของกราฟต์โคพอลิเมอร์ (NR-g-HEMA) ที่อัตราส่วนโมล NR/HEMA เท่ากับ (a) 95/5 (b) 90/10 (c) 85/15 ปริมาณ SLS 1 กรัม (d) 85/15 ปริมาณ SLS 2 กรัม | 142 |
| 4.23 โมดูลัสที่ 100% ของยางธรรมชาติกราฟต์โคพอลิเมอร์ NR/HEMA : 90/10 (ปริมาณ 10 phr และ 33 phr) และ 85/15 ปริมาณ 43 phr | 145 |
| 4.24 ความทนต่อแรงดึงของยางธรรมชาติกราฟต์โคพอลิเมอร์ NR/HEMA : 90/10 (ปริมาณ 10 phr และ 33 phr) และ 85/15 ปริมาณ 43 phr | 146 |
| 4.25 เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางธรรมชาติกราฟต์โคพอลิเมอร์ NR/HEMA : 90/10 (ปริมาณ 10 phr และ 33 phr) และ 85/15 ปริมาณ 43 phr | 146 |
| 4.26 ปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะ (พ่นทราย) | 153 |
| 4.27 ปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะ (กัดผิวด้วยกรด) | 161 |
| 4.28 ชนิดของโลหะ กับการใช้ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ปริมาณต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรง ในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะ โดยปราศจากสารรองพื้น | 165 |
| 4.29 ชนิดของโลหะ กับการใช้ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ปริมาณต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรง ในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมพอนัด | 169 |
| 4.30 ชนิดของโลหะ กับการใช้ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ปริมาณต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรง ในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ | 173 |
| 4.31 ชนิดของโลหะ กับการใช้ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ปริมาณต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรง ในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นทางการค้า | 177 |
| 4.32 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางปราศจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ กับโลหะชนิดต่างๆ | 183 |
| 4.33 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนโมล NR-g-HEMA : 90/10 ปริมาณ 10 phr กับโลหะชนิดต่างๆ | 189 |

รายการรูป (ต่อ)

| รูป | หน้า |
|--|------|
| 4.34 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนโมล NR-g-HEMA : 90/10 ปริมาณ 33 phr กับโลหะชนิดต่างๆ | 195 |
| 4.35 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ (พันทราย) | 201 |
| 4.36 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ (กัดผิวด้วยกรด) | 206 |

สัญลักษณ์ ค่ายอและตัวย่อ

| ตัวย่อ | ชื่อภาษาอังกฤษ | ชื่อภาษาไทย |
|--------|---|---|
| ADS | Air dried sheet | ยางแผ่นไม่รมควัน |
| FT-IR | Fourier Transform Infrared Spectrometer | เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ |
| GE | Grafting efficiency | ประสิทธิภาพการกราฟต์ |
| HEMA | 2-Hydroxyethyl methacrylate | 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต |
| MDR | Moving die rheometer | เครื่องทดสอบหาเวลาการวัลคาไนซ์ของยาง |
| NR | Natural rubber | ยางธรรมชาติ |
| PHEMA | poly(2-hydroxyethylmethacrylate) | พอลิ(2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต) |
| RSS | Rib Smoke Sheet | ยางแผ่นรมควัน |
| SLS | Sodium lauryl sulphate | โซเดียมลอริลซัลเฟต |
| TMTD | Tetramethylthiuram disulfide | เตตระเมทิลไทยแรมไดซัลไฟด์ |
| ZDA | Zinc diacrylate | ซิงค์ไดอะคริเลต |
| ZDMA | Zinc dimethacrylate | ซิงค์ไดเมทาคริเลต |
| ZnO | Zinc oxide | ซิงค์ออกไซด์ |
| wt% | %by weight | เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก |

สัญลักษณ์ ค่ายอและต์ (ชื่อย)

สัญลักษณ์

| สัญลักษณ์ | ชื่อภาษาอังกฤษ | ชื่อภาษาไทย |
|--------------------|------------------------------|----------------------------|
| Å | Angstrom | อังสตรอม |
| °C | degree celsius | องศาเซลเซียส |
| kg/cm ² | kilogram per centimeter | กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร |
| mm ² | millimeter square | ตารางมิลลิเมตร |
| MPa | Mega Pascal | เมกกะพาสคาล |
| N | newton | นิวตัน |
| N/m | newton per meter | นิวตันต่อเมตร |
| N/mm ² | newton per millimeter square | นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร |
| N/m ² | newton per meter square | นิวตันต่อตารางเมตร |
| phr | part per hundred rubber | ส่วนต่อหนึ่งร้อยส่วนของยาง |
| rpm | round per minute | รอบต่อนาที |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำต้นเรื่อง

ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญของประเทศไทย อีกทั้งยังเป็นประเทศผู้ผลิตยางธรรมชาติมากที่สุดในโลก (อรรถวรรณและนุชนารถ, 2550) นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังมีสมบัติเชิงกลที่ดีเยี่ยม โดยเฉพาะด้านความแข็งแรงและความยืดหยุ่น ซึ่งยางสังเคราะห์ไม่สามารถเทียบได้ ดังนั้นยางธรรมชาติจึงเป็นวัสดุที่มักได้รับการนำไปใช้ในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในงานทางด้านวิศวกรรม เช่น ยางรองคอสะพาน ยางรองฐานตึก ยางตีนตะขาบรถถัง ยางล้อรถยก และยางล้อตัน (บุญธรรมและชลดา, 2544) เป็นต้น ซึ่งผลิตภัณฑ์ดังกล่าวโดยส่วนใหญ่ไม่ได้ทำขึ้นจากยางเพียงอย่างเดียว ล้วนมีการเสริมความแข็งแรงให้กับโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ด้วยโลหะ นอกจากนี้ยางธรรมชาติจะมีความแข็งแรงและความยืดหยุ่นที่ดีแล้ว ยังมีสมบัติด้านการยึดติดที่ดีอีกด้วยจนสามารถยึดติดกับวัสดุอื่นได้ เช่น ผ้า ไม้ และโลหะชนิดต่างๆ ในปัจจุบันจึงได้มีการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการยึดติดระหว่างยางกับโลหะชนิดต่างๆ กันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากการขยายตัวของอุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมก่อสร้าง และอุตสาหกรรมด้านการบิน เป็นต้น เนื่องจากในอดีตการยึดติดระหว่างยางกับโลหะนิยมใช้เทคนิคการชุบทองเหลือง ซึ่งจะทำให้การเคลือบพื้นผิวโลหะที่สะอาดด้วยแผ่นฟิล์มทองเหลืองบางๆ โดยวิธีการชุบด้วยไฟฟ้า ก่อนที่จะนำโลหะดังกล่าวไปยึดติดกับยาง (พงษ์ธร, 2548) แต่การยึดติดด้วยวิธีดังกล่าวมีวิธีการที่ยุ่งยากและใช้ต้นทุนสูง นอกจากนี้ยางติดโลหะยังถูกนำไปใช้เป็นส่วนประกอบต่างๆ เช่น ชุดอุปกรณ์กันการชนและลดความเสียหายจากการชนหรือป้องกันความเสียหายจากการกระแทก ได้แก่ ยางกันกระแทกท่าเรือ แต่ในขณะเดียวกันยางธรรมชาติก็ยังมีข้อจำกัดบางอย่างจากสมบัติความไม่มีขี้ ทำให้ไม่สามารถนำไปยึดติดกับโลหะที่มีขี้ได้โดยตรง เนื่องจากยางธรรมชาติเกาะติดผิวโลหะได้ไม่ดี ดังนั้นหากต้องการนำยางธรรมชาติไปใช้ในการยึดติดกับโลหะโดยตรง จึงจำเป็นต้องใส่สารที่ช่วยในการยึดติดกับโลหะลงไป ในยางคอมพอนด์ หรืออาจทำการดัดแปรโครงสร้างของยาง ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาวินิจฉัยเพื่อปรับปรุงสมบัติดังกล่าว โดยให้ยางมีความสามารถในการติดประสานกับโลหะได้เอง โดยปราศจากการใช้ชั้นกาว ด้วยการใส่สารเสริมการยึดติดและยางธรรมชาติที่ได้ดัดแปรโมเลกุลลงในยางคอมพอนด์ เพื่อให้ยางมีความเป็นขี้เพิ่มขึ้น อีกทั้งยังได้มีการรองพื้นโลหะด้วยสารรองพื้น เพื่อป้องกันชั้นงานไม่ให้เกิดการกัดกร่อนขณะใช้งาน (Ansarifar *et al.*, 2002) และยังเป็นการเพิ่มความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ โดยใช้สารเสริมการยึดติด (adhesion promoter) ทางการค้า
- 1.2.2 ศึกษาความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ โดยใช้สารเสริมการยึดติด (adhesion promoter) จากการสังเคราะห์ขึ้นเอง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาชนิดของโลหะที่ใช้ในการติดประสานกับยางธรรมชาติ เช่น โลหะเหล็ก โลหะอะลูมิเนียม และโลหะทองแดง
- 1.3.2 ศึกษาวิธีการเตรียมผิวโลหะ โดยใช้วิธีการเตรียมผิวด้วยวิธีทางกล และทางเคมี เพื่อเปรียบเทียบผลการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ
- 1.3.3 ศึกษาอิทธิพลของสารเสริมการยึดติด (adhesion promoter) ทางการค้าที่มีผลต่อความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ
- 1.3.4 ศึกษาการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ ด้วยวิธีการอัดขึ้นรูปแบบ Compression moulding เพื่อให้ยางคอมพอนัดติดกับโลหะ โดยใช้สารรองพื้นที่เตรียมขึ้นจากยางคอมพอนัด สารรองพื้นที่เตรียมขึ้นจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ และสารรองพื้นที่ทางการค้า (Chemlok 205A) ในการรองพื้นผิวโลหะ
- 1.3.5 ศึกษาความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ โดยใช้สารเสริมการยึดติดทางการค้าเปรียบเทียบกับสารเสริมการยึดติดที่ได้จากการสังเคราะห์ กราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต
- 1.3.6 ทดสอบสมบัติของผลิตภัณฑ์ ตามมาตรฐาน ASTM
 - 1.3.6.1 ทดสอบสมบัติการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ (Adhesion to metal test) ด้วยการทดสอบแบบลอก (peel test) ตามมาตรฐาน ASTM D429 Method B
 - 1.3.6.2 ทดสอบสมบัติเชิงกลของยางที่นำมายึดติดกับโลหะ ด้วยการทดสอบความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) ตามมาตรฐาน ASTM D412
- 1.3.7 วิเคราะห์และสรุปผลการทำวิจัย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

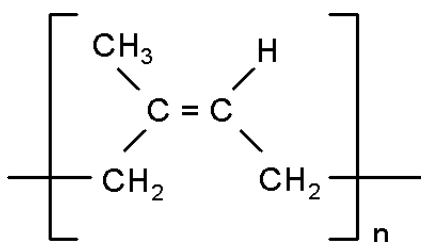
- 1.4.1 ได้ข้อมูลการทดลองเบื้องต้น ซึ่งเป็นพื้นฐานในการวิจัยและพัฒนาทางด้าน
ยางธรรมชาติ เกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ยางติดโลหะในขั้นต่อไป
- 1.4.2 ใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงยางธรรมชาติ เพื่อให้ติดกับโลหะ
พร้อมทั้งได้สมบัติตามมาตรฐานที่ต้องการ
- 1.4.3 เพื่อเพิ่มมูลค่าของยางธรรมชาติให้สูงขึ้น

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber : NR)

ยางธรรมชาติเป็นยางที่ได้มาจากต้นไม้ชนิดหนึ่ง เรียกตามภาษาพฤกษศาสตร์ว่า *Hevea brasiliensis* สามัญชนทั่วไป เรียกว่า ยางพารา หรือ ต้นยางพารา (para rubber) ซึ่งน้ำยางสดที่กรีดยได้จากต้นยางพารา มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวเหมือนน้ำมัน ยางธรรมชาติชื่อทางเคมี คือ *ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (cis-1,4-polyisoprene)* ประกอบด้วยหน่วยย่อยของไอโซพรีน (isoprene, C_5H_8) มีพันธะคู่อยู่ในสายโซ่ มีไฮโดรเจนและคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งมีสูตรโครงสร้างทางเคมี ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างยางธรรมชาติ
(หน่วยเทคโนโลยียาง, 2550)

2.1.1 รูปแบบโดยทั่วไปของยางธรรมชาติ โดยทั่วไปยางธรรมชาติสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบใหญ่ๆ ได้แก่

2.1.1.1 น้ำยาง

น้ำยาง ได้จากการนำน้ำยางสดที่กรีดยได้จากต้นยางพาราไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (centrifugation) เพื่อลดปริมาณน้ำในน้ำยางสด จนกระทั่งได้น้ำยางที่มีปริมาณยางแห้งเพิ่มขึ้น จาก 30 เป็น 60 wt% เรียกน้ำยางที่ได้ว่า น้ำยางข้น (concentrated latex) นอกจากนี้ น้ำยางข้นที่ไดยังมีการเติมสารแอมโมเนีย หรือแอมโมเนียร่วมกับสารเคมีอื่นๆ เพื่อช่วยรักษาสภาพของน้ำยางข้นให้เก็บไว้ได้นาน

2.1.1.2 ยางแห้ง

ยางแห้ง ได้จากการนำน้ำยางสดที่กรีตได้จากต้นยางพารามาเติมกรด เช่น กรดอะซิติก (acetic acid) กรดฟอร์มิก (formic acid) หรือกรดซัลฟูริก (sulfuric acid) เป็นต้น เพื่อให้อนุภาคน้ำยางจับตัวกันเป็นของแข็งแยกตัวจากน้ำ จากนั้นก็ไล่ความชื้นออกจากเนื้อยาง เพื่อป้องกันการติดเชื้อรา ซึ่งการทำให้ยางแห้งนี้อาจทำได้โดยนำไปตากแดดหรือผึ่งในอากาศร้อน เพื่อไล่ความชื้น ยางที่ได้จะเรียกว่า ยางแผ่นไม่รมควัน (air dried sheet, ADS) แต่หากนำยางไปทำการไล่ความชื้นด้วยวิธีการอบรมควัน ที่อุณหภูมิประมาณ 60–70°C เป็นเวลา 2–3 วัน หรืออาจนานกว่านี้ ยางที่ได้เรียกว่า ยางแผ่นรมควัน (ribbed smoked sheet, RSS) และสามารถแบ่งออกเป็นชั้นต่างๆ ด้วยสายตาตามปริมาณสิ่งสกปรกหรือสิ่งปนเปื้อนในยาง ตั้งแต่ชั้นที่ 1 ซึ่งจัดว่าเป็นเกรดที่ดีที่สุด ถึงชั้นที่ 5 ซึ่งเป็นเกรดที่ต่ำที่สุด นอกจากนี้ ยางแห้งอาจจัดจำหน่ายในรูปแบบของยางแท่ง (block rubber) ซึ่งเป็นยางที่จัดให้มีรูปทรงสี่เหลี่ยม ขนาดประมาณ 675 × 330 มิลลิเมตร หนาประมาณ 175 มิลลิเมตร น้ำหนักแต่ละแท่งเท่ากับ 33.33 กิโลกรัม (พพรธณ, 2540) เตรียมโดยการนำยางมารีดให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องรีดเครฟ (creping machine) แล้วทำการตัดย่อยแผ่นยางให้เป็นเม็ดเล็กขนาดประมาณ 24 มิลลิเมตร หลังจากอบให้แห้งแล้วจึงทำการอัดให้เป็นแท่ง นอกจากนี้ยางแผ่นไม่รมควัน ยางแผ่นรมควัน และยางแท่งแล้ว ยางเครฟก็จัดเป็นยางแห้งรูปแบบหนึ่ง โดยได้จากการนำเศษยาง เช่น ยางกันถ้วย เศษยางที่ติดบนเปลือกไม้ หรือเศษจากแผ่นรมควัน เป็นต้น ไปรีดในเครื่องรีดเครฟ พร้อมทั้งใช้น้ำทำความสะอาดเอาสิ่งสกปรกต่างๆ ออกจากยางในระหว่างการรีด จากนั้นจึงนำยางแผ่นที่ได้ไปผึ่งลมให้แห้ง

2.1.2 ข้อกำหนดการจัดชั้นยางแผ่นรมควัน (วราภรณ์, 2549)

2.1.2.1 ยางแผ่นรมควันชั้นพิเศษ (No.1 X RSS)

ต้องเป็นยางแผ่นรมควันที่ผลิต โดยมีการควบคุมอย่างเต็มที่ ก้อนยางแต่ละก้อนต้องไม่ขึ้นรา ไม่ปรากฏจุดหรือริ้วรอยต่างดวงของยางถูกรมควันมากเกินไป แผ่นยางต้องแห้งดี สะอาด รมควันสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น ปราศจากฟองอากาศ สิ่งสกปรก ตลอดจนสิ่งแปลกปลอมอื่นๆ

2.1.2.2 ยางแผ่นรมควันชั้น 1 (No. 1 RSS)

ก้อนยางแต่ละก้อนต้องไม่ขึ้นรา ไม่ปรากฏจุดหรือริ้วรอยของยางถูกรม ควันมากหรือน้อยเกินไป ยางต้องแห้งดี สะอาด รมควันสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น ปราศจากฟองอากาศ สิ่งสกปรก ตลอดจนสิ่งแปลกปลอมอื่นๆ

2.1.2.3 ยางแผ่นรมควันชั้น 2 (No. 2 RSS)

ก้อนยางมีราขึ้นได้บ้าง แต่ต้องไม่เกินกว่า 5% (ก้อนยางตัวอย่าง) แผ่นยางมีจุดต่างและฟองอากาศบ้าง แต่ปราศจากร่องรอยของการถูกรมควันไม่สม่ำเสมอ ยางต้องแห้งดี

สะอาด ไม่มีจุดต่างของสิ่งสกปรก หรือสิ่งแปลกปลอม

2.1.2.4 ยางแผ่นรมควันชั้น 3 (No. 3 RSS)

ก้อนยางมีราขึ้นได้บ้าง แต่ต้องไม่เกินกว่า 10% (ก้อนยางตัวอย่าง) แผ่นยางมีจุดต่างและฟองอากาศบ้าง แต่ต้องไม่มีร่องรอยของยางถูกรมควันไม่สม่ำเสมอ ยางต้องแห้งดี สะอาด ไม่มีสิ่งแปลกปลอม

2.1.2.5 ยางแผ่นรมควันชั้น 4 (No. 4 RSS)

ก้อนยางมีราขึ้นได้บ้าง แต่ต้องไม่เกินกว่า 20% (ก้อนยางตัวอย่าง) แผ่นยางมีจุดต่างฟองอากาศ และร่องรอยของการรมควันไม่ถูกต้องปานกลาง ยางต้องแห้งดี ไม่มีสิ่งแปลกปลอม

2.1.2.6 ยางแผ่นรมควันชั้น 5 (No. 5 RSS)

ก้อนยางมีราขึ้นได้บ้าง แต่ต้องไม่เกินกว่า 30% (ก้อนยางตัวอย่าง) แผ่นยางมีจุดต่างและฟองอากาศ และร่องรอยของการรมควันไม่ถูกต้องขนาดใหญ่

2.1.3 สมบัติของยางธรรมชาติ (พจนานุกรม, 2548)

2.1.3.1 ยางธรรมชาติที่คงรูปแล้วจะมีความยืดหยุ่นสูง คือ เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับยางหมดไป ยางจะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) ได้อย่างรวดเร็ว

2.1.3.2 ยางธรรมชาติ (ในสภาพที่ยังไม่คงรูป) มีสมบัติดีเยี่ยมในด้านความเหนียวติดกัน (tack) ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบ (assemble) ชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางล้อรถ เป็นต้น

2.1.3.3 มีความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีความเป็นระเบียบสูง จึงทำให้ยางธรรมชาติสามารถตกผลึกได้ง่ายเมื่อถูกยืด ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นจะช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับยาง ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงมีค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงมาก โดยที่ไม่ต้องใส่สารตัวเติมเสริมแรงเข้าช่วย ซึ่งสมบัตินี้จะแตกต่างจากยางสังเคราะห์ที่ส่วนใหญ่ มักมีค่าความทนทานต่อแรงดึงต่ำ จึงไม่สามารถนำไปใช้งานในทาง วิศวกรรมได้ นอกจากจะมีการเติมสารตัวเติมเสริมแรงเข้าช่วยเท่านั้น

2.1.3.4 มีความทนทานต่อการฉีกขาด (tear strength) เนื่องจากยางธรรมชาติสามารถตกผลึกได้เมื่อถูกยืด ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงมีความทนทานต่อการฉีกขาดสูงมาก ทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูง

2.1.3.5 ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัต (dynamic properties) ที่ดี มีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนต่ำในระหว่างการใช้งาน นอกจากนี้ ยางธรรมชาติยังมีความต้านทานต่อการล้า (fatigue resistance) ที่สูงมากอีกด้วย

2.1.3.6 มีค่าความต้านทานต่อการขัดถู (abrasion resistance) สูง แต่ยังคงต่ำกว่ายางเอสบีอาร์ (SBR) เล็กน้อย แต่เมื่อเปรียบเทียบกับยางสังเคราะห์ชนิดอื่นๆ พบว่ายางธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อการขัดถูอยู่ในกลุ่มที่สูงมาก

2.1.3.7 เนื่องจากองค์ประกอบของยางธรรมชาติเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้น ยางดิบจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน และโทลูอีน เป็นต้น ความสามารถในการละลายนี้จะลดลง ถ้ายางเกิดการคงรูป เนื่องจากมีการเชื่อมโยงทางเคมีของโมเลกุลจะเกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ ในการคงรูป จะไปขัดขวางกระบวนการละลายของยาง ในยางคงรูปจึงเกิดการบวมตัวในตัวทำละลายเหล่านี้เท่านั้น อย่างไรก็ตาม การบวมตัวของยางดังกล่าวจะทำให้สมบัติเชิงกลของยางด้อยลง ด้วยเหตุนี้ ยางธรรมชาติจึงไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียม หรือตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วต่างๆ แต่ยางจะทนทานต่อของเหลวที่มีขั้ว เช่น อะซิโตน หรือแอลกอฮอล์ นอกจากนี้ ยางธรรมชาติยังทนทานต่อกรดและด่างเจือจางได้ดี แต่ไม่ทนต่อกรดไนตริก และกรดกำมะถันเข้มข้น

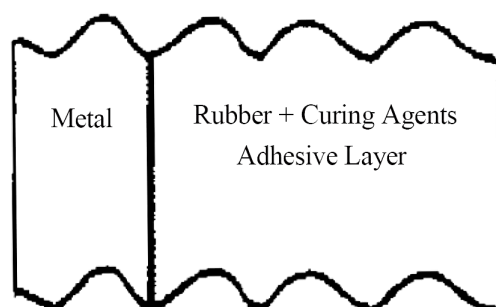
2.1.3.8 เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่มาก ทำให้ยางว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชัน) โดยมีแสงแดดหรือความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นยางธรรมชาติจึงถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย นอกจากนี้ ยางธรรมชาติยังไม่ทนต่อโอโซน เพราะเมื่อยางถูกยึดและได้รับโอโซนนานๆ จะเกิดรอยแตกขนาดเล็กจำนวนมากที่บริเวณพื้นผิวในทิศตั้งฉากกับทิศทางการยืดตัวของยาง ด้วยเหตุนี้ ในระหว่างการผลิตผลิตภัณฑ์จึงต้องมีการเติมสารเคมีบางชนิด เช่น สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (anti-degradants) และไข (wax) ลงไป เพื่อยืดอายุการใช้งานของยางธรรมชาติ

2.1.3.9 ยางธรรมชาติสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิตั้งแต่ -55°C จนถึง 70°C แต่หากเก็บยางไว้ที่อุณหภูมิการใช้งานสูงเกินไป สมบัติเชิงกลต่างๆ ก็จะด้อยลง เนื่องจากความร้อนจะทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพ ในบางกรณีที่มีการออกสูตรยางผสมสารเคมีได้อย่างเหมาะสม (มีการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพลงไป) ยางธรรมชาติอาจสามารถนำไปใช้งานได้อย่างต่อเนื่อง ที่อุณหภูมิสูงถึง 90°C หรืออาจสูงถึง 100°C (ในกรณีที่ยางได้รับอุณหภูมิสูงเป็นช่วงๆ เท่านั้น)

2.2 การทำผลิตภัณฑ์ยางดีบุกแบบทั่วไป และแบบปราศจากการใช้ชั้นกาว

การทำผลิตภัณฑ์ยางดีบุกแบบทั่วไป จะต้องมีการใช้ชั้นกาวในการยึดติดระหว่างยางกับโลหะ เพื่อให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวของพันธะระหว่างยางกับโลหะ และต้องทำการวัลคาไนซ์ด้วยระบบการวัลคาไนซ์ที่สมบูรณ์ เพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางดีบุก ซึ่งการทำผลิตภัณฑ์ยางดีบุกแบบทั่วไปนั้น แสดงได้ดังรูปที่ 2.2

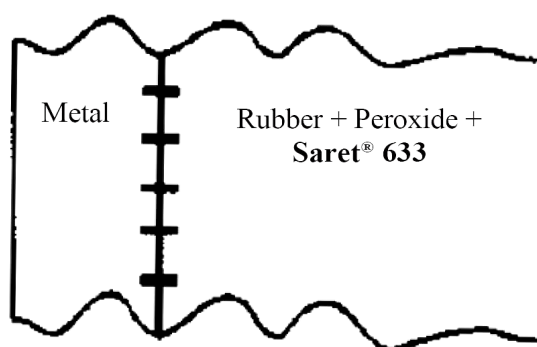
Conventional System



รูปที่ 2.2 การทำผลิตภัณฑ์ยางติดโลหะแบบทั่วไป (ใช้ชั้นกาวในการยึดติด)
(Costin and Nagel, 1990)

จากรายงานการใช้สาร metallic coagent พบว่าสาร metallic coagent ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ของโลหะที่สามารถเพิ่มสมบัติเชิงกล และเป็นส่วนสำคัญในการเพิ่มความสามารถให้การยึดติดระหว่างยางกับโลหะมีความแข็งแรงขึ้นได้ โดยปราศจากการใช้ชั้นกาว แสดงได้ดังรูปที่ 2.3 ในระหว่างการวัลคาไนซ์ สาร metallic coagent จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงในการยึดติดระหว่างยางกับผิวของโลหะขณะที่มีการเชื่อมโยง (crosslink) เกิดขึ้นภายในยาง ตัวอย่างสาร metallic coagent ได้แก่ Zinc diacrylate (ZDA) มีชื่อทางการค้าว่า Saret[®] 633 และ Zinc dimethacrylate (ZDMA) มีชื่อทางการค้าว่า Saret[®] 634 เป็นต้น (Costin and Nagel, 1990)

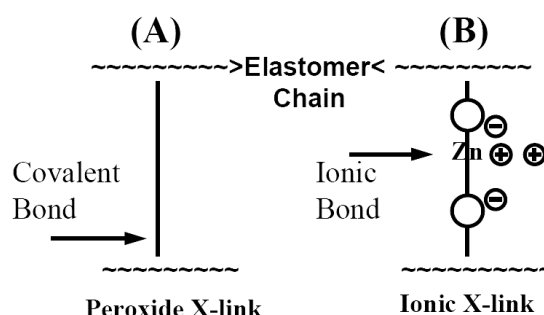
Saret[®] System



รูปที่ 2.3 การใช้สาร metallic coagents ในการทำผลิตภัณฑ์ยางติดโลหะ โดยปราศจากการใช้ชั้นกาว (Costin and Nagel, 1990)

สาร metallic coagent ที่มีการวัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ (peroxide cure) จะมีการเชื่อมโยงของพันธะแบบไอออนิก (ionic bond) ซึ่งสามารถแสดงสมบัติเด่นของระบบการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์ ในด้านการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิสูงได้ และแสดงสมบัติเด่นของระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน (sulphur cure) ในด้านการทนต่อแรงดึง (tensile strength) และความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear strength) ดังแสดงในรูปที่ 2.4

Metallic Coagent Cure



รูปที่ 2.4 กลไกการเชื่อมโยงของสาร metallic coagents
(Costin and Nagel, 1990)

ลักษณะเฉพาะของสาร metallic coagents (Costin and Nagel, 1990)

1. เกิดการไหลได้อย่างอิสระ (free flowing)
2. กระจายตัวได้ง่าย (easily dispersed)
3. ไม่เป็นสารระเหย (non-volatile)
4. มีกลิ่นน้อย (low odor)
5. ป้องกันการเกิดการสุกก่อนกำหนด (scorch) ด้วยสารหน่วง (retarder) ที่ไม่มีหมู่ nitroso
6. ให้สมบัติการยึดติดของพันธะไอออนิกระหว่างยางอีพดีเอ็ม (EPDM) กับเหล็กและทองเหลืองได้ดีขึ้น

การทำใหยางติดกับโลหะได้เอง เรียกว่า direct bonding compound สำหรับกระบวนการในการออกสูตรยางคอมพอนด์ให้ติดกับโลหะได้เองนั้น มีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับการเลือกใช้สารเคมีที่มีสมบัติในการเพิ่มประสิทธิภาพของการยึดติด ระหว่างพันธะของยางคอมพอนด์กับผิวของโลหะ ซึ่งสารเคมีที่เลือกนั้นจะต้องสามารถผสมลงในยางได้โดยตรง เพื่อที่จะได้เป็นยางคอมพอนด์ และสามารถวัลคาไนซ์ให้ติดกับโลหะที่เตรียมไว้ได้

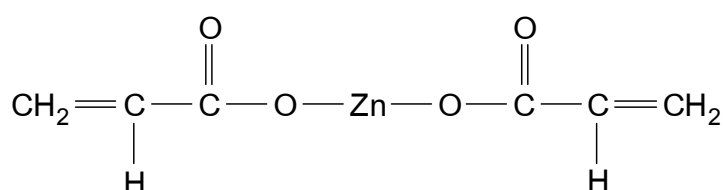
สารเคมีที่ผสมในยางคอมพอนด์ เพื่อทำให้เกิดการยึดติดกับโลหะได้เอง แบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

1. สารเสริมการยึดติด (adhesion promoters) โดยส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอินทรีย์ของโลหะ ได้แก่ Zinc diacrylate, Zinc dimethacrylate, Cobalt stearate และ Cobalt naphthenate เป็นต้น
2. สารช่วยในการวัลคาไนซ์ (vulcanizing agents) ได้แก่ กำมะถัน (sulphur) และซิงค์ออกไซด์ (ZnO)
3. สารตัวเติม (fillers) ได้แก่ เขม่าดำ (carbon black) และซิลิกา (silica)

ตัวอย่างสารเคมีที่ใช้เป็นสารเสริมการยึดติด

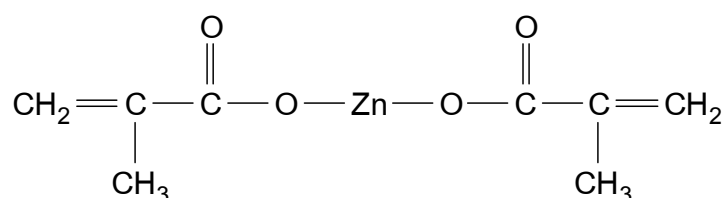
สารเคมีที่ใช้เป็นสารเสริมการยึดติด โดยผสมลงในยางคอมพอนด์เพื่อให้เกิดการติดประสานกับโลหะได้เอง โดยปราศจากการใช้ชั้นกาวมีอยู่หลายชนิด ได้แก่

1. สารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate (ZDA) มีชื่อทางการค้าว่า Saret[®] 633 ความถ่วงจำเพาะ 1.60 g/ml มีลักษณะเป็นผงสีเหลืองอ่อน มีกลิ่นคล้ายกรดเล็กน้อย มีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.5



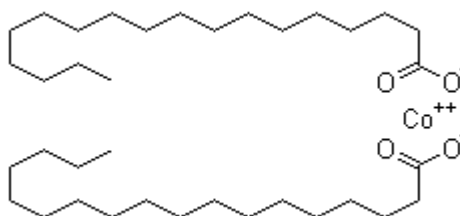
รูปที่ 2.5 สูตรโครงสร้างทางเคมีของ Zinc diacrylate (ZDA)
(Costin and Nagel, 1990)

2. สารเสริมการยึดติด Zinc dimethacrylate (ZDMA) มีชื่อทางการค้าว่า Saret[®] 634 ความถ่วงจำเพาะ 1.50 g/ml มีลักษณะเป็นผงสีขาวนวล มีกลิ่นคล้ายกรดเล็กน้อย มีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.6



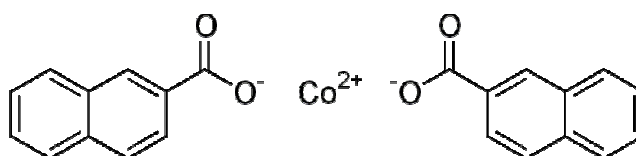
รูปที่ 2.6 สูตรโครงสร้างทางเคมีของ Zinc dimethacrylate (ZDMA)
(Costin and Nagel, 1990)

3. สารเสริมการยึดติด Cobalt stearate มีชื่อพ้องว่า Octadecanoic acid cobalt salt สูตรโมเลกุล $\text{Co}(\text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ ความถ่วงจำเพาะ 2.0 น้ำหนักโมเลกุล 625.9 g/mol มีลักษณะเป็นเม็ดสีม่วง มีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 สูตรโครงสร้างทางเคมีของ Cobalt stearate
(chemBlink, 2009)

4. สารเสริมการยึดติด Cobalt naphthenate มีชื่อพ้องว่า Naphthenic acid cobalt salt สูตรโมเลกุล $2(\text{C}_{11}\text{H}_7\text{O}_2)\cdot\text{Co}$ น้ำหนักโมเลกุล 401.28 g/mol มีลักษณะเป็นของเหลวสีม่วงเข้ม มีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 สูตรโครงสร้างทางเคมีของ Cobalt naphthenate
(Wikimedia Commons, 2007)

2.3 การพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชัน (Emulsion polymerization) (สิทธิพงษ์, 2548)

กระบวนการอิมัลชันพอลิเมอไรเซชัน เป็นหนึ่งในปฏิกิริยาแบบอนุมูลอิสระ (Free-Radical polymerization) โดยเริ่มจากการที่อนุมูลอิสระที่เกิดจากการแตกตัวของตัวริเริ่มปฏิกิริยา (initiator) ไปทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของมอนอเมอร์ที่ไม่อิ่มตัว หรือไวนิลมอนอเมอร์ (vinyl monomer) ที่ไม่เข้ากับน้ำ ซึ่งมอนอเมอร์ส่วนมากจะกระจายเป็นหยดน้ำมันขนาดเล็กแขวนลอยอยู่ในน้ำ การที่หยดมอนอเมอร์ขนาดเล็กสามารถกระจายแขวนลอยอยู่ในน้ำได้อย่างเสถียร เนื่องจากมีสารลดแรงตึงผิวที่เป็นโมเลกุลประเภทที่ด้านหนึ่งชอบน้ำและอีกด้านไม่ชอบน้ำ อยู่ที่ผิวสัมผัสระหว่างมอนอเมอร์และน้ำ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการอิมัลชันพอลิเมอไรเซชัน คือ อนุภาคเล็กๆ ของพอลิเมอร์กระจายอยู่ในน้ำอย่างเสถียร เรียกว่า ลาเท็กซ์ (latex)

ส่วนประกอบของระบบอิมัลชันพอลิเมอร์ไรเซชัน ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

1. ตัวกลาง (continuous phase) โดยทั่วไปใช้น้ำเป็นตัวกลาง หน้าที่ของตัวกลาง คือ เป็นตัวระบายความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา และเป็นตัวที่ช่วยให้เกิดการกระจายลอยตัว และช่วยในการละลายสารเริ่มต้นปฏิกิริยา น้ำที่ใส่อิมัลชันพอลิเมอร์ไรเซชันต้องปราศจากไอออนชนิดต่างๆ เนื่องจากน้ำที่มีไอออนจะไปยับยั้งปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน และลดประสิทธิภาพของสารที่ช่วยให้เกิดการกระจายลอยตัว โดยไปลดความว่องไวของประจุ นอกจากนี้ยังทำให้เปอร์ซัลเฟตไม่ละลาย

2. มอนอเมอร์ (monomer) เป็นตัวกำหนดสมบัติของพอลิเมอร์ที่ได้ มอนอเมอร์ส่วนใหญ่มีพันธะคู่ ซึ่งเป็นไวนิลที่ไม่มีตัวในโมเลกุล

3. สารลดแรงตึงผิว (surfactant) เป็นสารที่ทำให้เกิดการกระจายลอยตัวของมอนอเมอร์ในตัวกลาง สารลดแรงตึงผิวเป็นโมเลกุลที่มีขั้ว (ไฮโดรฟิลิก) และไม่มีขั้ว (ไฮโดรโฟบิก) อยู่ด้วยกัน หน้าที่ของสารลดแรงตึงผิว คือ

3.1 ลดแรงตึงผิวระหว่างมอนอเมอร์และน้ำ เพื่อทำให้เกิดการกระจายลอยตัวที่เสถียร

3.2 ทำให้มอนอเมอร์เป็นอนุภาคขนาดเล็กที่เสถียร

3.3 ทำให้เกิดไมเซลล์ (micelle) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน

3.4 ทำให้เกิดอนุภาคของพอลิเมอร์ และป้องกันไม่ให้เกาะกันเป็นก้อนระหว่างและหลังปฏิกิริยา

4. ตัวริเริ่มปฏิกิริยา (initiator) แบ่งตามลักษณะของพลังงานที่ทำให้แตกตัวได้

3 ชนิด

4.1 ตัวริเริ่มปฏิกิริยาแบบแตกตัวด้วยความร้อน (thermal initiator)

4.2 ตัวริเริ่มปฏิกิริยาแบบรีดอกซ์ (redox initiator)

4.3 ตัวริเริ่มปฏิกิริยาแบบแตกตัวด้วยแสง (photo initiator)

2.4 การเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติด้วยเทคนิคการกราฟต์

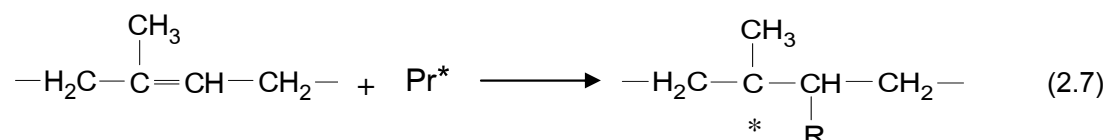
การสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์ ต้องทำให้เกิดตำแหน่งที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาขึ้นบนโมเลกุลของพอลิเมอร์ จึงจะสามารถเกิดการโคพอลิเมอร์ไรเซชันได้ วิธีที่ใช้เตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ส่วนใหญ่ ได้จากวิธีเรดิคัลพอลิเมอร์ไรเซชัน (radical polymerization) ซึ่งจะเกิดการกราฟต์โคพอลิเมอร์แบบเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) หรือไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous) ขึ้นกับว่าพอลิเมอร์ที่ถูกกราฟต์สามารถละลายในมอนอเมอร์ที่มากกราฟต์ได้หรือไม่ การสังเคราะห์โคพอลิเมอร์มีหลายวิธีได้แก่

2.4.1 การถ่ายโอนแรดิคัล ในระหว่างการสังเคราะห์พอลิเมอร์อาจมีการถ่ายโอน แรดิคัล จากพอลิเมอร์ที่กำลังขยายขนาด (Pr) ให้กับสารริเริ่ม มอนอเมอร์ สารถ่ายโอนสายโซ่ (chain transfer agent) ตัวทำละลายพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์ที่กำลังขยายขนาด ดังสมการต่อไปนี้



แต่กลไกจะมีการถ่ายโอนอะตอมของไฮโดรเจนไปยังสายโซ่ของพอลิเมอร์ที่กำลังขยายขนาด ทำให้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนพอลิเมอร์สิ้นสุดลง ซึ่งกลไกในสมการที่ 2.5 เป็นกลไกที่จำเป็นสำหรับการสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์

2.4.2 การกราฟต์ผ่านตำแหน่งที่ไม่อิ่มตัวในยางธรรมชาติ เป็นการเข้าทำปฏิกิริยาของสายโซ่พอลิเมอร์ที่กำลังขยายขนาดที่ตำแหน่งไม่อิ่มตัว หรือพันธะคู่ของโมเลกุลในธรรมชาติ ดังแสดงในสมการ 2.7



2.4.3 พอลิเมอไรเซชันแบบรีดอกซ์ เป็นวิธีการเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดกับพอลิเมอร์ซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิล เช่น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และเซลลูโลส เป็นต้น ในการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์โดยใช้ซีริกไอออน (ciric ion) หรือสารออกซิไดซ์ (oxidizing agent) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะทำให้เกิดอนุมูลอิสระบนพอลิเมอร์ วิธีนี้ไม่มีไฮโมพอลิเมอร์เกิดในระบบ เพราะมอนอเมอร์ไม่ไวต่อซีริกไอออน นอกจากนี้ สารริเริ่มในปฏิกิริยารีดอกซ์มีข้อจำกัดในกรณีที่พอลิเมอร์มีหมู่ฟังก์ชันอื่น

2.4.4 การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตเคมีคัล สารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างที่เหมาะสมสามารถดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงที่สามารถมองเห็นได้และในช่วงอัลตราไวโอเล็ต ทำให้โมเลกุลหรืออะตอมเปลี่ยนระดับพลังงานของโมเลกุลที่ถูกกระตุ้นมากเกินไป อาจทำให้สายโซ่โมเลกุล

ขาดออก และถ้าในระบบมีมอนอเมอร์อยู่ด้วย จะมีผลทำให้เกิดโคพอลิเมอร์แบบบล็อก แต่ถ้าหมู่ด้านข้างถูกกระตุ้นจะทำให้เกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์แทน

2.4.5 เทคนิคการฉายรังสี เมื่อพอลิเมอร์ได้รับการฉายรังสีพลังงานสูง จะเกิดผลกระทบสองประการ คือ 1. เกิดการสูญเสียหมู่ที่อยู่ด้านข้าง เช่น ไฮโดรเจนอะตอมจากสายโซ่พอลิเมอร์ 2. สายโซ่หลักขาดออก

ซึ่งทั้ง 2 กรณี อนุมูลอิสระของพอลิเมอร์อื่นสามารถรวมตัวกับพอลิเมอร์ที่ถูกฉายรังสี แล้วเกิดเป็นกราฟต์โคพอลิเมอร์และบล็อกโคพอลิเมอร์ได้ตามลำดับ การสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์โดยฉายรังสีโคบอลต์ 60 ให้น้ำยาธรรมชาติที่ผสมเมทิลเมทาคริเลต ทำให้มีประสิทธิภาพของการกราฟต์สูง และในระบบไม่พบโฮโมพอลิเมอร์ของเมทิลเมทาคริเลต

2.5 กราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติ

กระบวนการอิมัลชันพอลิเมอไรเซชัน (Emulsion Polymerization) คือ การสังเคราะห์พอลิเมอร์ในรูปของอนุภาคพอลิเมอร์ ซึ่งแขวนลอยอยู่ในตัวกลางที่เป็นของเหลว ซึ่งถ้าตัวกลางเป็นน้ำ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเรียกว่า ลาเท็กซ์ (latex) ข้อดีของการใช้การสังเคราะห์แบบนี้ก็คือ ความหนืดของผสมพอลิเมอร์จะไม่มีค่าต่ำตลอดระยะเวลาของการพอลิเมอไรเซชัน เนื่องจาก ระบบประกอบด้วยน้ำเป็นส่วนใหญ่ที่ไม่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยา ซึ่งถ้าเป็นการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบสารละลาย เมื่อเวลาของปฏิกิริยาผ่านไป ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะมีความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างมาก ทำให้จำเป็นต้องมีตัวกวนหรือตัวผสมที่มีแรงขับสูง และเนื่องจากยางธรรมชาติจากแหล่งกำเนิดอยู่ในรูปของลาเท็กซ์อยู่แล้ว ทำให้สามารถนำมาทำการสังเคราะห์แบบอิมัลชันพอลิเมอไรเซชันได้ทันที ช่วยลดขั้นตอนของการเตรียมสารละลายของยางธรรมชาติและลดการใช้ตัวทำละลาย ส่งผลให้ไม่มีการปนเปื้อนของตัวทำละลายในผลิตภัณฑ์ที่ได้ นอกจากนี้การใช้ระบบพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชัน จะทำให้แต่ละอนุภาคของยางธรรมชาติมีส่วนของพอลิเมอร์ชนิดที่สองประกอบอยู่ ซึ่งจะทำให้เกิดการกระจายตัวของพอลิเมอร์ชนิดที่สองในยางธรรมชาติอยู่ในระดับจุลภาค (microscopic) และจะส่งผลดีต่อคุณสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์เชิงประกอบ

ในการสังเคราะห์อนุภาคลาเท็กซ์เชิงประกอบของพอลิเมอร์ 2 ชนิด ทำได้โดยการนำพอลิเมอร์ชนิดแรก ซึ่งอยู่ในรูปของลาเท็กซ์มาทำให้บวมโดยมอนอเมอร์ชนิดที่สอง จากนั้นจึงทำการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาลงไป เพื่อทำให้เกิดการพอลิเมอไรเซชันของมอนอเมอร์ดังกล่าว บนอนุภาคของพอลิเมอร์ชนิดแรก ตัวแปรที่สำคัญที่จะส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากพอลิเมอร์ลาเท็กซ์เชิงประกอบก็คือ สันฐานวิทยาของอนุภาคลาเท็กซ์เชิงประกอบ โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อสันฐานวิทยามีอยู่หลายปัจจัย แต่ปัจจัยที่สำคัญนั้นได้แก่ ชนิดและปริมาณของ

พอลิเมอร์ที่ใช้ (อัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์แต่ละตัว) ความเป็นขั้วของพอลิเมอร์ รูปแบบการเติมมอนอเมอร์ สารเพิ่มที่ใช้ (surfactant หรือ chain transfer agent) ชนิดของตัวริเริ่มปฏิกิริยา และอุณหภูมิของปฏิกิริยา เป็นต้น

เนื่องจากยางธรรมชาติมีองค์ประกอบเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ทำให้ไม่สามารถยึดติดกับโลหะได้โดยตรง จึงจำเป็นที่จะต้องทำให้ยางมีขั้วขึ้นโดยการกราฟต์ยางธรรมชาติด้วยมอนอเมอร์ที่มีความเป็นขั้วสูง เช่น 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (2-hydroxyethyl methacrylate, HEMA) ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งที่จะปรับปรุงสมบัติให้ดีขึ้น และใช้ประโยชน์ได้กว้างขวางมากขึ้น ปกติ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ หรือโคพอลิเมอร์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมสี และกาว (Quadrat *et al.*, 2004) เป็นหลัก

2.6 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (HEMA)

2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (HEMA) มีสูตรโครงสร้างทางเคมี ดังแสดงในรูปที่ 2.9

ชื่อเคมี IUPAC : 2-Methyl-2 propenoic acid 2-hydroxyethyl ester

ชื่อเคมีทั่วไป : 2-Hydroxyethyl methacrylate

สูตรโมเลกุล : $\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)\text{COOCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$

น้ำหนักโมเลกุล : 130.14

สถานะ : ของเหลวใส ไม่มีสี

กลิ่น : คล้ายผลไม้

จุดเดือด ($^{\circ}\text{C}$) : 205–208

จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง ($^{\circ}\text{C}$) : -12

ความถ่วงจำเพาะ : 1.073 g/mL ที่ 25°C

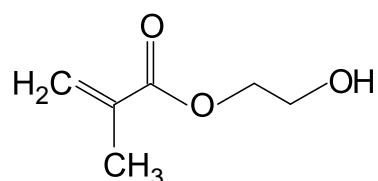
ความเป็นกรดต่าง (pH) : 4 ที่ 25°C

ความสามารถในการละลายน้ำที่ (กรัม/100 มล.) : ละลายได้ ที่ 20°C

สารที่ทำให้เสถียร : ไฮโดรควิโนนโมโนเมทิลอีเธอร์

(hydroquinone monomethyl ether)

ข้อมูลอื่น ๆ : สารนี้ไวต่อแสง ความชื้น และความร้อน



รูปที่ 2.9 สูตรโครงสร้างทางเคมีของ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (HEMA)

(Bimax Chemicals Ltd., 2006)

2.7 การติดประสาน

2.7.1 ทฤษฎีของการติดประสาน

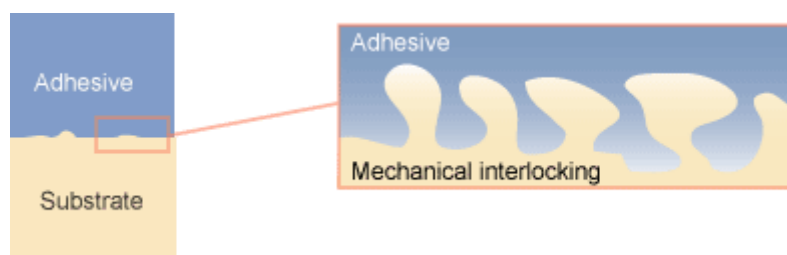
การติดประสาน หมายถึง กระบวนการนำสิ่งต่างๆ ที่ต้องการจะนำมาเชื่อมต่อกันเข้าด้วยกันโดยใช้กาว หรืออีกความหมายหนึ่ง คือ การที่สถานะที่สองพื้นผิวยึดติดกัน โดยเกิดแรงกระทำระหว่างผิวอย่างใดอย่างหนึ่ง หรือการประกอบกันของแรงอันเนื่องมาจากอิเล็กทรอนิกส์นอก แรงทางกายภาพ หรือการติดกันโดยการเกี่ยวระหว่างผิว (Garbassi *et al.*, 1994)

2.7.2 กลไกการยึดติด

การที่จะทำให้วัตถุ 2 ชิ้นหรือมากกว่าติดเข้าด้วยกันนั้น จะต้องทำให้อะตอมของวัตถุทั้งสองเข้าใกล้กันมากที่สุด และเพียงพอที่จะทำให้เกิดแรงกระทำระหว่างโมเลกุล โดยปกติควรมีระยะห่างไม่เกิน 3–10 Å หากเกินระยะนี้ แรงดังกล่าวจะลดลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นการที่จะเกิดการยึดติดที่ดีต้องทำให้วัตถุทั้งสองเข้าใกล้กันเพียงพอ (ชนาวดี, 2546) โดยใช้ทฤษฎีต่างๆ ต่อไปนี้ในการอธิบายกลไกการยึดติดของสารยึดติดกับวัสดุ

2.7.2.1 การยึดติดทางกล (Mechanical bonding)

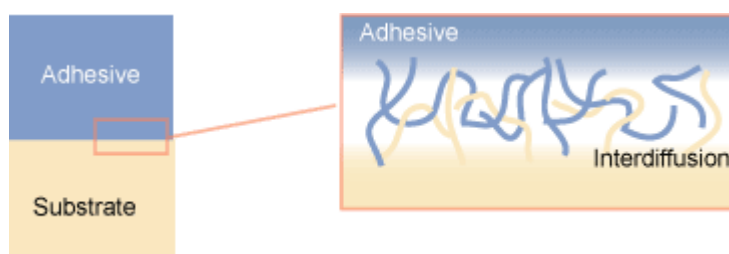
การยึดติดทางกลเป็นการยึดติดโดยใช้แรงยึดเหนี่ยวที่เกิดจากการเกี่ยวติดกันระหว่างโมเลกุลของสารยึดติดกับวัสดุ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า mechanical interlocking ใช้ในการยึดติดกับวัสดุที่มีผิวหน้าขรุขระไม่เรียบ เช่น ไม้ กระดาษ หรือเส้นใย ความขรุขระของผิวหน้าทำให้มีพื้นที่ผิวในการยึดติดระหว่างสารยึดติดกับวัสดุมากขึ้น การยึดติดทางกลนี้เกิดขึ้นเมื่อหาสารยึดติดบนพื้นผิววัสดุที่ต้องการจะยึดติด และสารยึดติดจะไหลแทรกตัวไปบนพื้นผิวที่ขรุขระ รวมทั้งซอก ร่อง รู และช่องว่างอื่นๆ บนพื้นผิว ทำให้สารยึดติดไหลเข้าไปแทนที่อากาศในช่องว่างบนพื้นผิวของวัสดุ หรือการแพร่ผ่านลงไปในผิวของวัสดุ เมื่อสารละลายระเหย ทำให้เกิดการเซตตัว เป็นเหตุเกิดการล็อกติดอยู่กับพื้นผิวของวัสดุ แสดงดังรูปที่ 2.10 ความแข็งแรงของการยึดเกาะนี้ขึ้นอยู่กับความขรุขระ (roughness) ของพื้นผิวที่จะเกิดการสัมผัส ทำให้เกิดการแทรกตัวของสารยึดติด รวมทั้งปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความสามารถของสารยึดติด ในการเปียกและแทรกตัวในพื้นผิวที่จะยึดติด เช่น ความหนืดของสารยึดติด พื้นผิวที่มีความเรียบเกินไปจะเกิดการยึดเกาะเชิงกลน้อยหรือไม่มีเลย (อิทธิพล, 2544)



รูปที่ 2.10 การยึดติดทางกล (Mechanical bonding)
(SpecialChem Adhesives & Sealants, 2007b)

2.7.2.2 การแพร่เข้าหากันของสายโซ่ (Interdiffusion of chain)

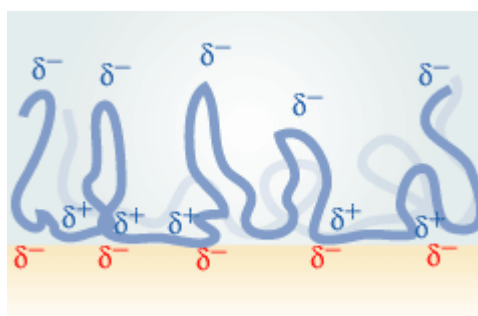
กลไกการยึดติดแบบนี้สามารถเกิดกับพื้นผิวที่มีการเคลือบพอลิเมอร์ เพื่อปรับปรุงผิวก่อน แล้วจึงทำการเคลือบสารยึดติดลงไป การยึดติดของพื้นผิวสองชนิดสามารถเกิดได้ ถ้าโมเลกุลบริเวณพื้นผิวสัมผัสทั้งสองชนิดมีการแพร่ (diffusion) เข้าหากันและกัน แสดงดังรูปที่ 2.11 เป็นการแพร่ของสายโซ่โมเลกุลภายในเนื้อสารยึดติด มีการเคลื่อนไหว และบิดตัวของสายโซ่ ความแข็งแรงของการยึดเกาะชนิดนี้จะขึ้นอยู่กับปริมาณการเกี่ยวพันกันของสายโซ่โมเลกุล (molecular entanglement) ว่ามีมากหรือน้อย อีกทั้งขึ้นอยู่กับชนิดและจำนวนสายโซ่โมเลกุล (อิทธิพล, 2544) เนื่องจากความสามารถในการแพร่และการพันกันของสายโซ่ขึ้นอยู่กับความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุล (molecular motion) ดังนั้นการยึดเกาะแบบอินเทอร์ดีฟิวชันสามารถเพิ่มความสามารถในการแพร่ของสายโซ่โมเลกุลสารยึดติดได้ โดยเพิ่มแรงกด เพิ่มอุณหภูมิ เพิ่มเวลาในการติด หรือลดน้ำหนักโมเลกุลของสายโซ่ นอกจากนี้การใช้ตัวทำละลาย (solvents) ทาที่พื้นผิว หรือการใช้สารเติมแต่งจำพวกพลาสติกไซเซอร์ (plasticizers) หรือแทกคิไฟเออร์ (tackifier) ร่วมด้วยจะทำให้สายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์สามารถเคลื่อนที่ได้ง่าย



รูปที่ 2.11 การแพร่เข้าหากันของสายโซ่ (Interdiffusion of chain)
(SpecialChem Adhesives & Sealants, 2007c)

2.7.2.3 แรงดึงดูดประจุหรือไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic attraction)

แนวทางประจุไฟฟ้าเป็นอีกปัจจัยหนึ่ง ในการยึดติดระหว่างสารยึดติดกับวัตถุ แรงที่ใช้ในการยึดติด เป็นแรงที่ได้มาจากชั้นอิเล็กตรอนคู่ (electrical double layer) ของประจุบนพื้นผิวที่ต่างกัน แรงดึงดูดจะเกิดขึ้นเมื่อพื้นผิวทั้งสองชนิดที่มีประจุต่างกันมาอยู่ใกล้กัน นั่นคือ ถ้าพื้นผิวหนึ่งมีประจุบวก (net positive charge) และอีกพื้นผิวหนึ่งมีประจุรวมเป็นลบ (net negative charge) ตัวอย่างเช่น อันตรกิริยาระหว่างกรด-เบส (acid-base interaction) และพันธะไอออนิก (ionic bonding) แสดงดังรูปที่ 2.12 ความแข็งแรงของกลไกการยึดติดชนิดนี้ ขึ้นกับความหนาแน่นประจุ (charge density) แรงดึงดูดระหว่างประจุหรือไฟฟ้าสถิตย์จะไม่ใช้แรงยึดติดหลักระหว่างพื้นผิวสองพื้นผิว แต่แรงดึงดูดชนิดนี้มีส่วนร่วมกับกลไกการยึดติดชนิดอื่น ช่วยให้เกิดการยึดเกาะกันระหว่างสองพื้นผิวได้ดีขึ้น เช่น การยึดเกาะของสารคู่ควบประเภทไซเลน (silane coupling agent) ที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นประจุบวก (cationic function groups) เป็นต้น เกาะกันอย่างไรร

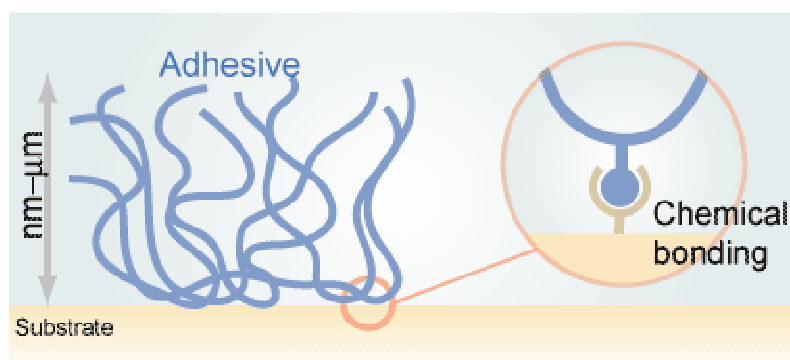


รูปที่ 2.12 แรงดึงดูดประจุหรือไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic attraction)

(SpecialChem Adhesives & Sealants, 2007d)

2.7.2.4 พันธะทางเคมี (Chemical bonding)

เป็นกลไกการยึดติดที่สำคัญที่สุดชนิดหนึ่ง แสดงดังรูปที่ 2.13 ซึ่งเป็นการยึดติดเนื่องจากการแทรกซึมระหว่างสารยึดติดและวัสดุ เกิดขึ้นเมื่อพื้นผิวหนึ่งมีหมู่ฟังก์ชันทางเคมี (function groups) บนพื้นผิว และอีกพื้นผิวหนึ่งมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมี เกิดเป็นพันธะทางเคมี ได้แก่ พันธะโควาเลนต์เชื่อมระหว่างพื้นผิวสองพื้นผิว ซึ่งเป็นการยึดติดที่แข็งแรง ความแข็งแรงของกลไกการยึดติดชนิดนี้ ขึ้นกับจำนวนและชนิดของพันธะที่เกิดขึ้น การเสถียรภาพของพื้นผิวระหว่างอินเทอร์เฟซจะเกี่ยวข้องกับการแตกหักของพันธะเคมีนี้ ตัวอย่างการยึดเกาะด้วยพันธะทางเคมี ได้แก่ การเกิดพันธะโควาเลนต์ระหว่างสารคู่ควบ (coupling agent) กับหมู่ฟังก์ชันบนพื้นทั้งสอง



รูปที่ 2.13 พันธะทางเคมี (Chemical bonding)
(SpecialChem Adhesives & Sealants, 2007a)

2.7.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการติดประสาน

โลหะส่วนใหญ่มีชั้นของออกไซด์เกาะอยู่บนพื้นผิว โดยโครงสร้างของออกไซด์ที่เกิดขึ้นมีอยู่หลายแบบ ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและสภาวะแวดล้อมของโลหะแต่ละชนิด (Su, Y.-Y. and Shemenski R.M., 2000) นอกจากนี้ การที่วัสดุต่างๆ จะได้ยึดติดประสานกันได้ ยังต้องอาศัยปัจจัยอื่นๆ อีก ดังเช่น

- 2.7.3.1. ลักษณะผิวของวัสดุ (Nature of substrate surface)
 - a) ลักษณะผิวเชิงเรขาคณิต (surface geometry)
 - b) ลักษณะผิวเชิงเคมี (surface chemistry)
 - c) ความแข็งแรงเชิงกลของผิว (mechanical strength of surface region)
- 2.7.3.2. สมบัติเชิงกลของผิววัสดุ (Mechanical properties of substrate)
- 2.7.3.3. ลักษณะของสารยึดติด (Nature of adhesive)
 - a) ความหนืด (viscosity)
 - b) ลักษณะทางเคมี (chemical nature)
 - c) สมบัติเชิงกล (mechanical properties)
- 2.7.3.4. สภาวะของการเกิดพันธะ (Bonding condition)
 - a) ความดัน (pressure)
 - b) อุณหภูมิ (temperature)
 - c) เวลา (time)
- 2.7.3.5. สภาวะก่อนการนำไปทดสอบ (Condition prior to be testing)
 - a) อุณหภูมิ (temperature)
 - b) ความชื้น (humidity)
 - c) ความเค้น (stress)

2.7.3.6. สภาวะขณะทำการทดสอบ (Testing condition)

- a) อัตราในการยืด (strain rate)
- b) อุณหภูมิ (temperature)

2.7.4 ปัจจัยในการเลือกวิธีการเตรียมผิว (Adhesives Design Toolkit, 2007)

เนื่องจากการนำโลหะมาใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมอยู่หลายชนิดแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับงาน ซึ่งโลหะแต่ละชนิดก็มีวิธีการเตรียมผิวที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับปัจจัยดังต่อไปนี้

2.7.4.1. ต้นทุนและวิธีการผลิต เนื่องจากการเตรียมผิวด้วยวิธีทางเคมีนั้น มักจะเสียค่าใช้จ่ายสูงกว่าการเตรียมผิวด้วยวิธีทางกล

2.7.4.2. สุขภาพและความปลอดภัย ในขณะที่เตรียมผิวโลหะ ควรมีอุปกรณ์ในการป้องกันการสูดดมสารเคมีที่ใช้ในการทำความสะอาดผิวหน้า และเตรียมชิ้นโลหะด้วยความระมัดระวัง

2.7.4.3. ความยากง่ายในการเตรียมผิว ขึ้นอยู่กับความพร้อมของเครื่องมือ สารเคมี และชนิดของโลหะ ในการเลือกเครื่องมือควรใช้เครื่องมือเดิมทุกครั้ง ไม่ควรเปลี่ยนเครื่องมือหากไม่จำเป็น

2.7.5 ผลของการเตรียมผิววัสดุ (Effect of surface treatment)

ในการเตรียมผิววัสดุที่จะติดกับสารยึดติดนั้น เป็นการเพิ่มพื้นที่ในการยึดติดและเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวของสารยึดติดบนพื้นผิวของวัสดุที่ต้องการยึดติด รวมทั้งเป็นการเตรียมมุมในการยึดติดให้เหมาะสมกับสารยึดติดที่นำมายึดติด โดยวิธีการเตรียมผิววัสดุที่ต้องการนำมายึดติด (Wake, 1984) สามารถทำได้หลายวิธีดังนี้

2.7.5.1. วิธีทางกล (Mechanical method) เป็นการกำจัดชั้นผิวที่อ่อนแอออกไป ทำให้ผิวมีความขรุขระและยังเป็นการเพิ่มความแข็งแรงของรอยต่อได้อีกด้วย การเตรียมผิวด้วยวิธีนี้ ทำให้เกิดการยึดติดเชิงกล (mechanical interlocking)

2.7.5.2. วิธีทางเคมี (Chemical method) เป็นการใช้สารเคมีในการกำจัดผิวชั้นนอกออก ซึ่งจะทำให้ผิวมีความขรุขระ และทำให้มีการเปียกผิว (wetting) ของสารยึดติด (กาว) ได้ดียิ่งขึ้น

2.7.5.3. วิธีบัลค์ (Bulk method) เป็นวิธีการเตรียมผิวที่ถือว่าเป็นวิธีทางอ้อม ซึ่งการเตรียมผิวด้วยวิธีนี้มีผลในการเพิ่มความแข็งแรงของรอยต่อ

2.7.6 ข้อดีของการเตรียมผิว (Dunlap *et al.*, 2002)

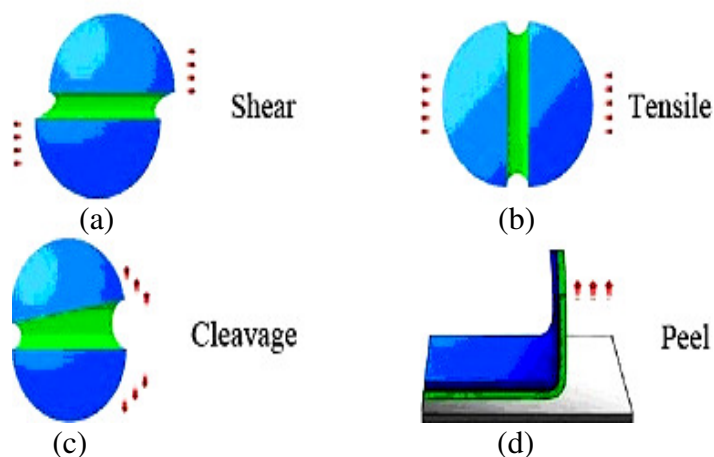
เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วตั้งแต่ปี ค.ศ. 1950 ว่า การเตรียมพื้นผิว เป็นวิธีการทำความสะอาดพื้นผิว ซึ่งเป็นขั้นตอนแรกในการทำให้พันธะของการยึดติดมีค่าเพิ่มขึ้น ในอุตสาหกรรมเกี่ยวกับการบิน และพบว่า การเตรียมพื้นผิวมีความสำคัญในการยึดติดของพันธะ และการทำความสะอาดพื้นผิวมีอยู่หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีนั้นสามารถเพิ่มความแข็งแรงของพันธะและต้านทานการกัดกร่อนได้ โดยส่วนใหญ่ การทำความสะอาดพื้นผิว เป็นวิธีการเบื้องต้นก่อนทำการยึดติดในขั้นต่อไป

- 2.7.6.1. เพื่อกำจัดหรือขจัดขบวนการเกิดชั้นผิวที่อ่อนแอ (weak layer) ขึ้น บนผิววัสดุ
- 2.7.6.2. เพื่อให้การยึดติดระหว่างสารยึดติด หรือสารรองพื้น และวัสดุในระหว่างการยึดติดสามารถยึดติดกันในระดับโมเลกุลได้มากที่สุด และเพิ่มความสามารถในการยึดติดกับวัสดุที่ติดได้ยาก เช่น polyolefins และ polytetrafluoroethylene
- 2.7.6.3. เพื่อเพิ่มอายุการใช้งาน
- 2.7.6.4. เพื่อให้ผิวมีความขรุขระ
- 2.7.6.5. เพื่อปกป้องพื้นผิวก่อนทำการยึดติด

2.7.7 การทดสอบความแข็งแรงในการยึดติด (ชนาวดี, 2546)

การยึดติดที่ดีต้องมีความต้านทานการแยก อันเนื่องมาจากแรงกระทำในลักษณะต่างๆ ตามสภาพการใช้งาน ดังนั้นจึงต้องทำการทดสอบความแข็งแรงของการยึดติด โดยใช้แรงดึงในแบบต่างๆ ดังนี้

- 2.7.7.1 การดึงในแนวระนาบที่ขนานกับการยึดติด (shear) โดยให้แรงดึงกระจายไปทั่วพื้นที่ที่เกิดการยึดติดทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 2.14(a)
- 2.7.7.2 การดึงในแนวตั้งฉากกับการยึดติด (tensile) โดยให้แรงดึงกระจายไปทั่วพื้นที่ที่เกิดการยึดติดทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 2.14(b)
- 2.7.7.3 การดึงโดยใช้แรงแยก (cleavage) ซึ่งให้แรงในการแยกเฉพาะบริเวณขอบของการยึดติดเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.14(c)
- 2.7.7.4 การดึงแบบลอก (peel) ใช้ในการทดสอบเมื่อมีวัสดุอย่างน้อยหนึ่งชนิดที่ผิวมีความยึดหยุ่นสูง ดังแสดงในรูปที่ 2.14(d)



รูปที่ 2.14 การทดสอบความแข็งแรงของการยึดติด
(The Adhesive and Sealant Council, Inc., 2008)

2.7.8 ลักษณะของความล้มเหลวในการยึดติด

ความแข็งแรงในการยึดติดของวัสดุจะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของบริเวณที่มีแรงยึดติดต่ำที่สุดในชิ้นงาน ซึ่งมักพบตามบริเวณต่างๆ เช่น ระหว่างสารรองพื้นกับวัสดุ ภายในเนื้อวัสดุ หรือเกิดขึ้นทั้งสองบริเวณ ซึ่งลักษณะของความล้มเหลวได้แสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ลักษณะของความล้มเหลวในการยึดติด
(Vettetworks, 2008)

2.8 การตรวจสอบเอกสาร

2.8.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการติดประสาน

Ansarifar, *et al.* (2003) ได้ทำการศึกษาความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติมซิลิกาชนิดตกตะกอน ปริมาณ 60 phr (โดยน้ำหนัก) กับไนลอน 6,6 โดยคำนวณความแข็งแรงของการยึดติดจากการทดสอบแบบลอก (peel test) นอกจากนี้ยังมีการใส่ bis[3-triethoxysilylpropyl]-tetrasulphane (TESPT) ซึ่งเป็น bifunctional organosilane

ลงไปใ้ในยางคอมเปานด์อีกด้วย ในปริมาณ 3 phr และ 7 phr เพื่อไปขัดขวางไม่ให้ซิลิการบวทกกลไกการเกิดปฏิกิริยาในการวัลคาไนซียงด้วยระบบกำมะถัน หลังจากนั้นนำยางมายึดติดกับไ้ไนลอน 6,6 ด้วยกาที่ใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ (organic solvent-based) ซึ่งเป็นระบบในการยึดติดของยางกับไ้ไนลอน สำหรับการทดสอบความแข็งแรงของการยึดติดได้ทำการทดสอบแบบปอกด้วยมุม 90 องศา และใช้อัตราเร็วคงที่หรือภายใต้แรงคงที่ จากการทดสอบโดยใช้อัตราเร็วคงที่ พบว่าสามารถคำนวณพลังงานในการปอก (peeling energies) ได้มากกว่า 17 kJ/m^2 แต่เมื่อทดสอบภายใต้แรงคงที่ พบว่าความล้มเหลวของรอยต่อที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับเวลาของการทดสอบ และเกิดความล้มเหลวแบบโคฮีซีฟ (cohesive failure) ขึ้นในยางและในสารรองพื้น (MEGUM 3276) มากกว่าที่จะเกิดบริเวณรอยต่อระหว่างสารรองพื้นกับไ้ไนลอน และตำแหน่งของการเกิดความล้มเหลวมีความไม่แน่นอน แต่ห่างจากสารทาทั้บ (MEGUM 102) อยู่ในช่วง $250 \mu\text{m}$ และ $700 \mu\text{m}$ และเป็นที่น่าสังเกตว่าการใส่ TESPT ลงในยางในปริมาณที่มากกว่า 7 phr จะไม่มีผลต่อความแข็งแรงในการยึดติด

Ansarifar, *et al.* (2002) เนื่องจากได้มีการนำสารรองพื้น (primer) มาใช้ในงานด้านยางติดโลหะอยู่บ่อยครั้ง เพื่อป้องกันพื้นที่ผิวในการยึดติดไม่ให้เกิดการกัดกร่อนขณะใช้งาน จึงได้ทำการศึกษาบทบาทของสารรองพื้น (primer) ของการยึดติดระหว่างยางกับไ้ไนลอน 6,6 โดยการทดสอบแบบปอก (peel test) โดยขึ้นทดสอบที่นำมาศึกษานั้น เตรียมขึ้นจากการวัลคาไนซียงที่เติมเขม่าดำ ชนิด HAF ปริมาณ 60 phr ให้ยึดติดกับไ้ไนลอน 6,6 ซึ่งเป็นซั้บสเตอร์ท ที่รองพื้นด้วยกาที่ใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ (organic solvent-based) หรือกาที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย (water-based) หลังจากนั้นทาทั้บด้วยสารยึดติดที่ใช้สำหรับการยึดติดกับยาง และทำการทดสอบแบบปอก ด้วยมุม 90 องศา ภายใต้แรงคงที่ ที่อุณหภูมิประมาณ 23°C หลังจากที่ตั้งยางออกจากซั้บสเตอร์ทแล้ว พบว่าความล้มเหลวที่เกิดขึ้นเป็นแบบโคฮีซีฟ (cohesive failure) ซึ่งเกิดขึ้นในสารรองพื้น และในยางมากกว่าที่จะเกิดขึ้นที่ผิวระหว่างสารรองพื้นกับไ้ไนลอน แต่สิ่งที่น่าสนใจ คือ เมื่อนำยางมายึดติดกับไ้ไนลอนที่ได้เคลือบด้วยกาที่ใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ หรือกาที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย และทดสอบแบบปอกภายใต้สภาวะเดียวกัน พบว่าความล้มเหลวที่เกิดขึ้นเป็นแบบโคฮีซีฟ ที่เกิดขึ้นภายในยางและความแข็งแรงในการยึดติดมีค่าเพิ่มขึ้น

Ansarifar, *et al.* (2001) ได้ทำการศึกษาสมบัติของการยึดติดระหว่างยางกับโลหะเหล็ก โลหะอะลูมิเนียม และไ้ไนลอน 6,6 โดยใช้วิธีการทดสอบแบบปอก (peel test) ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่า โลหะอะลูมิเนียมผสมและไ้ไนลอน 6,6 ซึ่งมีน้ำหนักเบา สามารถนำมาใช้งานแทนการใช้โลหะเหล็กในงานด้านยางติดโลหะ เมื่อทำการดึงลอกยางด้วยมุม 90 องศา ภายใต้อัตราความเร็วคงที่ หรือภายใต้แรงคงที่ พบว่าพลังงานที่ใช้ในการปอกยางออกจากซั้บสเตอร์ทไ้ไนลอน ต้องใช้พลังงานในการปอก (peeling energies) มากกว่า 24 kJ/m^2 แต่สำหรับโลหะเหล็กและอะลูมิเนียมต้องใช้พลังงานมากกว่า 13 kJ/m^2 จากการทดสอบภายใต้แรงคงที่ พบว่า

ลักษณะของความล้มเหลวที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับเวลาในการทดสอบ และในบางครั้งเกิดความล้มเหลวแบบโคฮีซีฟ (cohesive failure) ขึ้นภายในยาง ห่างจากสารทาหับ (covercoat) อยู่ในช่วง 20 และ 700 μm ความล้มเหลวของพันธะจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ เมื่อมีการลอกเพิ่มขึ้นด้วยอัตราความเร็วที่ต่ำกว่า 10^{-6} mm/s แต่จะเกิดความล้มเหลวอย่างรวดเร็ว เมื่อใช้อัตราเร็วในการลอกประมาณ 240 mm/s สิ่งที่น่าสนใจ คือ ในการทดสอบแบบลอก ความล้มเหลวที่เกิดขึ้นจากทั้ง 2 วิธี นั้นเกิดขึ้นแบบสุ่มและเกิดขึ้นอย่างฉับพลัน

Cook, *et al.* (1997) ได้ศึกษาการทดสอบแบบลอก (peel test) เพื่อใช้ในการศึกษาการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ ที่ผ่านการขึ้นรูปแบบฉีด (injection moulding) โดยคำนวณพลังงานในการลอกจากแรงที่ใช้ในการลอก ซึ่งเป็นพลังงานยืดหยุ่นที่เก็บสะสมไว้ในยาง จากการศึกษาพบว่าอัตราเร็วในการลอก (peel rate) ไม่มีผลต่อพลังงานในการลอก และเมื่อเพิ่มองศา (มุม) ในการลอกมากขึ้นมีผลทำให้พลังงานในการลอกมีค่าเพิ่มขึ้น เช่นกัน เนื่องจากพลังงานในการลอกจะมีความแข็งแรงขึ้นอยู่กับมุมที่ใช้ในการลอก เมื่อเพิ่มมุมในการลอกจาก 30 องศา เป็น 90 องศา ตำแหน่งของความล้มเหลว คือ บริเวณที่มีการยึดเกาะกันภายในยางแต่ไม่ลึกมาก และบริเวณนี้ทำให้เกิดรอยแตกที่ผิวเพิ่มมากขึ้น

Costin and Nagel (1990) ได้ศึกษาการทำผลิตภัณฑ์ยางติดโลหะ โดยใช้สารช่วยในการยึดติดประเภทสารประกอบอินทรีย์ของโลหะ คือ Zinc diacrylate มีชื่อเรียกในทางการค้าว่า Saret[®] 633 และ Zinc dimethacrylate มีชื่อเรียกในทางการค้าว่า Saret[®] 634 และได้นำไปเปรียบเทียบกับการทำผลิตภัณฑ์ยางติดโลหะแบบใช้ชั้นกาว และทดสอบสมบัติต่างๆ เช่น สมบัติในการติดประสาน พบว่าการใช้ Zinc diacrylate และ Zinc dimethacrylate ผสมลงในยางคอมพอนด์ นั้น มีผลทำให้สมบัติเชิงกลของยางดีขึ้น และการติดประสานของพันธะระหว่างยางกับโลหะ มีความแข็งแรงกว่าการใช้ชั้นกาว

Dobias and Heckmann (1981) กล่าวถึงการยึดติดระหว่างผิวของยางกับผิวของโลหะ โดยการใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบกัมมันต์ ซึ่งหลังจากผสมยางกับกัมมันต์แล้ว ยังมีการเติมสารอื่นๆ คือ tellurium, โลหะผสม tellurium และสารประกอบของ tellurium ซึ่งเป็นสารที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของพันธะ พบว่าสามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงของพันธะระหว่างโลหะกับยางได้ หรือทำให้เกิดพันธะระหว่างยางกับผิวของโลหะได้เอง และยังมีผลทำให้ความแข็งแรงของการติดประสาน (adhesive strength) ระหว่างยางกับโลหะมีค่าเพิ่มขึ้น 100% นอกจากนี้ยังสามารถป้องกันการเสื่อมและการกัดกร่อนของผลิตภัณฑ์ยางติดโลหะจากสภาพแวดล้อมได้อีกด้วย กระบวนการนี้เหมาะสำหรับการผลิตยางล้อรถ จักรยานยนต์ ยางล้อเครื่องบิน สายพานลำเลียง เข็มขัดนิรภัย และท่อยาง ซึ่งผลิตภัณฑ์เหล่านี้มีการใช้งานภายใต้ความเค้น (stresses) สูง

Hilton, *et al.* (2002) ได้กล่าวถึงยางคอมพอนด์ที่มีสารประกอบอินทรีย์ของโลหะที่ประกอบด้วยอะตอมของโคบอลต์ หรืออะตอมของนิกเกิลประมาณ 3-4 อะตอม ซึ่งในแต่ละ

อะตอมได้เชื่อมต่อกันด้วยอะตอมของออกซิเจน เพื่อยึดติดกับโลหะอะลูมิเนียม ซิลิกอน หรือไทเทเนียม นอกจากนี้ยังประกอบด้วยการรวมตัวกันของกรดคาร์บอกซิลิก ชนิดสายโซ่ธรรมดา (aliphatic) และชนิดวงแหวน (aromatic) แทนการใช้สารเสริมการยึดติด เพื่อนำไปใช้ในการยึดติดระหว่างโลหะเหล็กที่เตรียมผิวโดยการเคลือบด้วยชั้นของทองเหลืองกับยางที่วัลคาไนซ์

Ikeda, *et al.* (2003) ได้ทำการศึกษาการยึดติดจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีสเปกโทรสโกปี (spectroscopic) ซึ่งทำให้เกิดการแพร่ออกไประหว่างชั้นตัวอย่างที่เชื่อมต่อกัน โดยจะเกิดการวัลคาไนซ์ของสารยึดติดระหว่างยางธรรมชาติกับ electroless Pd และ/หรือ Pd-P alloys ในการส่งอิเล็กตรอนผ่านเข้าไปในกล้องจุลทรรศน์ สามารถแสดงให้เห็นรูปของชั้นที่เกิดการยึดติดของผิวระหว่างยางกับแผ่นฟิล์มของ electroless-plating ของ Pd กับ S ได้ โดยใช้พลังงาน X-ray spectroscopy ให้แพร่กระจายเข้าไป เพื่อเปลี่ยนแปลงที่ละน้อยตามความลึกของชั้นระหว่างผิวของยางกับแผ่นโลหะ (สำหรับ Pd-alloy) แต่จะต้องควบคุมความลึกของ Pd-P alloys ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด

Imori and Iida (2004) ได้ทำการศึกษาเพื่อพัฒนาและปรับปรุงสารตัวเร่งของการยึดติด (adhesion accelerator) ให้มีสมบัติในการยึดติดที่ดี เทียบเท่าหรือสูงกว่ายางคอมพอนด์ที่ใช้สารประเภทโคบอลต์ และยังสามารถเก็บไว้ได้นานก่อนนำไปขึ้นรูป จากการทดลองพบว่าเมื่อใส่สารตัวเร่งที่ประกอบด้วยสารประเภทนิกเกิลร่วมกับสารประเภทสังกะสีลงในยางคอมพอนด์ แทนการใช้สารประเภทโคบอลต์ มีผลทำให้ได้สมบัติของการยึดติดที่ดีกว่าการใช้สารประเภทโคบอลต์เพียงลำพัง และการใส่สารตัวเร่งทั้ง 2 ชนิดข้างต้น สามารถให้สมบัติการยึดติดที่ดีในระหว่างกระบวนการของการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิสูงอีกด้วย

Kent (2005) ได้กล่าวถึงวิธีการในการยึดติดของวัสดุที่มีโครงสร้างต่างกัน เช่น การยึดติดระหว่างยางกับโลหะ แต่เนื่องจากยางไม่สามารถยึดติดกับโลหะได้โดยตรง ดังนั้น จึงต้องมีการรองพื้นโลหะด้วยสารรองพื้นก่อนนำไปยึดติดกับยาง ซึ่งสารรองพื้นนี้มีผลทำให้เกิดชั้นผิวที่อ่อนแอ จึงมีผลทำให้ความแข็งแรงในการยึดติดระหว่างยางกับโลหะมีค่าต่ำลง ในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาวิธีการเพิ่มพื้นที่ผิวของโลหะ เพื่อยึดติดกับยาง ซึ่งเป็นการเพิ่มความแข็งแรงของพันธะในการยึดติด โดยการทำให้โลหะมีช่องว่างเพิ่มขึ้นก่อนนำไปยึดติดกับยาง หลังจากนั้นยางจะเกิดการหลอม และแทรกเข้าไปภายในช่องของโลหะ ทำให้เกิดการเชื่อมโยงภายในโลหะได้ ดังนั้นจึงมีผลทำให้เกิดการยึดติดได้เพิ่มขึ้น และทำให้ไม่สามารถดึงลอกยางออกจากแผ่นโลหะได้ และจากการทดลอง พบว่าสามารถเพิ่มการยึดติดได้ถึง 100 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้วิธีการรองพื้นผิวโลหะด้วยสารรองพื้น วิธีการเพิ่มความสามารถในการยึดติดด้วยวิธีนี้ สามารถใช้ในการยึดติดระหว่างวัสดุ 2 ชนิด เช่น การยึดติดของโลหะกับวัสดุประเภทยาง อีพ็อกซี หรือพลาสติก นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้แทนการยึดติดที่รองพื้นโลหะด้วยสารรองพื้น หรืออาจจะใช้ร่วมกับการรองพื้นโลหะก็ได้ นอกจากนี้ยังพบว่า มีการใช้การยึดติดด้วยวิธีการแบบใหม่นี้อย่างกว้างขวาง ตัวอย่างเช่น การทำล้อรถถังหุ้มเกราะ รางปืนไรเฟิล ซีล โอริง เป็นต้น

Lu, et al. (2005) ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของยางชนิดต่างๆ ได้แก่ styrene butadiene rubber (SBR), nitrile-butadiene rubber (NBR), ethylene-propylenediene monomer (EPDM) Ethylene-propylene monomer (EPM), Poly(α -octene-co-ethylene) Elastomer (POE) และ Hydrogenated nitrile-butadiene rubber (HNBR) โดยมีการเติม zinc dimethacrylate (ZDMA) เป็นสารเสริมแรง และมีการแปรปริมาณเปอร์ออกไซด์ จากผลการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ความทนต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน และมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจนถึงค่าสูงสุดจากนั้นก็มีค่าลดลง โดยที่ความทนต่อแรงดึงสูงสุดและปริมาณการใช้เปอร์ออกไซด์ ขึ้นอยู่กับชนิดของยาง นอกจากนี้ยังพบว่ายาง EPM, POE และ HNBR มีค่าความทนต่อแรงดึงสูงกว่า 30 MPa ซึ่งเป็นผลมาจากความอึดตัวของยาง สำหรับค่าโมดูลัสที่ 100% (ของยาง NBR และ SBR) และ 300% (ของยางชนิดอื่นๆ) มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณของเปอร์ออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น โดยที่ยาง NBR และ SBR มีอัตราการการเพิ่มสูงขึ้นมากกว่ายางชนิดอื่นๆ ในส่วนของการยืด ณ จุดขาดของยาง SBR, NBR, EPM และ EPDM มีแนวโน้มลดลงค่อนข้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับยาง POE และ HNBR สำหรับที่ปริมาณเปอร์ออกไซด์ต่ำๆ พบว่าการยืด ณ จุด ขาดของยาง EPDM และ EPM มีค่าสูงกว่ายาง POE และ HNBR ในขณะที่มีปริมาณเปอร์ออกไซด์สูง กลับมีแนวโน้มในทางกลับกัน สำหรับค่าความแข็งของยาง SBR และ NBR พบว่าเมื่อปริมาณเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ความแข็งของยางมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับยางชนิดอื่นๆ โดยมีค่าสูงกว่ายาง EPM, EPDM และ HNBR เมื่อใช้เปอร์ออกไซด์น้อยกว่า 5 phr จากกราฟระหว่างความเค้นและความเครียด ได้แสดงให้เห็นว่ามีค่าความทนต่อแรงดึงเกิดขึ้น เนื่องจากความมีผลึกเกิดขึ้นในสายโซ่ เป็นผลทำให้ยางที่ใส่ zinc dimethacrylate มีความแข็งแรงสูงขึ้นที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิดังกล่าว พบว่าความอึดตัวและลักษณะสายโซ่ของยางเป็นสิ่งที่กำหนดสมบัติเชิงกลของยางผสมอีกด้วย

Mowdood (1986) กล่าวถึงการยึดติดที่ติระหว่างยางกับโลหะ โดยใช้ธรรมชาติ และยางสังเคราะห์ เช่น ยางไนไตร์ ยางเอสปีอาร์ และยางอีพีดีเอ็ม เป็นต้น ซึ่งการยึดติดเป็นสิ่งที่มีความสำคัญในการผลิตยางที่เสริมแรงด้วยโลหะ เช่น เหล็กติดแถบยาง พบว่าการยึดติดระหว่างยางกับโลหะ ที่ดีมีความสำคัญกับผลิตภัณฑ์ยางหลายชนิด เช่น สายพานลำเลียง ยานพาหนะที่มีดินตะขาบ และท่อยางที่เสริมแรงด้วยโลหะ การทดลองครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าการสารช่วยในการยึดติดในกลุ่มของกรด iminodiacetic, กรด N-substituted iminodiacetic, เกลือของกรด iminodiacetic และเกลือของกรด N-substituted iminodiacetic ปริมาณ 0.5–10 phr มีประโยชน์ต่อผลิตภัณฑ์ที่มีการเสริมแรงด้วยโลหะ เนื่องจากช่วยเพิ่มสมบัติการยึดติดระหว่างยางกับโลหะให้ดีขึ้น

Mowrey (2003) ได้แสดงให้เห็นว่าสารยึดติด (กาว) ที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ มีผลทำให้การยึดติดที่ไม่ดี เมื่อใช้ยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถัน แต่เป็นข้อดีสำหรับการยึดติดในยางที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์ ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการยึดติดของยาง (ยาง

ธรรมชาติ ยางอีพดีเอ็ม และยางซิลิโคน) ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์ กับแผ่นโลหะที่เคลือบด้วยกาวก่อนนำไปวัลคาไนซ์ยึดติดกับยางคอมพอนด์โดยใช้ความร้อน และ/หรือ ความดัน โดยใช้สารยึดติดที่เหมาะสม ซึ่งมีความทนทาน มีพันธะในการยึดติดระหว่างยางวัลคาไนซ์กับวัสดุรองรับหรือซับสเตรท สามารถทำการทดสอบสมบัติการยึดติด เพื่อดูพันธะที่เกิด ความล้มเหลวด้วยมุมสูง ๆ ได้ มีความแข็งแรงในการลอกแบบออก (peel strength) สูง และมีพันธะในการยึดติดที่มีความต้านทานต่อสิ่งแวดล้อม ยางที่เหมาะสมสำหรับนำมายึดติดด้วยพันธะเปอร์ออกไซด์จะต้องไม่มีองค์ประกอบของหมู่ nitroso และประกอบด้วยปัจจัยที่สำคัญของตัวทำละลาย การเกิดฟิล์มพอลิเมอร์ เป็นต้น ในการทดลองครั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาวิธีการของการยึดติดของยางที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์กับผิวโลหะ

Nakamura (1976) ได้ศึกษาพันธะในการยึดติดระหว่างยางวัลคาไนซ์กับโลหะ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการยึดติดของโลหะเหล็กที่ปราศจากการรองพื้นด้วยการเคลือบชั้นของทองเหลือง บรอนซ์ หรือสังกะสี เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่าย และตัดปัญหาที่มีความเกี่ยวข้องกับ การเคลือบโลหะ จากการทดลองพบว่าสามารถใช้สารยึดติดที่มีส่วนประกอบของพันธะคู่ไดอิน และวงแหวนไนโตรเจนในการเชื่อมพันธะระหว่างยางกับพื้นผิวของโลหะเหล็กได้ โดยการใส่สารตัวเติมซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคละเอียด และมีความบริสุทธิ์สูงลงในยางคอมพอนด์จะมีผลทำให้ ความแข็งแรงของพันธะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์สูง หลังจากทำการทดลองโดยการแทนที่สารตัวเติมเข้ามาด้วยซิลิกาด้วยน้ำหนักที่เท่ากัน ผลปรากฏว่าสามารถเพิ่มความแข็งแรงของพันธะได้

Sohnemann (1985) กล่าวถึงการทำยาง เพื่อใช้ในการยึดติดกับผิวโลหะโดยตรง โดยเฉพาะการยึดติดกับโลหะเหล็ก เหล็กกล้า หรือเหล็กกล้าผสม โดยยางคอมพอนด์ ประกอบด้วยยางธรรมชาติ และ/หรือยางสังเคราะห์ มีการใส่สารตัวเติม (fillers) สารช่วยใน กระบวนการผลิต (processing aids) สารทำให้ยางคงรูป (vulcanizing agents) และสารช่วยในการยึดติด (bonding agent) ซึ่งสารยึดติดที่อยู่ในรูปของฟินอล หรืออนุพันธ์ของฟินอล และ สารประกอบโลหะยางคอมพอนด์มีประโยชน์ในการเคลือบและยึดติดกับโลหะ แต่การยึดติดของยางกับโลหะจะเกิดขึ้นในระหว่างการวัลคาไนซ์ ยางที่เหมาะสมสำหรับการยึดติดกับโลหะประเภททองเหลือง หรือเหล็กกล้า คือ ยาง Ethylene-propylene diene monomer rubber (EPDM) หรือยางIsobutene-isoprene rubber (IIR) การใช้ยางสังเคราะห์ในการเตรียมยางคอมพอนด์ มีข้อดี คือให้การยึดติดที่ดีกับผิวของโลหะ โดยไม่ต้องเตรียมผิว ด้วยเหตุนี้จึงไม่จำเป็นต้องเตรียมผิวโลหะ เช่น การทำความสะอาดแบบทั่วไป และทำให้ผิวขรุขระด้วยวิธีทางกล

Uchino, *et al.* (1999) ได้กล่าวถึงองค์ประกอบของสารเสริมการยึดติด และองค์ประกอบของยางที่นำมายึดติดโดยมีการใส่สารเสริมการยึดติด โดยเฉพาะอย่างยิ่งได้กล่าวถึง องค์ประกอบของสารเสริมการยึดติดที่เหมาะสม สำหรับการกระตุ้นการยึดติดระหว่างแผ่นทองเหลือง เหล็กเส้น และยางที่นำมาเคลือบเหล็กเส้น และยังคงกล่าวถึงองค์ประกอบของยางที่นำมา

ยึดติด โดยมีการใส่สารเสริมการยึดติดลงในยาง ซึ่งสารเสริมการยึดติดที่ใช้มีส่วนประกอบของเกลือโลหะสังกะสี (Zn) โพแทสเซียม (K) อะลูมิเนียม (Al) ไทเทเนียม (Ti) หรือโลหะเซอร์โคเนียมของกรดอินทรีย์ และเกลืออินทรีย์ อย่างน้อย 1 ตัว และสารประกอบอินทรีย์โมลิบดีนัม องค์ประกอบของสารช่วยในการยึดติด จะต้องมีส่วนประกอบที่เป็นรูปแบบเดียวกันกับองค์ประกอบของยางที่ใช้ในการยึดติด ซึ่งผลของการใช้สารเสริมการยึดติด พบว่ายางที่มีองค์ประกอบของสารยึดติดดังกล่าว มีความแข็งแรงในการยึดติดเพิ่มสูงขึ้นอย่างสม่ำเสมอ และยังพบว่าการใช้สารเสริมการยึดติดดังกล่าวมีความปลอดภัย มีแรงในการยึดติดที่สูง และติดแน่น

2.8.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดัดแปรโมเลกุลยางธรรมชาติ

เจริญ และคณะ (2549) เตรียมยางธรรมชาติมาลิเอตจากยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุล โดยการบดของยางธรรมชาติ (ADS) ด้วยการบด และน้ำยางข้น (HA) และโดยการทำปฏิกิริยาน้ำยางข้นแอมโมเนียสูงกับโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตร่วมกับโพรพาแนลพบว่ามีการดูดกลืนแสงอินฟราเรด เนื่องจากการมีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิล ซึ่งเป็นผลมาจากการที่มาลิเอกแอนไฮไดรต์ทำปฏิกิริยาการกราฟต์ลงบนโมเลกุลยางธรรมชาติ คือ พิคซ์ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1784 cm^{-1} ซึ่งเป็นพิกซ์ที่แสดงถึงการมีพันธะ $\text{C}=\text{O}$ ที่มีการสั่นแบบยึด แบบสมมาตร และพิกซ์อ่อนที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1854 cm^{-1} การเพิ่มปริมาณมาลิเอกแอนไฮไดรต์ในปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ไรซ์ มีผลทำให้เกิดการกราฟต์ของมาลิเอกแอนไฮไดรต์ในปริมาณที่สูงขึ้น เมื่อนำยางธรรมชาติมาลิเอตไปเตรียมกาว เพื่อใช้ในการติดประสานยางคอมปานด์กับโลหะ พบว่าการเพิ่มปริมาณมาลิเอกแอนไฮไดรต์ในการเตรียมยางธรรมชาติมาลิเอต มีผลให้ค่าความตึงผิวของกาวมีแนวโน้มลดลง และความแข็งแรงของการติดประสานของกาวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณมาลิเอกแอนไฮไดรต์ที่ใช้ในปฏิกิริยา จนมีค่าสูงสุดที่ปริมาณการใช้ 10 phr นอกจากนี้พบว่าการใช้เมทิลีนไดไอโซไซยาเนตในสูตรกาวยางธรรมชาติ จะส่งผลให้การยึดติดประสานของกาวกับโลหะ และคอมปานด์ยางธรรมชาติมีความแข็งแรงมากขึ้น การใช้ไซเลนเป็นไพรเมอร์ทาทับบนโลหะ จะให้ความแข็งแรงในการติดประสานยางคอมปานด์กับโลหะสูงกว่าการใช้สารละลายของยางคลอโรพรีน และการไม่ใช้ไพรเมอร์ การลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ มีผลทำให้เกิดการกราฟต์ด้วยมาลิเอกแอนไฮไดรต์ได้ในปริมาณที่สูงขึ้น และทำให้สารละลายกาวยางธรรมชาติมาลิเอตมีค่าความตึงผิวลดลงตามการลดน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย และเพิ่มความแข็งแรงในการติดประสานของกาว นอกจากนี้พบว่าความแข็งแรงในการติดประสานของกาวยางธรรมชาติมาลิเอต ระหว่างยางคอมปานด์กับทองแดงมีค่าสูงสุด รองลงมาได้แก่ เหล็ก และอะลูมิเนียม ตามลำดับ การใช้สารเพิ่มการยึดในการติดประสานของยางคอมปานด์กับโลหะของกาวยางธรรมชาติมาลิเอต พบว่าคิวมาโรนเรซินให้ค่าความตึงผิวต่ำที่สุด และให้ความแข็งแรงในการติดประสานสูงที่สุด

จรัญ (2547) ได้ทำการวิจัยเพื่อปรับปรุงสมบัติการทนต่อน้ำมันของยางธรรมชาติ โดยการกราฟต์โคพอลิเมอร์ไฮดรอกซีของอะครีโลไนไตรล์บนยางธรรมชาติ โดยกระบวนการอิมัลชัน ใช้ควิมีนไฮโดรเปอร์ออกไซด์ และเตตระเอทิลลิโนเฟนตามีนเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา จากการศึกษาผลกระทบของเวลาของปฏิกิริยา ความเข้มข้นของมอนอเมอร์ อุณหภูมิของปฏิกิริยา และความเข้มข้นของตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์การกราฟต์ ประสิทธิภาพในการกราฟต์ และสมบัติของกราฟต์โคพอลิเมอร์ พบว่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์การกราฟต์ อัตราเร็วในการพอลิเมอร์ไฮดรอกซี และการทนต่อน้ำมันเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความเข้มข้นของมอนอเมอร์ อุณหภูมิ และความเข้มข้นของตัวริเริ่มปฏิกิริยา

ปวีณา (2548) ได้ทำการสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (2-Hydroxyethyl methacrylate) โดยศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโมลระหว่างยางธรรมชาติกับมอนอเมอร์ และอัตราส่วนโมลระหว่างยางธรรมชาติกับตัวริเริ่มปฏิกิริยาเป็นหลัก และนำกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ได้ไปศึกษาสมบัติทางความร้อน และการละลายเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ และจากการทดลองสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์ ระหว่างยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต โดยเลือกใช้โปแตสเซียมเปอร์ซัลเฟต ($K_2S_2O_8$) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา และทำให้เกิดการพอลิเมอร์ไฮดรอกซีในระบบอิมัลชัน พร้อมทั้งวิเคราะห์โครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่ได้ โดยใช้เทคนิค FT-IR (จากเครื่อง Fourier transform infrared spectrophotometer) และทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TG/DTA (จากเครื่อง Thermogravimetric/Differential thermal analyzer) ในการทดลองเมื่อเพิ่มปริมาณของโปแตสเซียมเปอร์ซัลเฟต จาก 0.05, 0.08 และ 0.10 เปอร์เซ็นต์โมล ตามลำดับ พบว่าการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น แต่ในขณะที่เดียวกันโอกาสที่จะเกิด พอลิ(2-Hydroxyethyl methacrylate, PHEMA) ก็มากขึ้นด้วย แต่จากการทดลองสรุปได้ว่า อัตราส่วนโมลระหว่างยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตที่ให้กราฟต์โคพอลิเมอร์ที่มีระดับการกราฟต์สูงที่สุดคือ 95:5 และปริมาณของตัวริเริ่มปฏิกิริยาเป็น 0.05 เปอร์เซ็นต์โมล นอกจากนี้ ยังพบว่าสมบัติทางความร้อนของกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ได้ดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับ พอลิ(2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต) และยางธรรมชาติ จากการทดสอบการละลายของกราฟต์โคพอลิเมอร์นั้น พบว่ามีความแตกต่างจาก พอลิ(2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต) และยางธรรมชาติ

สิทธิพงษ์ (2547) ได้ศึกษากราฟต์โคพอลิเมอร์ของพอลิสไตรีนและยางธรรมชาติสังเคราะห์ได้โดยใช้เทคนิคอิมัลชันพอลิเมอร์ไฮดรอกซีแบบกะ ใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาแบบแตกตัวด้วยความร้อน และแบบรีดอกซ์ในการสังเคราะห์ การหาเอกลักษณ์ของกราฟต์โคพอลิเมอร์โดย FT-IR พบพีกที่แสดงเอกลักษณ์ของพอลิสไตรีนปรากฏอยู่ นอกจากนี้การทดสอบเชิงความร้อนโดย TG-DTA แสดงอุณหภูมิการสลายตัวของกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่สูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ ซึ่งทั้งหมดนี้แสดงถึงความสำเร็จของการกราฟต์พอลิสไตรีนลงบนยางธรรมชาติ การศึกษาผลของเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการกราฟต์ต่อปริมาณของสไตรีนมอนอเมอร์ พบว่า

เมื่อเพิ่มสัดส่วนของสไตรีน ประสิทธิภาพการกราฟต์ของพอลิสไตรีนบนยางธรรมชาติจะเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงค่าสูงสุดที่ประมาณ 70% สำหรับตัวเริ่มปฏิกิริยาแบบแตกตัวด้วยความร้อน และประมาณ 85% สำหรับตัวเริ่มปฏิกิริยาแบบรีดอกซ์ หลังจากนั้นค่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการกราฟต์จะลดต่ำลง ถ้ายังคงเพิ่มปริมาณของสไตรีนมอนอเมอร์ขึ้นอีก การศึกษาผลของปริมาณตัวเริ่มปฏิกิริยาปรากฏว่า การเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการกราฟต์ เมื่อเพิ่มปริมาณของตัวเริ่มปฏิกิริยามีแนวโน้มเช่นเดียวกับการเพิ่มปริมาณของสไตรีนมอนอเมอร์ นอกจากนี้ยังพบว่าในช่วงปริมาณของตัวเริ่มปฏิกิริยาที่ศึกษา ตัวเริ่มปฏิกิริยาแบบรีดอกซ์ให้ค่าประสิทธิภาพการกราฟต์ที่ดีกว่าตัวเริ่มปฏิกิริยาแบบแตกตัวด้วยความร้อน โดยมีค่าสูงสุดที่ประมาณ 70% สำหรับตัวเริ่มปฏิกิริยาแบบรีดอกซ์ และประมาณ 60% สำหรับตัวเริ่มปฏิกิริยาแบบแตกตัวด้วยความร้อน

สิริธร (2549) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของความดันที่ใช้ประกอบชิ้นงาน ในช่วง 2.5–20 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร และชนิดกาวต่อความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างยางวัลคาไนซ์กับหนังสังเคราะห์ พบว่าความดันและชนิดกาวมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงของการยึดติด โดยน้ำยางธรรมชาติมีค่าเพิ่มขึ้นตามความดันที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่กาวคลอโรพรีนประเภท Solvent based ไม่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นตามความดันที่เพิ่มขึ้น เมื่อทำการบ่มแรงขึ้นทดสอบที่อุณหภูมิ 70°C เป็นระยะเวลา 168 ชั่วโมง ส่งผลให้ความแข็งแรงของการยึดติดลดต่ำลง การเปรียบเทียบผลของการเตรียมผิวหน้ายางด้วยสารละลาย trichloroisocyanuric acid/ethyl acetate (TCI/EA) และสารละลายทางการค้า พบว่า การเตรียมผิวหน้ายางด้วยสารละลายทั้ง 2 ชนิด ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของการยึดติดเพิ่มสูงขึ้นจากที่ไม่ได้ใช้สารละลายนี้เท่ากับ 29.37 ปอนด์/นิ้ว และ 27.28 ปอนด์/นิ้ว ตามลำดับ ในการยึดติดระหว่างยางวัลคาไนซ์กับหนังสังเคราะห์ด้วยกาวน้ำยางผสมระหว่างน้ำยางธรรมชาติ และกาวน้ำพอลิยูรีเทนที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าความแข็งแรงของการยึดติดเพิ่มสูงขึ้นตามอัตราส่วนกาวน้ำพอลิยูรีเทนที่เพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะกาวน้ำยางผสมระหว่างน้ำยาง NR-g-MMA กับกาวน้ำพอลิยูรีเทน ในอัตราส่วน 30/70 จะให้ค่าความแข็งแรงของการยึดติดมากกว่า 14.80 ปอนด์/นิ้ว ขณะที่ความแข็งแรงของการยึดติดด้วยกาวทางการค้ามีค่าอยู่ในช่วง 10.17–28.44 ปอนด์/นิ้ว

Promdum, *et al.* (2008) ได้ศึกษาการกราฟต์โคพอลิเมอโรไซเชนระหว่างยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต โดยใช้ควิมีนไฮโดรเปอร์ออกไซด์ และเตตระเอทิลลิโนเพนตามีน เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา และได้เตรียมด้วยกระบวนการอิมัลชัน พร้อมทั้งทำการวิเคราะห์โครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่ได้ด้วยเทคนิค FT-IR และ $^1\text{H-NMR}$ และทดสอบสมบัติการยึดติดของ NR-g-HEMA ตามมาตรฐาน ASTM D3807 และ ASTM D2339 นอกจากนี้ ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของมอนอเมอร์ ความเข้มข้นของตัวริเริ่มปฏิกิริยา อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เวลาในการเกิดปฏิกิริยา และความเร็วในการกวนขณะกราฟต์ และประสิทธิภาพในการกราฟต์ พบว่า การกราฟต์ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตบนยางธรรมชาติ

ได้ให้ผลที่สูงที่สุด เมื่อใช้ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต 5 phr ใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่ความเข้มข้น 0.15% โมล ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 90 นาที กวนด้วยความเร็ว 50 rpm นอกจากนี้ยังพบว่า สมบัติในการยึดติดกับไม้อัดที่ใช้ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ให้ค่าในการติดประสานที่สูงกว่าการใช้ยางธรรมชาติที่ไม่ได้กราฟต์

Yue-E, *et al.* (1999) ได้ศึกษาการกราฟต์โคพอลิเมอร์เซชัน โดยนำ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (HEMA) ต่อบนกิ่งของยางคลอโรพรีนด้วยการฉายรังสีแกมมาจากโคบอลต์-60 และศึกษาลักษณะพื้นผิวของยางคลอโรพรีนที่ผ่านการกราฟต์และยังไม่ได้กราฟต์ด้วยเครื่อง FT-IR-PAS spectroscopy และ scanning electron microscope (SEM) จากการศึกษาพบว่า มีการต่อกิ่งของ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตบนเนื้อยางคลอโรพรีน และเปอร์เซ็นต์การกราฟต์ขึ้นอยู่กับสารละลายระหว่างเอทานอลกับน้ำ เนื่องจากเปอร์เซ็นต์การกราฟต์จะเพิ่มขึ้นเมื่อ pH ของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าเปอร์เซ็นต์การกราฟต์ยังขึ้นอยู่กับปริมาณรังสี อัตราในการฉายรังสี ความเข้มข้นของมอนอเมอร์ และอุณหภูมิที่ใช้ขณะทำการฉายรังสี

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

3.1 สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วย

- 3.1.1 ยางแผ่นรมควันชั้น 3 (Rib Smoke Sheet No.3, RSS No.3) จากตลาดกลางยางพารา อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา
- 3.1.2 น้ำยางข้น ชนิดแอมโมเนียสูง (High Ammonia Concentrated Latex, HA) ซึ่งมีปริมาณเนื้อยางแห้งประมาณ 60 เปอร์เซนต์ (%) ผลิตโดยบริษัท ฉลองอุตสาหกรรมน้ำยางข้น จำกัด อำเภอจะนะ จังหวัดสงขลา
- 3.1.3 กรดสเตียริก (Stearic acid) ความถ่วงจำเพาะ 0.85 มีลักษณะเป็นเม็ดสีขาวอมเหลือง ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้น (activator) ช่วยให้สารตัวเร่งทำงานดีขึ้น จำหน่ายโดยห้างหุ้นส่วน กิจไพบูลย์เคมี จำกัด
- 3.1.4 เขม่าดำ (Carbon black) ชนิด High abrasion furnace black (HAF) เกรด N-330 ความถ่วงจำเพาะ 1.80 มีลักษณะเป็นผงสีดำ ทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพ (reinforcing filler) จำหน่ายโดยบริษัท โพลีเมอร์ อินโนเวชั่น จำกัด
- 3.1.5 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) ชนิด white seal ความถ่วงจำเพาะ 5.57 มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้น โดยใช้ร่วมกับกรดสเตียริก เพื่อให้การทำงานของสารตัวเร่งมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น จำหน่ายโดยบริษัท Univenture Public Co., Ltd.
- 3.1.6 โซโคลเฮกซิลเบนโซไทอะโซลซัลฟีนามัล (N-cyclohexyl-2-benzothiazole sulphenamide, CBS) ความถ่วงจำเพาะ 1.28 มีลักษณะเป็นเม็ดสีเขียวย่อน ทำหน้าที่ เป็นสารตัวเร่ง เพื่อช่วยเร่งให้ปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ของยางเกิดเร็วขึ้น โดยจัดเป็นสารตัวเร่งที่ไม่เร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิขณะผลิต แต่ช่วยเร่งในขณะวัลคาไนซ์ หรือที่เรียกว่า “delayed action” จำหน่ายโดยห้างหุ้นส่วน กิจไพบูลย์เคมี จำกัด
- 3.1.7 เตตระเมทิลไทูรัมไดซัลไฟด์ (Tetramethyl thiuram disulfide, TMTD) ความถ่วงจำเพาะ 1.42 มีลักษณะเป็นผงสีขาว ทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่ง เพื่อช่วยเร่งให้ปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ของยางเกิดเร็วขึ้น จำหน่ายโดยห้างหุ้นส่วน กิจไพบูลย์เคมี จำกัด

- 3.1.8 กำมะถัน (Sulphur) ความถ่วงจำเพาะ 2.0 มีลักษณะเป็นผงสีเหลือง ขนาดอนุภาค 325 mesh ทำหน้าที่เป็นสารวัลคาไนซ์ (vulcanizing agent) สำหรับทำให้เกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลยางที่มีพันธะคู่ที่ว่องไว หรือเกิดการเชื่อมโยง (crosslink) ตรงจุดที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา จำหน่ายโดยบริษัท สยามเคมี จำกัด
- 3.1.9 น้ำมันสปินเดิล (Spindle oil) ความถ่วงจำเพาะ 0.90 มีลักษณะเป็นของเหลวใสสีเหลืองอ่อน ทำหน้าที่ช่วยในการผสม ทำให้ยางนึ่งผสมสารเคมีได้ง่ายขึ้น จำหน่ายโดย ห้างหุ้นส่วนจำกัด บอส ออฟติคอลล
- 3.1.10 ริงค์สเตย์ แอล (Wingstay L) หรือ Butyrate reaction product of p-cresol and dichloropentadiene ความถ่วงจำเพาะ 1.08 มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีครีม หรือสีขาวอมเหลือง ใช้เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากออกซิเจน (antioxidant) เป็นการป้องกันไม่ให้อายุเกิดการเสื่อมสลาย หรือเกิดการเสื่อมสลายช้าลง จำหน่ายโดยห้างหุ้นส่วน กิจไพบูลย์เคมี จำกัด
- 3.1.11 คิวมาโรน เรซิน (Coumarone resin) ความถ่วงจำเพาะ 1.15 มีลักษณะเป็นเม็ดสีเหลือง ทำหน้าที่เป็นสารแอนติออกซิแดนท์ (antioxidant) ป้องกันไม่ให้อายุเกิดการเสื่อมสลาย หรือเกิดการเสื่อมสลายช้าลง จำหน่ายโดยห้างหุ้นส่วน กิจไพบูลย์เคมี จำกัด
- 3.1.12 ไดคิวมิล เปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, DCP 98%) สูตรโมเลกุล $C_{18}H_{22}O_2$ น้ำหนักโมเลกุล 270.37 g/mol ความถ่วงจำเพาะ 1.00 มีลักษณะเป็นผงผลึกสีขาว ทำหน้าที่เป็นสารวัลคาไนซ์ (vulcanizing agent) จำหน่ายโดย บริษัท พี ไอ อินดรัสทรี จำกัด
- 3.1.13 โคบอล สเตียเรต (Cobalt stearate) สูตรโมเลกุล $Co(C_{18}H_{35}O_2)_2$ ความถ่วงจำเพาะ 2.0 น้ำหนักโมเลกุล 625.9 g/mol มีลักษณะเป็นเม็ดสีม่วง ทำหน้าที่เป็นสารเสริมการยึดติด (adhesion promoter) จำหน่ายโดย บริษัท พี ไอ อินดรัสทรี จำกัด
- 3.1.14 ซิงค์ไดอะคริเลต (Zinc diacrylate, ZDA) มีชื่อทางการค้าว่า Saret[®] 633 ความถ่วงจำเพาะ 1.60 มีลักษณะเป็นผงสีเหลืองอ่อน ทำหน้าที่เป็นสารเสริมการยึดติด (adhesion promoter) จำหน่ายโดย บริษัท เคมีอินโนเวชัน จำกัด
- 3.1.15 ซิงค์ไดเมทาคริเลต (Zinc dimethacrylate, ZDMA) มีชื่อทางการค้าว่า Saret[®] 634 ความถ่วงจำเพาะ 1.50 มีลักษณะเป็นผงสีเหลืองอ่อน ทำหน้าที่เป็นสารเสริมการยึดติด (adhesion promoter) จำหน่ายโดย บริษัท เคมีอินโนเวชัน จำกัด
- 3.1.16 กาวเคมีลอค 205A (Primer chemlok 205A) มีลักษณะเป็นของเหลวสีเทา เป็นสารรองพื้น (primer) ทางการค้า ใช้ในการรองพื้นผิวโลหะก่อนนำไปยึดติดกับยางคอมปาวนด์ จำหน่ายโดยบริษัท พรซิซิสชั่น เอนยีเนียริง จำกัด

- 3.1.17 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (2-Hydroxyethyl methacrylate, HEMA 97%)
 สูตรโมเลกุล $\text{CH}_2\text{C}(\text{CH}_3)\text{CO}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ น้ำหนักโมเลกุล 130.14 g/mol มีความหนาแน่น 1.073 ที่อุณหภูมิ 25°C มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี ทำหน้าที่เป็นสารตั้งต้น ในการเกิดปฏิกิริยาการกราฟต์โคพอลิเมอร์ ผลิตจากบริษัท Aldrich
- 3.1.18 โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (Sodium hydrogen carbonate) สูตรโมเลกุล NaHCO_3 มีลักษณะเป็นผงสีขาว ทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ ผลิตจากบริษัท Carlo
- 3.1.19 โซเดียม ลอริล ซัลเฟต (Sodium lauryl sulphate, SLS) สูตรโมเลกุล $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{OSO}_3\text{Na}$ น้ำหนักโมเลกุล 288.38 g/mol มีลักษณะเป็นแท่งสีขาว ทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ ในปฏิกิริยาการกราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติ กับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต ผลิตจากบริษัท Ajax
- 3.1.20 โพแทสเซียม เปอร์ซัลเฟต (Potassium persulphate) สูตรโมเลกุล $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ น้ำหนักโมเลกุล 270.32 g/mol มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ สีขาว ทำหน้าที่เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา (initiator) ผลิตจากบริษัท Ajax
- 3.1.21 แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride) สูตรโมเลกุล $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ น้ำหนักโมเลกุล 147.02 g/mol เตรียมอยู่ในรูปสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 10% w/v เพื่อใช้ในการจับตัวน้ำยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ มีลักษณะเป็นผงสีขาว ผลิตจากบริษัท Ajax
- 3.1.22 ซิลิคอน ไดออกไซด์ (Silicon dioxide) มีลักษณะเป็นเม็ดสีน้ำตาลอ่อน ใช้บรรจุลงในคอลัมน์ เพื่อกำจัดตัวยับยั้งปฏิกิริยา (inhibitor) ในมอนอเมอร์ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต ผลิตจากบริษัท Riedel
- 3.1.23 อลูมิเนียม ออกไซด์ (Aluminium oxide) สูตรโมเลกุล Al_2O_3 น้ำหนักโมเลกุล 101.96 g/mol มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว ใช้บรรจุลงในคอลัมน์ เพื่อกำจัดตัวยับยั้งปฏิกิริยา (inhibitor) ในมอนอเมอร์ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต ผลิตจากบริษัท Riedel
- 3.1.24 โทลูอีน (Toluene) สูตรโมเลกุล $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$ จุดเดือด 110.6°C ความหนาแน่น 0.867 ทำหน้าที่ในการละลายยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ และยางคอมปานด์ที่เตรียมขึ้นในแต่ละสูตร เพื่อใช้เป็นสารรองพื้น (primer) ผลิตจากบริษัท Lab-Scan
- 3.1.25 เอทานอล (Ethanol) สูตรโมเลกุล $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ความหนาแน่น 0.78 น้ำหนักโมเลกุล 46.07 g/mol มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี ใช้เป็นตัวทำละลาย ในการสกัดพอลิ(2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต) และทำความสะอาดผิวหน้าโลหะ หลังจากเตรียมผิวทางกล ผลิตจากบริษัท Merck

- 3.1.26 ปีโตรเลียมอีเธอร์ (Petroleum ether) จุดเดือดอยู่ระหว่าง 37–51°C ความหนาแน่น 0.60 มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี ใช้เป็นตัวทำละลายในการสกัดอย่างไม่เกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ ผลิตจากบริษัท J.T.Baker
- 3.1.27 คลอโรเบนซีน (Chlorobenzene) 99% สูตรโมเลกุล C_6H_5Cl ความหนาแน่น 1.106 มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี ใช้เป็นตัวทำละลายมอนอเมอร์ ผลิตจากบริษัท Aldrich
- 3.1.28 เมทิลแอลกอฮอล์ (Methyl alcohol) 99% สูตรโมเลกุล CH_3OH ความหนาแน่น 0.79 มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี ใช้ในการเตรียมสารละลาย เพื่อทำความสะอาดผิวโลหะเหล็ก ผลิตจากบริษัท เกียรติปภา จำกัด
- 3.1.29 กรดออร์โธฟอสฟอริก (Orthophosphoric acid) 85% สูตรโมเลกุล H_3PO_4 ความหนาแน่น 1.689 ± 1.701 มีลักษณะเป็นของเหลวใส ใช้ในการเตรียมสารละลาย เพื่อทำความสะอาดผิวโลหะเหล็ก ผลิตจากบริษัท Carlo
- 3.1.30 โซเดียม ไดโครเมท (Sodium dichromate) สูตรโมเลกุล $Na_2Cr_2O_7 \cdot 2H_2O$ น้ำหนักโมเลกุล 298.00 g/mol มีลักษณะเป็นเกล็ดสีส้ม ใช้ในการเตรียมสารละลาย เพื่อทำความสะอาดผิวโลหะอะลูมิเนียม ผลิตจากบริษัท Ajax Finechem
- 3.1.31 กรดซัลฟูริกเข้มข้น (Concentrated sulphuric acid) 95–97% สูตรโมเลกุล H_2SO_4 น้ำหนักโมเลกุล 98.08 g/mol มีลักษณะเป็นของเหลว ใช้ในการเตรียมสารละลาย เพื่อทำความสะอาดผิวโลหะอะลูมิเนียม ผลิตจากบริษัท Merck
- 3.1.32 กรดไนตริกเข้มข้น (Concentrated nitric acid) 69% ความหนาแน่น 1.42 g/cm³ มีลักษณะเป็นของเหลวใส ใช้ในการเตรียมสารละลาย เพื่อทำความสะอาดผิวโลหะทองแดง ผลิตจากบริษัท BDH
- 3.1.33 ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (iso-propyl alcohol, IPA) สูตรโมเลกุล $CH_3CH(OH)CH_3$ น้ำหนักโมเลกุล 60.10 g/mol มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี ใช้ในการเช็ดผิวโลหะเหล็ก หลังจากทำความสะอาดผิวด้วยเมทานอล และกรดออร์โธฟอสฟอริก ผลิตจากบริษัท BDH

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วย

- 3.2.1 เครื่องผสมยางสองลูกกลิ้ง (two roll mill) ใช้สำหรับผสมยางและสารเคมี ประกอบด้วย ลูกกลิ้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 นิ้ว ยาว 30 นิ้ว จำนวน 2 ลูก หมุนเข้าหากันด้วยอัตราความเร็วลูกกลิ้งหน้าต่อลูกกลิ้งหลัง (friction ratio) เท่ากับ 1:1.27 ผลิตโดย บริษัท หงส์ยาวไทย จำกัด

- 3.2.2 เครื่องผสมยางแบบปิด (kneader) ใช้สำหรับการเตรียมมาสเตอร์แบทช์คาร์บอนดำ (masterbatch carbon black) ความจุของห้องผสม 3 ลิตร ผลิตโดย บริษัท ยง ฟง แมชชีนเนอรี จำกัด
- 3.2.3 เครื่องอัดเบ้า (compression moulding) รุ่น LCC 140 ใช้ระบบไฮดรอลิก โดยให้ความร้อนด้วยไฟฟ้า และใช้ความดันสูงสุด (unit pressure) 200 kg/cm^2 ที่ยัดเบ้าพิมพ์มีขนาด 18×18 นิ้ว ใช้สำหรับขึ้นรูปยางคอมพอนด์ เพื่อใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกล และขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางติดโลหะ ผลิตโดย บริษัท ถัง-มาสเตอร์ (ประเทศไทย) จำกัด
- 3.2.4 เครื่องทดสอบเวลาการวัลคาไนซ์ของยาง (moving die rheometer, MDR 2000) รุ่น 36 AIG 2953 ใช้สำหรับหาเวลาในการวัลคาไนซ์ (cure time) และระยะเวลาการสุกก่อนกำหนด (scorch time) ของยางคอมพอนด์ ผลิตโดยบริษัท Alpha Technologies Service Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.2.5 เครื่องทดสอบแรงดึง (tensometer) ยี่ห้อ LLOYD instrument รุ่น LR10K ใช้สำหรับทดสอบความทนต่อแรงดึง โมดูลัส เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ของตัวอย่างยางวัลคาไนซ์ และทดสอบความแข็งแรงในการติดประสานของผลิตภัณฑ์ยางติดโลหะ ผลิตโดยบริษัท อินโทรเอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด
- 3.2.6 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer, (FT-IR) รุ่น EQUINOX 55 ทดสอบด้วยเทคนิค ATR โดยทดสอบในช่วงเลขคลื่น $4000\text{--}400 \text{ cm}^{-1}$ ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต
- 3.2.7 กล้องจุลทรรศน์ (Optical microscope, OM) ยี่ห้อ OLYMPUS รุ่น SBX60 ใช้สำหรับดูพื้นผิวโลหะ เพื่อเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวก่อนและหลัง ทำความสะอาดผิวด้วยวิธีทางกล และทางเคมี
- 3.2.8 เครื่องฟันทราย ใช้ในการเตรียมผิวโลหะด้วยวิธีทางกล (ฟันทราย) ผลิตโดย โรงงานชัยเจริญการช่าง กรุงเทพมหานคร
- 3.2.9 เครื่องรีดยาง ใช้สำหรับรีดยางกราฟต์โคพอลิเมอร์หลังจากจับตัวด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 10% w/v
- 3.2.10 ตู้อบ (oven) ขนาด 53 ลิตร ใช้ในการอบยางกราฟต์โคพอลิเมอร์หลังจากจับตัวด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 10% w/v
- 3.2.11 ตู้อบสุญญากาศ (Vacuum oven) NAPCO[®] รุ่น 5851 ใช้สำหรับอบตัวอย่างที่ได้จากการสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต ให้แห้งและระเหยตัวทำละลาย ก่อนนำไปสกัดแบบซอกซ์เลต (soxhlet extraction) ผลิตโดยบริษัท Precision Scientific

- 3.2.12 ตู้ดูดความชื้น Bossmen รุ่น SBR 98 ใช้สำหรับเก็บชิ้นตัวอย่างและยางกราฟต์โคพอลิเมอร์หลังจากอบ จัดจำหน่ายโดย MERITTECH CO., LTD.
- 3.2.13 ชุดอุปกรณ์ใช้ในการเตรียมปฏิกิริยาการกราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต ประกอบด้วย ขวดก้นกลม 5 คอ อ่างน้ำร้อน คอนเดนเซอร์ เทอร์โมมิเตอร์ Dropping funnel สำหรับป้อนมอนอเมอร์ ชุดกวนผสม สารเคมีกับน้ำยาง และถังแก๊สไนโตรเจน
- 3.2.14 ชุดสกัดด้วยขี้ผึ้งปฏิกิริยาในมอนอเมอร์ ประกอบด้วยคอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว บีกเกอร์สำหรับรองรับมอนอเมอร์ และภาชนะสำหรับหล่อเย็น
- 3.2.15 ชุดสกัดแบบซอกซ์เลต (Soxhlet extraction) ประกอบด้วย เต้าหลุม และชุดสกัดแบบซอกซ์เลต เพื่อใช้สกัดยางธรรมชาติที่ไม่ได้กราฟต์ และพอลิ(2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต) ออกจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์
- 3.2.16 เครื่องชั่งระบบดิจิทัลความละเอียด 2 ตำแหน่ง และ 4 ตำแหน่ง ใช้สำหรับชั่งยางและสารเคมี ในการเตรียมยางคอมพอนด์และยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ ผลิตโดยบริษัท Mettler
- 3.2.17 เครื่องวัดความหนาเวอร์เนียคาลิเปอร์ ระบบดิจิทัล มีความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร ใช้สำหรับวัดความหนาของชิ้นทดสอบ
- 3.2.18 เบ้าพิมพ์สแตนเลส ขนาด 14 x 14 x 1.5 เซนติเมตร ใช้สำหรับเป็นแม่พิมพ์ในการขึ้นรูปชิ้นทดสอบด้วยวิธีการอัดเบ้า เพื่อเตรียมชิ้นทดสอบสมบัติเชิงกล
- 3.2.19 เบ้าพิมพ์ ขนาด 15.2 x 20.3 เซนติเมตร ใช้สำหรับเตรียมชิ้นทดสอบความสามารถในการติดประสาน (peel test)
- 3.2.20 เครื่องตัดชิ้นตัวอย่างรูปตัดัมเบลล์ แบบไดน์ C (Die C) ใช้สำหรับตัดชิ้นตัวอย่างยางวัลคาไนซ์ ตามมาตรฐาน ASTM D412 เพื่อทดสอบความทนต่อแรงดึง โมดูลัส และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด
- 3.2.21 มีดกรีดยาง ใช้สำหรับกรีดยางบนเครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง เพื่อตัดพลิกหน้ายางขณะผสมยางกับสารเคมี
- 3.2.22 นาฬิกาจับเวลา ใช้สำหรับจับเวลาขณะผสมยางคอมพอนด์ และขึ้นรูปชิ้นตัวอย่างด้วยวิธีการอัดเบ้า
- 3.2.23 กระดาษทราย เบอร์ 100 สำหรับเตรียมผิวโลหะด้วยวิธีทางกล (ขัดด้วยกระดาษทราย)
- 3.2.24 แผ่นโลหะ ขนาดกว้าง 25 ± 0.05 มิลลิเมตร หนา 1.6 ± 0.1 มิลลิเมตร และยาว 60 มิลลิเมตร โดยแผ่นโลหะที่ใช้ในการวิจัยมี 3 ชนิด คือ เหล็ก อะลูมิเนียม และทองแดง จำหน่ายโดย ห้างหุ้นส่วนจำกัด เหล็กใต้ ร้านนานาอะลูมิเนียม และบริษัทไทยแสงเจริญโลหะ (1998) จำกัด ตามลำดับ

3.3 วิธีดำเนินการทดลอง

ทำการศึกษาผลของความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะเหล็ก อะลูมิเนียม และทองแดง โดยใช้คอมเปานด์ยางใส่สารเสริมการยึดติด (adhesion promoter) ได้แก่ Zinc diacrylate (ZDA), Zinc dimethacrylate (ZDMA) และ Cobalt stearate เป็นต้น อีกทั้งศึกษาการใช้ยางที่มีขั้ว โดยการสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตที่มีการแปรอัตราส่วนโมลของยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (NR/HEMA) พร้อมทั้งศึกษาสมบัติเชิงกลของยางคอมเปานด์ก่อนนำมายึดติด ซึ่งขั้นตอนในการศึกษาความแข็งแรงในการยึดติดประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลัก ดังต่อไปนี้

3.3.1 การศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ

3.3.1.1 ชนิดของสารเสริมการยึดติด (adhesion promoter) : ทางการค้า และจากการสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต ต่อความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ

ทำการเตรียมยางคอมเปานด์โดยใส่สารเสริมการยึดติด ซึ่งได้แก่ สารเสริมการยึดติดทางการค้า (Zinc diacrylate (ZDA), Zinc dimethacrylate (ZDMA) และ Cobalt stearate) และสารเสริมการยึดติดที่ได้จากการสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (NR-g-HEMA) ด้วยเครื่องผสมยางสองลูกกลิ้ง (two roll mill) ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งมีลำดับการผสมดังแสดงในตารางที่ 3.1 โดยใช้ปริมาณสารเคมีต่างๆ พร้อมด้วยสารเสริมการยึดติดทางการค้า (Zinc diacrylate, Zinc dimethacrylate และ Cobalt stearate) และสารเสริมการยึดติดที่ได้จากการสังเคราะห์ขึ้นเอง (NR-g-HEMA) ดังแสดงในตารางที่ 3.2-3.5 หลังจากนั้นนำยางคอมเปานด์ มาศึกษาสมบัติการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่อง Moving die rheometer (MDR) ที่อุณหภูมิ 150°C (วัลคาไนซ์ด้วยระบบก้ำมะถัน) และอุณหภูมิ 160°C (วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์) หลังจากนั้นนำยางคอมเปานด์มาอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเบ้า (compression moulding) ที่อุณหภูมิดังกล่าว โดยใช้ความดัน 200 kg/cm² และใช้เวลาในการวัลคาไนซ์ตามที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง MDR แล้วทดสอบสมบัติเชิงกลตามมาตรฐาน ASTM D412 และทดสอบสมบัติการติดประสานระหว่างยางกับโลหะตามมาตรฐาน ASTM D429 Method B

ตารางที่ 3.1 ลำดับการผสมยางกับสารเคมี

| ลำดับ ที่ | ลำดับการผสมยางและสารเคมี | เวลาที่ใช้ (นาที) |
|----------------|---|----------------------|
| 1 | ตั้งระยะห่างระหว่างลูกกึ่ง 0.5 มิลลิเมตร บดยางโดยไม่ให้พื้นลูกกึ่ง 2 ครั้ง | 1 |
| 2 | ตั้งระยะห่างระหว่างลูกกึ่ง 1.4 มิลลิเมตร บดยางโดยให้พื้นลูกกึ่ง หน้า เมื่อยางถูกบดจนนิ่ม และผิวยางเริ่มเรียบให้ปรับระยะห่างระหว่าง ลูกกึ่งเป็น 1.4 มิลลิเมตร พร้อมทั้งตัดยางสลัซซ์ขาว | 4 |
| 3 | เติมซิงค์ออกไซด์ | 2 |
| 4 | เติมคิวมาโรนเรซิน สารเสริมการยึดติด (adhesion promoter) และ น้ำมันสปีนเดิล (ส่วนแรก) | 5 |
| 5 | เติมกรดสเตียริก | 2 |
| 6 | เติมสารเสริมการยึดติดส่วนที่ 2 น้ำมันสปีนเดิล (ส่วนที่ 2) | 5 |
| 7 | เติมวิงส์เตย์ แอล ทีเอ็มทีดี* ซีบีเอส* กำมะถัน* หรือเปอร์ออกไซด์** | 3 |
| 8 | ตัดยางเป็นระยะ $\frac{3}{4}$ ของยางแต่ละด้าน โดยสลัซซ์ขาว และตัดยาง คอมเปานด์ที่ได้ออกจากลูกกึ่ง | 2 |
| 9 | ตั้งระยะห่างระหว่างลูกกึ่งเป็น 0.8 มิลลิเมตร นำยางคอมเปานด์ผ่าน ลูกกึ่งจำนวน 6 ครั้ง โดยมีวนยางที่ผ่านแต่ละครั้งเป็นรูปทรงกระบอก และใส่ปลายข้างหนึ่งเข้าเครื่อง ยกเว้น ครั้งที่ 6 รีดยางคอมเปานด์ออก มาเป็นแผ่นให้มีความหนาไม่น้อยกว่า 6 มิลลิเมตร | 2 |
| รวมเวลา | | 26 |

หมายเหตุ : ในกรณีที่ใช้อย่างกราฟต์โคพอลิเมอร์ ให้ผสมยางกราฟต์โคพอลิเมอร์พร้อมกับยางแผ่นรมควัน

(Rss. No.3) ในลำดับการผสมที่ 2 และข้ามลำดับการใส่สารเสริมการยึดติด

* ใช้ในการเตรียมยางคอมเปานด์ ด้วยระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน

** ใช้ในการเตรียมยางคอมเปานด์ ด้วยระบบการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์

ตารางที่ 3.2 สูตรยางธรรมชาติที่แปรชนิดสารเสริมการยึดติด (adhesion promoter) ปริมาณ 10 phr โดยใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน (Sulphur cure)

| Ingredients | None (phr) | Zinc diacrylate (phr) | Zinc dimethacrylate (phr) | Cobalt stearate (phr) |
|--------------------|---------------|-----------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| RSS no.3 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| ZnO | 5 | 5 | 5 | 5 |
| HAF N330 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| Spindle oil | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Stearic acid | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Wingstay L | 1 | 1 | 1 | 1 |
| TMTD | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 |
| CBS | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Coumarone resin | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Sulphur | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Adhesion promoters | - | 10 | 10 | 10 |

ตารางที่ 3.3 สูตรยางธรรมชาติที่แปรชนิดสารเสริมการยึดติด (adhesion promoter) ปริมาณ 10 phr โดยใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์ (Peroxide cure)

| Ingredients | None (phr) | Zinc diacrylate (phr) | Zinc dimethacrylate (phr) | Cobalt stearate (phr) |
|--------------------|---------------|-----------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| RSS no.3 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| ZnO | 5 | 5 | 5 | 5 |
| HAF N330 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| Spindle oil | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Stearic acid | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Wingstay L | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Coumarone resin | 5 | 5 | 5 | 5 |
| DCP | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Adhesion promoters | - | 10 | 10 | 10 |

ตารางที่ 3.4 สูตรยางธรรมชาติดัดแปรโมเลกุล NR/HEMA : 90/10 และ 85/15 ที่แปรปริมาณ
 ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ในปริมาณต่างๆ โดยวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถัน

| Ingredients | Amount of NR-g-HEMA (phr) | | |
|-----------------|---------------------------|-----------------|-----------------|
| | 10 ^a | 33 ^a | 43 ^b |
| RSS No.3 | 100 | 75 | 70 |
| NR-g-HEMA | 10 | 25 | 30 |
| ZnO | 5 | 5 | 5 |
| HAF N330 | 30 | 30 | 30 |
| Spindle oil | 5 | 5 | 5 |
| Stearic acid | 2 | 2 | 2 |
| Wingstay L | 1 | 1 | 1 |
| Coumarone resin | 5 | 5 | 5 |
| TMTD | 0.75 | 0.75 | 0.75 |
| CBS | 1 | 1 | 1 |
| Sulphur | 5 | 5 | 5 |

ตารางที่ 3.5 สูตรยางธรรมชาติดัดแปรโมเลกุล NR/HEMA : 90/10 และ 85/15 ที่แปรปริมาณ
 ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ในปริมาณต่างๆ โดยวัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์

| Ingredients | Amount of NR-g-HEMA (phr) | | |
|-----------------|---------------------------|-----------------|-----------------|
| | 10 ^a | 33 ^a | 43 ^b |
| RSS No.3 | 100 | 75 | 70 |
| NR-g-HEMA | 10 | 25 | 30 |
| ZnO | 5 | 5 | 5 |
| HAF N330 | 30 | 30 | 30 |
| Spindle oil | 5 | 5 | 5 |
| Stearic acid | 2 | 2 | 2 |
| Wingstay L | 1 | 1 | 1 |
| Coumarone resin | 5 | 5 | 5 |
| DCP | 5 | 5 | 5 |

หมายเหตุ : ^a หมายถึง สูตรยางธรรมชาติดัดแปรโมเลกุลที่อัตราส่วนโมล NR/HEMA : 90/10

^b หมายถึง สูตรยางธรรมชาติดัดแปรโมเลกุลที่อัตราส่วนโมล NR/HEMA : 85/15

3.3.1.2 อิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ต่อความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ

ทำการศึกษาระบบการวัลคาไนซ์อย่างคอมปานด์ (คอมปานด์ยางใส่สารเสริมการยึดติด และคอมปานด์ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต) ด้วยระบบการวัลคาไนซ์แบบกัมมะถัน และเปอร์ออกไซด์ เพื่อศึกษาความแข็งแรงในการยึดติดระหว่างยางกับโลหะเหล็ก อะลูมิเนียม และทองแดง

3.3.1.3 ชนิดของโลหะต่อความสามารถในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ

ทำการศึกษาความแข็งแรงในการยึดติดของโลหะ 3 ชนิด ได้แก่ โลหะเหล็ก อะลูมิเนียม และทองแดง กับยางคอมปานด์ที่เตรียมได้จากหัวข้อ 3.3.1.1

3.3.1.4 วิธีการเตรียมผิวโลหะต่อความสามารถในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ

ทำการศึกษาวิธีการเตรียมผิวโลหะเหล็ก อะลูมิเนียม และทองแดง ด้วยวิธีทางกล (ขัดด้วยกระดาษทรายและฟันททราย) และทางเคมี (กัดผิวด้วยกรด) ซึ่งแสดงขั้นตอนในการเตรียมผิวดังต่อไปนี้

1. การเตรียมผิวโลหะด้วยวิธีทางกล แบ่งออกเป็น 2 วิธี ดังนี้

1.1 การเตรียมผิวโลหะโดยการขัดด้วยกระดาษทราย

ทำการเตรียมผิวโลหะทั้ง 3 ชนิด ด้วยกระดาษทรายเบอร์ 100 (หยาบที่สุด) โดยทำการขัดผิวโลหะตามแนวยาวของแผ่นโลหะ ซึ่งเวลาที่ใช้ในการขัดผิวโลหะแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันดังนี้ โลหะเหล็กใช้เวลาประมาณ 10 นาที/ชิ้น ในขณะที่โลหะอะลูมิเนียมและทองแดงใช้เวลาประมาณ 5 นาที/ชิ้น

1.2 การเตรียมผิวโลหะโดยการฟันททราย

ทำการเตรียมผิวโลหะทั้ง 3 ชนิด โดยการใช้เครื่องฟันททราย ซึ่งเวลาที่ใช้ในการฟันททำความสะอาดผิวโลหะแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันดังนี้ โลหะเหล็กใช้เวลาในการฟันทประมาณ 5 นาที/ชิ้น ในขณะที่โลหะอะลูมิเนียมและทองแดงใช้เวลาประมาณ 2 นาที/ชิ้น

หลังจากนั้นนำแผ่นโลหะที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีทางกลทั้ง 2 วิธี มากำจัดสิ่งสกปรกที่ตกค้างบริเวณผิวหน้าโลหะด้วยเอทานอล เพื่อล้างคราบไขมันและกำจัดเศษผงออกจากผิวโลหะ พร้อมทั้งทำให้ผิวโลหะแห้งด้วยลมร้อน ยกเว้น แผ่นโลหะทองแดงผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำแผ่นโลหะที่ทำความสะอาดแล้วเก็บไว้ในถุงซิปล็อคและใส่ตู้ดูดความชื้น ก่อนนำไปยึดติดกับยางคอมปานด์ต่อไป

2. การเตรียมผิวโลหะด้วยวิธีทางเคมี (Adhesives Design Toolkit, 2007)

ในการเตรียมผิวโลหะทางเคมีแต่ละชนิด มีวิธีการเตรียมสารละลายที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ ซึ่งมีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 3.6 หลังจากทำความสะอาดผิวโลหะแล้ว ให้เก็บแผ่นโลหะไว้ในถุงซิปล็อคและใส่ตู้ดูดความชื้น ก่อนนำไปยึดติดกับยางคอมพอนด์ต่อไป

ตารางที่ 3.6 การเตรียมสารละลาย และการเตรียมผิวโลหะด้วยวิธีทางเคมี

| ชนิดของโลหะ | วิธีการเตรียมสารละลาย | วิธีการทำความสะอาดผิวโลหะ |
|-------------|--|--|
| เหล็ก | เตรียมสารละลายกรดออร์โทฟอสฟอริก ในเมทานอลที่อัตราส่วน 1:1 (โดยน้ำหนัก) โดยเทกรดออร์โทฟอสฟอริกลงในเมทานอล พร้อมทั้งกวนตลอดเวลา | <ol style="list-style-type: none"> นำแผ่นเหล็กแช่ไว้ในสารละลายที่เตรียมได้เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ $60 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ขัดสิ่งสกปรกด้วยแปรงไนลอน และล้างออกด้วยน้ำปราศจากไอออน เป่าให้แห้ง และเช็ดผิวโลหะด้วย isopropyl alcohol (IPA) นำแผ่นเหล็กไปอบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง |
| อะลูมิเนียม | เตรียมสารละลายโดยใช้โซเดียมไดโครเมท กรดซัลฟูริก เข้มข้น และน้ำปราศจากไอออน ในอัตราส่วน 1:5:15 (โดยน้ำหนัก) โดยเทกรดซัลฟูริกลงในน้ำปราศจากไอออนที่มีปริมาณ 60 % ของน้ำทั้งหมด พร้อมทั้งกวนตลอดเวลา เติมโซเดียมไดโครเมท กวนจนเป็นสารละลายเดียวกัน หลังจากนั้นเติมน้ำปริมาณที่เหลือ | <ol style="list-style-type: none"> ล้างแผ่นอะลูมิเนียมด้วยเอทานอล และนำมาแช่ไว้ในสารละลายที่เตรียมได้ เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ $60-65^{\circ}\text{C}$ กำจัดและล้างสิ่งสกปรกด้วยน้ำปราศจากไอออน เป่าให้แห้งด้วยลมร้อนไม่เกิน 65°C เป็นเวลา 10 นาที |

ตารางที่ 3.6 การเตรียมสารละลาย และการเตรียมผิวโลหะด้วยวิธีทางเคมี (ต่อ)

| ชนิดของโลหะ | วิธีการเตรียมสารละลาย | วิธีการทำความสะอาดผิวโลหะ |
|-------------|---|---|
| ทองแดง | เตรียมสารละลายกรดไนตริก ในน้ำปราศจากไอออน ที่อัตราส่วน 7:15 (โดยน้ำหนัก) โดยค่อยๆ เทกรดไนตริกลงในน้ำอย่างช้าๆ พร้อมกับกวนตลอดเวลาเป็นเวลา 30 วินาที | 1. นำแผ่นทองแดงแช่ไว้ในสารละลายที่เตรียมได้ 10-15 นาที 2. กำจัดและล้างสิ่งสกปรกด้วยน้ำปราศจากไอออน 3. ปลดยทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง (การใช้อากาศร้อนจะทำให้สีผิวของโลหะเปลี่ยนไป) |

3.3.1.5 ชนิดของสารรองพื้น (primer) ต่อความสามารถในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ

สารรองพื้นเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความแข็งแรงในการยึดติดระหว่างยางคอมพอนด์กับแผ่นโลหะเหล็ก อะลูมิเนียม และทองแดง ซึ่งในการศึกษานี้ได้นำแผ่นโลหะที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีทางกล และทางเคมี มาจุ่มสารรองพื้นและผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้องก่อนนำไปยึดติดกับยางคอมพอนด์ในขั้นตอนต่อไป โดยสารรองพื้นที่ใช้ในการศึกษามี 3 ชนิดได้แก่

- (1) สารรองพื้นทางการค้า คือ เคมลอค 205A (primer chemlok 205A)
- (2) สารรองพื้นที่เตรียมจากยางคอมพอนด์ เรียกว่า primer compound
- (3) สารรองพื้นที่เตรียมจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ เรียกว่า primer NR-g-HEMA

วิธีการเตรียมสารรองพื้น ข้อ (2) และข้อ (3) แสดงขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) ละลายยางคอมพอนด์หรือยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ จำนวน 17.5 กรัม ด้วยโทลูอีน จำนวน 95.16 มิลลิลิตร
- 2) วางทิ้งไว้อย่างน้อย 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง
- 3) กวนสารละลายยางในโทลูอีน ด้วยความเร็ว 60 รอบ/นาที เป็นเวลา 15 นาที

3.3.2 การเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (HEMA)

ศึกษาการเตรียมน้ำยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต โดยใช้เทคนิคการเตรียมแบบอิมัลชัน และใช้อัตราส่วนโมลของยางธรรมชาติ และ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต เท่ากับ 95/5, 90/10 และ 85/15 ซึ่งมีขั้นตอนในการเตรียมดังนี้

3.3.2.1 วิธีการเตรียม 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์

ในการเตรียมมอนอเมอร์นั้น จะต้องมีการสกัดด้วยยับยั้งปฏิกิริยาที่อยู่ใน 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์นั้นออก โดยมีวิธีการดังนี้

- 1) ใส่สาลีไว้บริเวณด้านล่างของคอลัมน์หนาประมาณ 5 มิลลิเมตร แล้วเททรายลงบนสาลีหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร
- 2) ชั่งอะลูมินามา 8 กรัม แล้วค่อยๆ เทลงในคอลัมน์
- 3) เททรายลงบนอะลูมินาหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร อีกครั้ง แล้วปิดทับด้วยสาลีหนาประมาณ 5 มิลลิเมตร
- 4) เท 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตบริสุทธิ์ลงในคอลัมน์ เพื่อกำจัดไฮโดรควิโนนโมโนเมทิลอีเธอร์ ซึ่งเป็นตัวยับยั้งปฏิกิริยาออก และรองรับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตที่ไหลผ่านคอลัมน์ด้วยขวดรูปชมพู่หุ้มด้วยแผ่นอะลูมิเนียม เพื่อป้องกันแสงและแช่ไว้ในน้ำแข็ง
- 5) เก็บ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตที่ได้ ซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวใสไม่มีสีไว้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 4°C ก่อนนำไปใช้ในการสังเคราะห์ต่อไป

3.3.2.2 การสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต

นำน้ำยางธรรมชาติ (NRL) ที่มีปริมาณเนื้อยางแห้ง 60 เปอร์เซ็นต์ มา 58.33 กรัม แล้วเจือจางด้วยน้ำที่ปราศจากไอออน (DI-water) ให้ได้ 100 กรัม เพื่อให้ได้น้ำยางธรรมชาติที่มีปริมาณเนื้อยางแห้ง 35 เปอร์เซ็นต์ ใส่ลงในขวดก้นกลม 5 คอ จากนั้นเติมโซเดียมลอริลซัลเฟต (SLS), โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (NaHCO_3) และน้ำที่ปราศจากไอออน ซึ่งปริมาณสารเคมีที่ใช้แสดงดังตารางที่ 3.7 แล้วค่อยๆ หยดสารละลายโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$) พร้อมทั้งกวนด้วยความเร็ว 240 รอบต่อนาที ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงเติม 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (HEMA) ที่สารละลายในคลอโรเบนซีน และปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาต่ออีก 24 ชั่วโมงจากนั้นแบ่งน้ำยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ได้ออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกเทลงในจานเพาะเชื้อ (Petri dish) ปล่อยให้ตัวทำละลายระเหยออกไปบางส่วน แล้วนำไปอบให้แห้งในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 2 วัน

แล้วนำมาสกัดแบบซอกซ์เลต (soxhlet extraction) โดยสกัดครั้งที่ 1 ใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลาย เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อสกัดพอลิ(2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต) ออก สกัดครั้งที่ 2 ใช้ปิโตรเลียมอีเธอร์เป็นตัวทำละลายเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เช่นกัน เพื่อสกัดยางส่วนที่ไม่เกิดกราฟต์ออก หลังจากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่เหลือจากการสกัดไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR โดยใช้สภาวะของการทดสอบในช่วงเลขคลื่น $4000-400\text{ cm}^{-1}$ และหาเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการกราฟต์ (%Grafting efficiency, %GE) ดังแสดงในสมการที่ 3.1 นำส่วนที่ 2 มาจับตัวด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ที่มีความเข้มข้น 10 % (w/v) และรีดเป็นแผ่นบาง ล้างด้วยน้ำกลั่นหลายๆ ครั้ง และนำไปอบที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

$$\% \text{ประสิทธิภาพการกราฟต์} = \frac{\text{น้ำหนักยางกราฟต์โคพอลิเมอร์หลังสกัด}}{\text{น้ำหนักยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ก่อนสกัด}} \times 100 \quad (3.1)$$

ตารางที่ 3.7 ปริมาณน้ำยางและสารเคมีที่ใช้ในการกราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต

| NR/HEMA (molar ratio) | NRL (g) | HEMA (g) | $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ (mole%) | SLS (g) | NaHCO_3 (g) | DI water (ml) |
|--------------------------|------------|-------------|---|------------|-------------------------|------------------|
| 95/5 | 100 | 3.53 | 0.07 | 0.50 | 0.5 | 300 |
| 90/10 | 100 | 7.44 | 0.07 | 0.75 | 1 | 300 |
| 85/15 | 100* | 8.45 | 0.05 | 1 และ 2 | 1 | 300 |

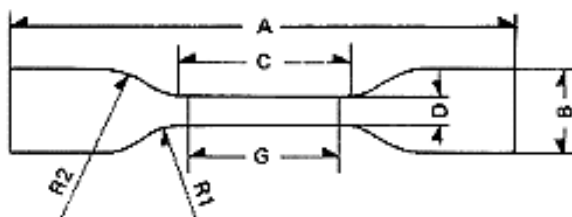
(* ที่อัตราส่วนโมล NR/HEMA : 85/15 ใช้ น้ำยางธรรมชาติ (NRL) ที่มีปริมาณเนื้อยางแห้ง 25 เปอร์เซ็นต์)

3.3.3 การศึกษาสมบัติเชิงกลของคอมเปานด์ยางใส่สารเสริมการยึดติด (adhesion promoter) : ชนิดทางการค้า และจากการสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์

ศึกษาอิทธิพลของสารเสริมการยึดติดชนิดทางการค้า และจากการกราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตต่อสมบัติเชิงกลของยางซึ่งมีวิธีการเตรียมและทดสอบชิ้นตัวอย่างดังต่อไปนี้

3.3.3.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบความทนต่อแรงดึง ทำได้โดยการขึ้นรูปร่างคอมเปานด์ที่ทราบเวลาในการวัลคาไนซ์ ซึ่งหาได้จากเครื่อง Moving die rheometer (MDR) ไปทำการขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดเบ้า (compression moulding) โดยใช้ความดันประมาณ 200 kg/cm^2 ที่อุณหภูมิ 150°C (วัลคาไนซ์ด้วยระบบกัมมะถัน) และอุณหภูมิ 160°C (วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์) หลังจากนั้นจึงทำการตัดชิ้นตัวอย่างเป็นรูปดัมเบลล์ (dumbbell) ด้วย

เครื่องตัดชิ้นตัวอย่างแบบ Die C ตามมาตรฐาน ASTM D412 ซึ่งมีขนาดและลักษณะดังแสดงในตารางที่ 3.8 และรูปที่ 3.1 ตามลำดับ ก่อนที่จะทำการทดสอบต้องมีการกำหนดช่วงการยืด (benchmark) บนชิ้นทดสอบ และวัดความหนาของชิ้นทดสอบ 3 ตำแหน่ง คือ ตรงกลางของชิ้นทดสอบ และบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดทั้งสองด้านของชิ้นทดสอบ แล้วหาค่าเฉลี่ยเพื่อใช้ในการคำนวณ



รูปที่ 3.1 ชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ (Die C) สำหรับทดสอบความทนต่อแรงดึง
(Ontario Die International Inc., 2009)

ตารางที่ 3.8 ขนาดของตัวอย่างทดสอบความทนต่อแรงดึง

| ขนาด Type 1 | (มิลลิเมตร) |
|-----------------------------|-------------|
| A (ความยาวทั้งหมด) | 115.0 |
| B (ความกว้างปลาย) | 25.0 ± 1.0 |
| C (ความยาวส่วนที่คอดขนาน) | 33.0 ± 2.0 |
| D (ความกว้างส่วนที่คอดขนาน) | 6.0 ± 0.4 |
| R1 (small radius) | 14.0 ± 1.0 |
| R2 (large radius) | 25.0 ± 2.0 |
| ความหนา | 2.0 ± 0.2 |

3.3.3.2 นำชิ้นตัวอย่างยางวัลคาไนซ์ไปทดสอบความทนต่อแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (tensometer) โดยใช้ความเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที บันทึกค่าแรงตรงตำแหน่งที่มีการยืดของชิ้นตัวอย่างจากเดิมเป็น 100% ของความยาวเดิมก่อนทำการทดสอบแรงดึงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นทดสอบขาด (max load) และค่าการยืด ณ จุดขาด (elongation at break) เพื่อนำไปคำนวณค่าโมดูลัส (modulus) ที่การยืด 100% ค่าความเค้นที่จุดขาด (stress at break) หรือค่าความทนต่อแรงดึง (tensile strength) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% elongation at break) ตามลำดับ ดังนี้

การคำนวณ

1. ค่าโมดูลัสที่การยืด 100% (100% modulus) หน่วยของแรงที่บันทึกได้จากเครื่อง ณ ตำแหน่งที่มีการยืดของชิ้นทดสอบ เป็น 100% จากช่วงการยืดที่กำหนดไว้ คือ N เมื่อนำมาคำนวณต่อพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบขณะยังไม่ยืด (mm^2) ดังแสดงในสมการที่ 3.2 จะได้ค่าโมดูลัสที่การยืด 100% มีหน่วยเป็น N/mm^2 หรือ เมกกะพาสคาล (MPa) ในหน่วย SI ซึ่งเป็นหน่วยเดียวกันกับค่าความทนต่อแรงดึง

$$\text{100\% modulus} = \frac{F}{A} \quad (3.2)$$

โดย

F คือ แรงดึงที่ทำให้ชิ้นทดสอบยืด 100% (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ ขณะยังไม่มีการยืด (mm^2)

2. ค่าความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) คือ ค่าแรงดึงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นทดสอบขาด (หน่วยที่บันทึกได้จากเครื่อง คือ นิวตัน, N) เมื่อนำมาคำนวณต่อพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ ขณะยังไม่มีการยืด มีหน่วยเป็น mm^2 ดังแสดงในสมการที่ 3.3 จะได้ค่าความทนต่อแรงดึง มีหน่วยเป็น N/mm^2 หรือ เมกกะพาสคาล (MPa) ในหน่วย SI ($1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ Pa}$)

$$\text{Tensile strength} = \frac{\text{Max load}}{A} \quad (3.3)$$

โดย

Max load คือ แรงดึงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นทดสอบขาด (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ ขณะยังไม่มีการยืด (mm^2)

3. เปอร์เซนต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break)

$$\text{Elongation at break} = \frac{(L - L_0)}{L_0} \times 100 \quad (3.4)$$

โดย

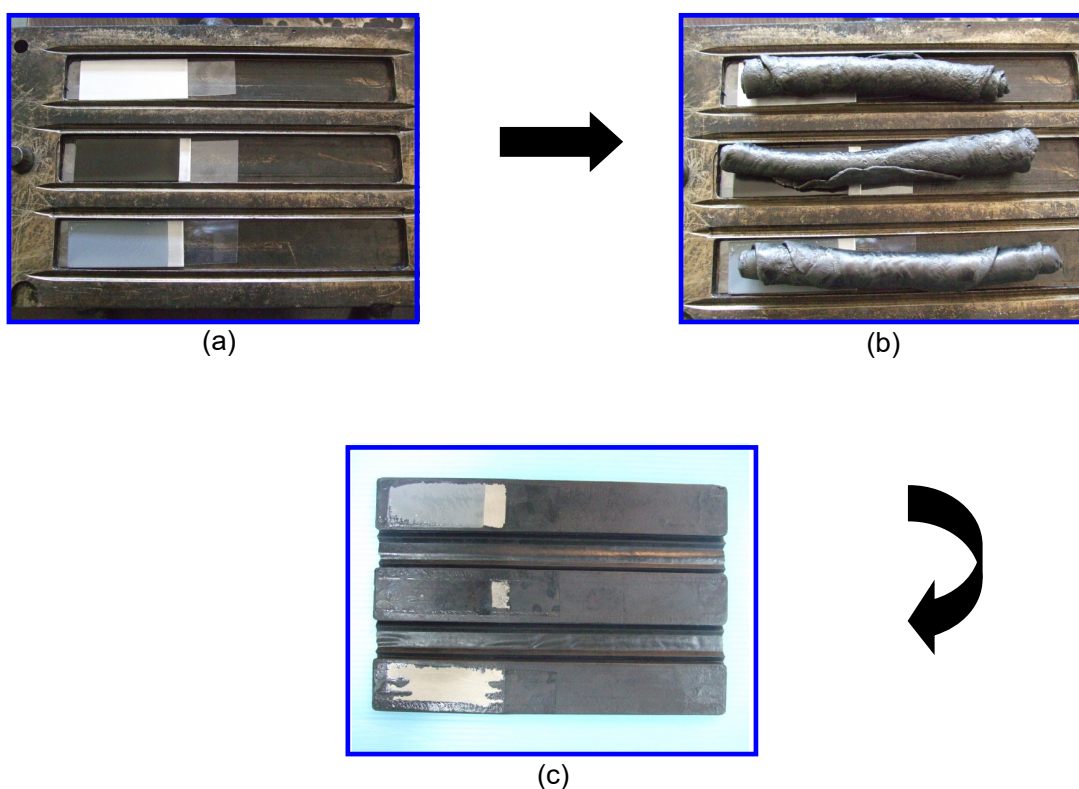
L คือ ระยะที่ชิ้นทดสอบสามารถยืดตัวได้จนขาด (mm)

L_0 คือ ระยะกำหนดก่อนทำการทดสอบ (mm)

3.3.4 การทดสอบความสามารถในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ ด้วยวิธีการแบบลอก (peel test) ตามมาตรฐาน ASTM D429-03 Method B

3.3.4.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบความสามารถในการติดประสาน

การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบความสามารถในการติดประสาน ทำได้โดยซึ่งยางคอมพอนด์ประมาณ 25 กรัม มาอุ่นด้วยเครื่องผสมยางสองลูกกลิ้งและวางลงในเบ้า โดยวางแผ่นโลหะที่มีความหนา 1.6 ± 0.1 มิลลิเมตร กว้าง 25 ± 0.05 มิลลิเมตร ยาว 60 มิลลิเมตร ไว้ด้านล่างและวางยางคอมพอนด์ไว้ด้านบนบนแผ่นโลหะ ทำการวัลคาไนซ์ยางติดโลหะภายใต้อุณหภูมิ 150°C (วัลคาไนซ์ด้วยระบบกัมมะถัน) และอุณหภูมิ 160°C (วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์) สำหรับเวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ยางแต่ละสูตรหาได้จากเครื่อง Moving die rheometer (MDR) หลังจากวัลคาไนซ์ยางติดกับแผ่นโลหะแล้ว ควรเก็บชิ้นทดสอบไว้ที่อุณหภูมิห้องอย่างน้อย 48 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบการติดประสาน ซึ่งได้แสดงขั้นตอนในการเตรียมชิ้นทดสอบสมบัติการติดประสาน ดังรูปที่ 3.2



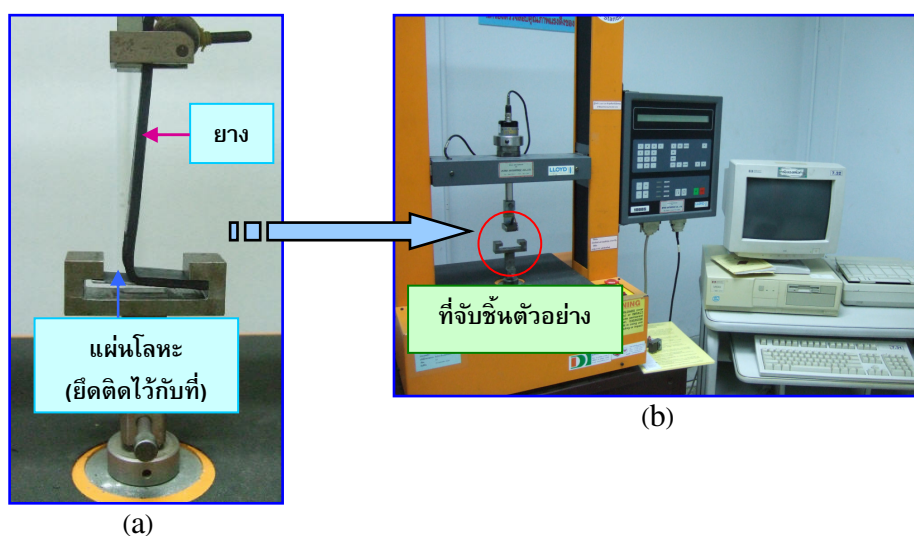
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นทดสอบสมบัติการติดประสาน (Peel test)

(a) วางแผ่นโลหะไว้ด้านล่างของเบ้า (b) วางยางคอมพอนด์ไว้บนแผ่นโลหะ

(c) ชิ้นตัวอย่างที่ได้หลังจากทำการวัลคาไนซ์ยางติดกับแผ่นโลหะ

3.3.4.2 การทดสอบการติดประสาน (Adhesion strength) ระหว่างยางกับโลหะ

การทดสอบการติดประสานเป็นการวัดแรงที่ใช้ดึงแผ่นยางให้แยกออกจากแผ่นโลหะด้วยเครื่องทดสอบความทนต่อแรงดึง โดยกำหนดมุมในการดึง 90 องศา ด้วยอัตราความเร็วคงที่ 50 ± 5 มิลลิเมตรต่อนาที ทำการติดตั้งชิ้นทดสอบเข้ากับที่จับ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และใช้มีดคัตเตอร์ กรีดให้ยางขาดออกจากโลหะลึกประมาณ 2 มิลลิเมตร ตลอดความยาวหน้ารอยต่อก่อนเดินเครื่อง เพื่อฉีกแผ่นยางออกจากแผ่นโลหะ และบันทึกแรงดึงสูงสุดที่ใช้ฉีกยางเป็นระยะ 25 มิลลิเมตร โดยทำการบันทึกผลการทดลองตามตารางที่ 3.9 เพื่อนำไปคำนวณความแข็งแรงในการติดประสานตามสูตร (3.5) (ในกรณีที่ใช้โลหะที่เตรียมผิวโดยการขัดด้วยกระดาษทราย ได้ทำการดึงแผ่นยางออกจากโลหะตามแนวยาวของแผ่นโลหะ)



รูปที่ 3.3 การทดสอบการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ (a) การจับชิ้นตัวอย่าง (b) เครื่องทดสอบความทนต่อแรงดึง

การคำนวณค่าการติดประสาน (Adhesion Strength) ดังแสดงในสูตร (3.5)

$$\text{Adhesion Strength} = \frac{F}{d} \quad (3.5)$$

เมื่อ F คือ แรงดึงสูงสุด (นิวตัน) หรือแรงฉีกเฉลี่ยที่ได้จากการวิเคราะห์ของแรงดึง
 d คือ ความกว้างของแผ่นยาง (มิลลิเมตร)

ตารางที่ 3.9 ตัวอย่างตารางที่ใช้ในการบันทึกผลการทดสอบการติดประสาน

| Stock | Cure | Metal and Metal Finishing Used | Pull | | Type of Break, % | | | |
|-------|------|--------------------------------|-----------------|------------------|------------------|----|----|---|
| | | | Sample, lbf/in. | Average, lbf/in. | R | RC | CP | M |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

Date.....

By.....

เมื่อ R เกิดความล้มเหลวที่เนื้อยาง

RC เกิดความล้มเหลวที่รอยต่อระหว่างยางกับกาวชั้นนอก

CP เกิดความล้มเหลวที่รอยต่อระหว่างกาวกับสารรองพื้น

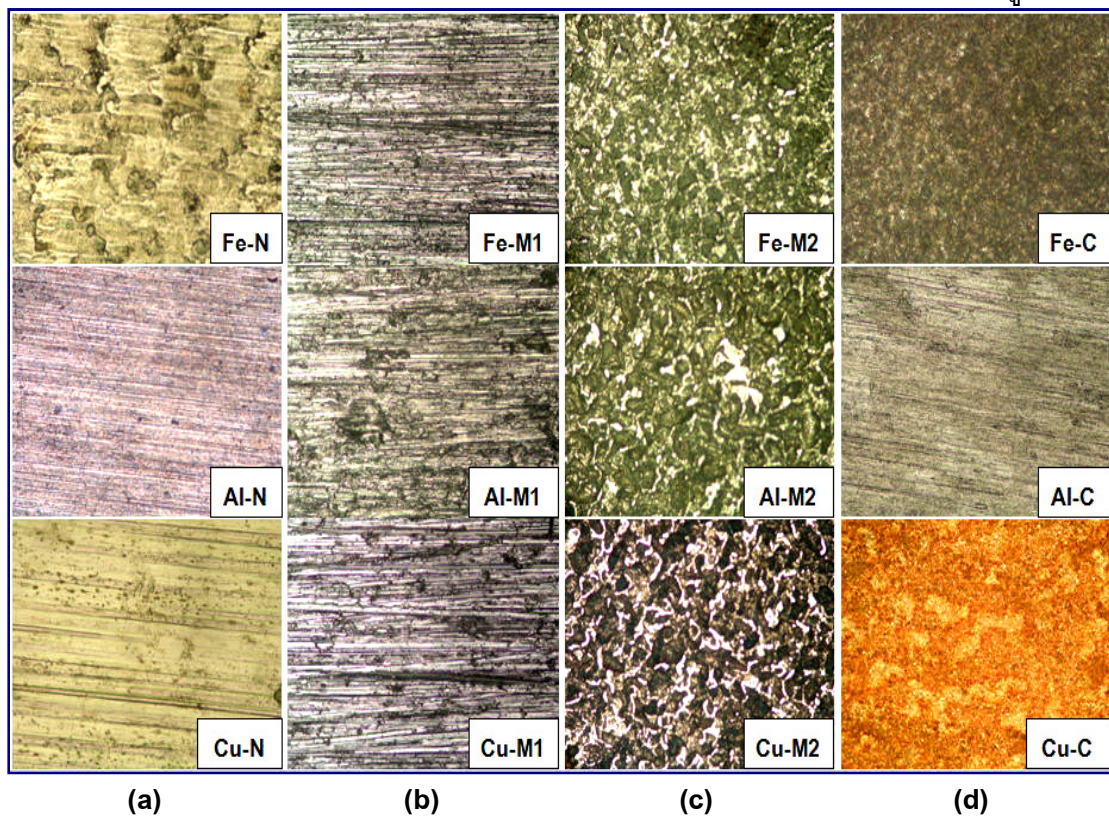
M เกิดความล้มเหลวระหว่างรองพื้นกับโลหะ

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลการศึกษาลักษณะของผิวโลหะก่อน – หลังการเตรียมผิวด้วยวิธีทางกล และทางเคมี

เนื่องจากการเตรียมผิวโลหะมีผลต่อความแข็งแรงในการยึดติด ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงได้มีการศึกษาผลของการเตรียมผิวโลหะ 2 วิธีใหญ่ๆ คือ การเตรียมผิวด้วยวิธีทางกล (ขัดด้วยกระดาษทรายและฟันททราย) และวิธีทางเคมี (กัดผิวด้วยกรด) ซึ่งได้แสดงขั้นตอนของการเตรียมผิวโลหะในหัวข้อ 3.3.1.4 จากนั้นนำแผ่นโลหะที่ผ่านการเตรียมผิวของแต่ละวิธีมาศึกษาลักษณะของพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Optical microscope) ที่กำลังขยาย 100 เท่า เพื่อเปรียบเทียบกับผิวของโลหะที่ไม่ได้ผ่านการเตรียมผิว ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ลักษณะพื้นผิวโลหะส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Optical microscope) ที่กำลังขยาย 100 เท่า (a) ก่อนเตรียมผิว (N), (b) เตรียมผิวด้วยวิธีการขัดกระดาษทราย (M1), (c) เตรียมผิวด้วยวิธีการฟันททราย (M2) และ (d) เตรียมผิวด้วยวิธีการกัดด้วยกรด (C)
หมายเหตุ : Fe, Al และ Cu แทนโลหะเหล็ก อะลูมิเนียม และทองแดง ตามลำดับ

ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวโลหะก่อนและหลังการเตรียมผิวด้วยวิธีทางกล และทางเคมี ด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Optical microscope) ที่กำลังขยาย 100 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.1 พบว่าลักษณะของพื้นผิวมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดและวิธีการเตรียมผิวโลหะ โดยโลหะที่เตรียมผิวด้วยวิธีทางกล ไม่ว่าจะเป็นการเตรียมผิวด้วยวิธีการขัดด้วยกระดาษทราย หรือการพ่นทราย จะเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนว่าลักษณะพื้นผิวของโลหะทั้ง 3 ชนิด มีความขรุขระมากกว่าการเตรียมผิวทางเคมี (การกัดผิวด้วยกรด) และโลหะที่ไม่ได้ผ่านการเตรียมผิวตามลำดับ สำหรับลักษณะของพื้นผิวทั้ง 3 ชนิด ที่เตรียมโดยวิธีการขัดด้วยกระดาษทราย พบว่าพื้นผิวมีรอยขรุขระเป็นแนวเกี่ยวกับการขัดแผ่นโลหะ นอกจากนี้ ยังมีลักษณะเป็นร่องยาวตามความยาวของแผ่นโลหะอีกด้วย สำหรับโลหะที่เตรียมผิวด้วยวิธีการพ่นทราย พบว่ามีความขรุขระเกิดขึ้นทั่วบริเวณผิวหน้าของโลหะ โดยมีลักษณะเป็นหลุมเล็กๆ ในส่วนของการเตรียมผิวด้วยวิธีการกัดผิวหน้าด้วยสารเคมีที่เป็นกรดนั้น พบว่าผิวหน้าของโลหะทั้ง 3 ชนิด เกิดความขรุขระที่มีลักษณะเป็นหลุมเล็กๆ และละเอียดกว่าการเตรียมผิวด้วยการพ่นทรายเกิดขึ้นทั่วผิวหน้าอย่างสม่ำเสมอ

4.2 ผลของการใช้สารเสริมการยึดติด (adhesion promoter) ทางการค้าต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ

4.2.1 ผลการใช้สารเสริมการยึดติดทางการค้าต่อสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ

เตรียมยางคอมพอนด์ใส่สารเสริมการยึดติดทางการค้า ได้แก่ Zinc diacrylate (ZDA), Zinc dimethacrylate (ZDMA) และ Cobalt stearate ตามสูตรดังแสดงในตารางที่ 3.2 และ 3.3 โดยมีลำดับการผสมดังแสดงในตารางที่ 3.1 จากนั้นนำยางคอมพอนด์ที่ได้ไปทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่อง Moving die rheometer (MDR) ที่อุณหภูมิ 150°C (วัลคาไนซ์ด้วยระบบกัมมะถัน) และอุณหภูมิ 160°C (วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์) แล้วขึ้นรูปยางด้วยวิธีการอัดเป่า (compression molding) ตามเวลาในการวัลคาไนซ์ที่ได้จากเครื่อง MDR ดังแสดงในตารางที่ 4.1 แล้วเตรียมชิ้นทดสอบรูปแท้มเบลล์ และนำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง เพื่อหาค่าสมบัติเชิงกล เช่น โมดูลัสที่ 100% (100% Modulus) ความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) ของยางทั้งที่ใส่และไม่ใส่สารเสริมการยึดติดทางการค้า โดยใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบกัมมะถันและเปอร์ออกไซด์ แสดงผลการทดลองดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.2–4.4

เมื่อนำยางใส่สารเสริมการยึดติดทางการค้า Zinc diacrylate (ZDA), Zinc dimethacrylate (ZDMA) และ Cobalt stearate มาศึกษาลักษณะการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่อง MDR ที่อุณหภูมิ 150°C (วัลคาไนซ์ด้วยระบบกัมมะถัน) และอุณหภูมิ 160°C (วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์) พบว่าสารเสริมการยึดติดมีผลต่อช่วงระยะเวลาที่สามารถแปรรูปได้ (scorch time, T_{s_1}) และเวลาในการวัลคาไนซ์ (cure time, $T_{c_{90}}$) ดังสรุปได้ในตารางที่ 4.1

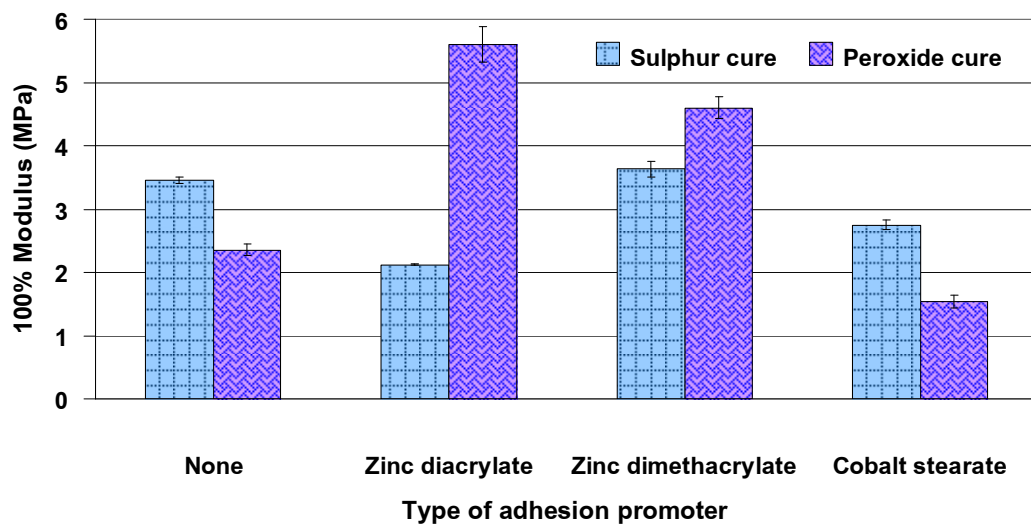
ตารางที่ 4.1 ลักษณะการวัลคาไนซ์อย่างคอมปานต์ใส่สารเสริมการยึดติดทางการค้าด้วยระบบกัมมะถัน และเปอร์ออกไซด์

| Type of adhesion promoter | Sulphur cure @ 150°C | | Peroxide cure @ 160°C | |
|------------------------------|----------------------|--------------|-----------------------|--------------|
| | T_{s_1} | $T_{c_{90}}$ | T_{s_1} | $T_{c_{90}}$ |
| | (Min:Sec) | (Min:Sec) | (Min:Sec) | (Min:Sec) |
| None | 1.18 ± 0.10 | 2.49 ± 0.60 | 0.54 ± 0.26 | 16.55 ± 1.02 |
| Zinc diacrylate | 1.17 ± 0.03 | 12.47 ± 0.80 | 0.35 ± 0.01 | 16.34 ± 0.32 |
| Zinc dimethacrylate | 1.44 ± 0.04 | 14.28 ± 3.16 | 0.40 ± 0.02 | 16.42 ± 0.87 |
| Cobalt stearate | 3.04 ± 0.06 | 11.28 ± 0.15 | 1.12 ± 0.35 | 4.52 ± 0.53 |

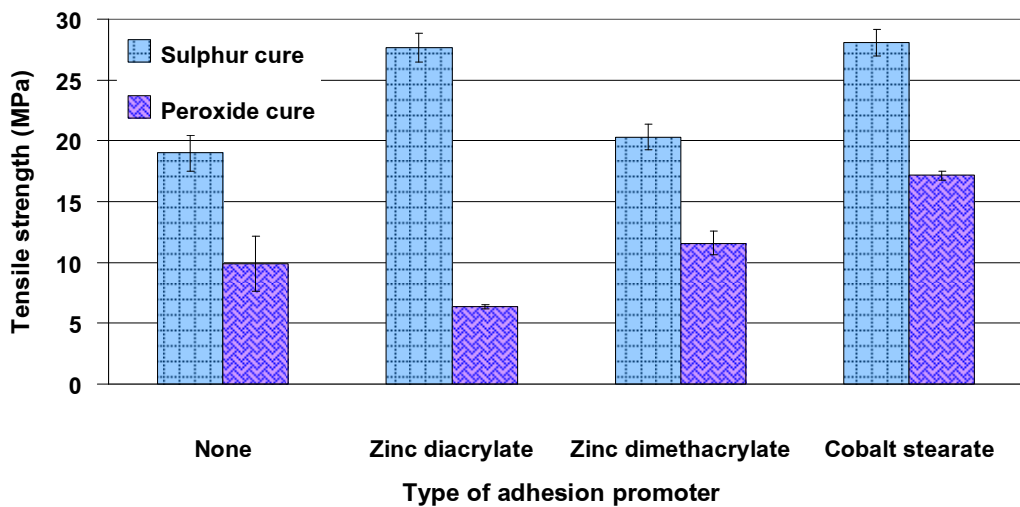
จากตารางที่ 4.1 พบว่ายางที่ใส่สารเสริมการยึดติดและวัลคาไนซ์ด้วยระบบกัมมะถัน ได้แสดงลักษณะการวัลคาไนซ์แตกต่างจากยางที่ปราศจากสารเสริมการยึดติด กล่าวคือมีช่วงระยะเวลาที่สามารถแปรรูปได้ (scorch time) และเวลาในการวัลคาไนซ์ (cure time) นานขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากสารเสริมการยึดติดเป็นสารที่สามารถแตกตัวแล้วได้สารที่เป็นกรด ซึ่งทำให้ยางมีสภาพความเป็นกรดไปด้วย และเป็นที่ยอมรับกันว่าสภาพความเป็นกรดในระบบการวัลคาไนซ์แบบกัมมะถัน มีผลทำให้การเชื่อมโยงของกัมมะถันกับยางเกิดขึ้นช้าลง หรือที่เรียกว่าพฤติกรรมกรรณหวง (กรรณการ์, 2546) จึงทำให้ต้องใช้เวลาในการวัลคาไนซ์ยางเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับยางที่ปราศจากสารเสริมการยึดติด โดยที่ยางปราศจากสารเสริมการยึดติดใช้เวลาในการวัลคาไนซ์ประมาณ 3 นาที แต่เมื่อใส่สารเสริมการยึดติดลงไป พบว่าต้องใช้เวลาในการวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้นมากกว่า 4 เท่า คือใช้เวลาประมาณ 12-15 นาที สำหรับการวัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าเวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์หลังจากใส่สารเสริมการยึดติด มีความใกล้เคียงกับยางที่ปราศจากสารเสริมการยึดติด กล่าวคือ ใช้เวลาในการวัลคาไนซ์ประมาณ 16-17 นาที ยกเว้น ยางที่ใส่ Cobalt stearate ที่ใช้เวลาในการวัลคาไนซ์น้อยที่สุดคือประมาณ 5 นาที

ตารางที่ 4.2 ผลของระบบการวัลคาไนซ์ และชนิดของสารเสริมการยึดติดทางการค้าที่ปริมาณ 10 phr ต่อสมบัติเชิงกล

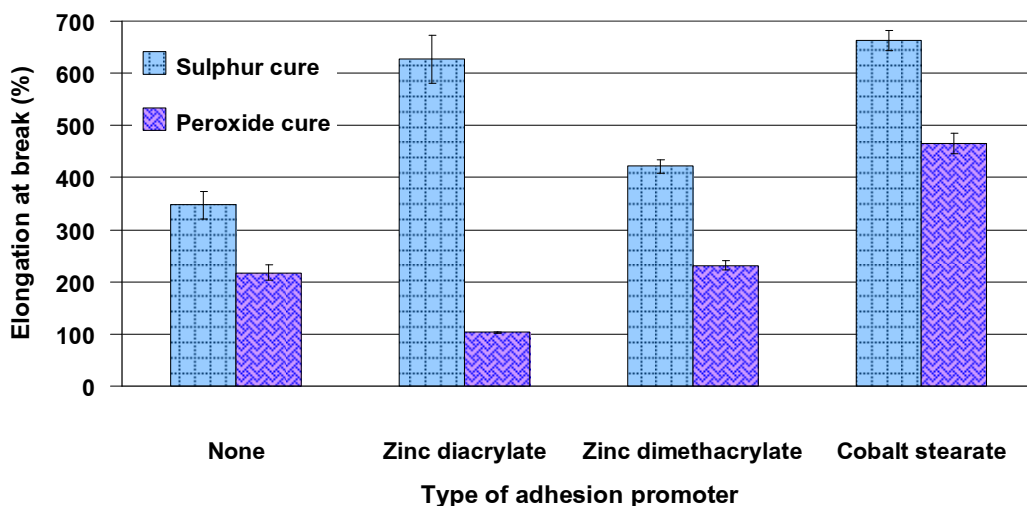
| Cure system | Type of adhesion promoter | 100%Modulus (MPa) | Tensile strength (MPa) | Elongation at break (%) |
|---------------|---------------------------|-------------------|------------------------|-------------------------|
| Sulphur cure | None | 3.45 ± 0.05 | 19.00 ± 1.45 | 347.63 ± 26.51 |
| | Zinc diacrylate | 2.12 ± 0.01 | 27.65 ± 1.18 | 626.88 ± 45.43 |
| | Zinc dimethacrylate | 3.63 ± 0.13 | 20.30 ± 1.03 | 421.54 ± 12.31 |
| | Cobalt stearate | 2.75 ± 0.07 | 28.06 ± 1.07 | 662.48 ± 19.26 |
| Peroxide cure | None | 2.35 ± 0.09 | 9.87 ± 2.26 | 217.96 ± 14.70 |
| | Zinc diacrylate | 5.60 ± 0.28 | 6.35 ± 0.17 | 102.87 ± 0.65 |
| | Zinc dimethacrylate | 4.60 ± 0.17 | 11.60 ± 0.96 | 231.12 ± 8.55 |
| | Cobalt stearate | 1.54 ± 0.10 | 17.14 ± 0.41 | 465.33 ± 19.26 |



รูปที่ 4.2 โมดูลัสที่ 100% ของยางธรรมชาติที่มีสารเสริมการยึดติดทางการค้า



รูปที่ 4.3 ความทนต่อแรงดึงของยางธรรมชาติที่มีสารเสริมการยึดติดทางการค้า



รูปที่ 4.4 เปอร์เซนต์การยืด ณ จุดขาดของยางธรรมชาติที่มีสารเสริมการยึดติดทางการค้า

สำหรับสมบัติของยางวัลคาไนซ์ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.2–4.4 พบว่ายางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันมีค่าความทนต่อแรงดึง และเปอร์เซนต์การยืด ณ จุดขาดสูงกว่ายางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ เนื่องจากการวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันมีการเชื่อมโยงแบบพอลิซัลไฟดิกเกิดขึ้น จึงทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดี และสูงกว่ายางวัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ (พรพรรณ, 2528; Costin, R. and Nagel, W. 1990) แต่สำหรับค่าโมดูลัสที่ 100% ของยางใส่ Zinc diacrylate และ Zinc dimethacrylate ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันมีค่าต่ำกว่ายางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลของยางใส่สารเสริมการยึดติดแต่ละชนิด ในระบบกำมะถัน พบว่ายางใส่สารเสริมการยึดติด Zinc

dimethacrylate ให้ค่าโมดูลัสที่ 100% ใกล้เคียงกับยางที่ปราศจากสารเสริมการยึดติด และยังให้ค่าสูงกว่ายางใส่สารเสริมการยึดติด Cobalt stearate และ Zinc diacrylate ตามลำดับ ในระบบเปอร์ออกไซด์ ยางที่ใส่สารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate มีค่าโมดูลัสที่ 100% สูงกว่ายางใส่สารเสริมการยึดติด Zinc dimethacrylate ยางที่ปราศจากสารเสริมการยึดติด และใส่สารเสริมการยึดติด Cobalt stearate ตามลำดับ สำหรับค่าความทนต่อแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ของยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันและเปอร์ออกไซด์ มีแนวโน้มที่เหมือนกัน กล่าวคือ ยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถัน มีค่าความทนต่อแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด สูงสุดเมื่อใส่สารเสริมการยึดติด Cobalt stearate รองลงมาคือ Zinc diacrylate, Zinc dimethacrylate และยางที่ปราศจากสารเสริมการยึดติด ตามลำดับ แต่ในระบบเปอร์ออกไซด์ ยางที่ใส่สารเสริมการยึดติด Cobalt stearate ให้ค่าความทนต่อแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดสูงสุด รองลงมาคือ ยางใส่สารเสริมการยึดติด Zinc dimethacrylate ยางที่ปราศจากสารเสริมการยึดติด และยางที่ใส่สารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate ตามลำดับ

4.2.2 ความสามารถในการติดประสานระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติดทางการค้ากับโลหะ

ศึกษาความสามารถในการติดประสานระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติดทางการค้า ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสารเสริมการยึดติด 3 ชนิด ได้แก่ Zinc diacrylate (ZDA), Zinc dimethacrylate (ZDMA) และ Cobalt stearate เพื่อเปรียบเทียบกับยางที่ปราศจากสารเสริมการยึดติด กับโลหะเหล็ก อะลูมิเนียม และทองแดงที่เตรียมผิวด้วยวิธีทางกล และทางเคมี

4.2.2.1 ชนิดของสารเสริมการยึดติด (adhesion promoter) ทางการค้าต่อความสามารถในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ

ศึกษาผลของชนิดสารเสริมการยึดติดทางการค้า โดยในที่นี้ได้นำสารเสริมการยึดติดทางการค้า 3 ชนิด ได้แก่ Zinc diacrylate (ZDA), Zinc dimethacrylate (ZDMA) และ Cobalt stearate มาทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการติดประสานกับยางที่ปราศจากสารเสริมการยึดติด โดยนำสารเสริมการยึดติดมาเตรียมเป็นยางคอมพอนด์ โดยมีปริมาณยางและสารเคมี ดังแสดงในตารางที่ 3.2 และ 3.3 แล้วนำมายึดติดกับโลหะที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีทางกล (การขัดด้วยกระดาษทรายและการพ่นทราย) และทางเคมี (การกัดผิวด้วยกรด) ตามหัวข้อ 3.3.1.4 โดยมีขั้นตอนในการเตรียมชิ้นทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.2 แล้วทำการวัลคาไนซ์ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเบ้าที่อุณหภูมิ 150°C (วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถัน) และอุณหภูมิ 160°C (วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์) จากนั้นทดสอบความสามารถในการติดประสานแบบปอกด้วยมุม 90 องศา ที่อุณหภูมิห้อง ตามหัวข้อ 3.3.4.2 ซึ่งผลของชนิดสารเสริม

การยึดติดที่ใช้ในการติดประสานกับโลหะที่เตรียมผิวโดยการขัดด้วยกระดาษทราย แสดงดังตารางที่ 4.3–4.5 และรูปที่ 4.5 ผลการติดประสานกับโลหะที่เตรียมผิวโดยการพ่นทราย แสดงดังตารางที่ 4.6–4.8 และรูปที่ 4.6 ผลการติดประสานกับโลหะที่เตรียมผิวโดยการกัดผิวด้วยกรด แสดงดังตารางที่ 4.9–4.11 และรูปที่ 4.7 ตามลำดับดังนี้

1) การติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่เตรียมผิวด้วยวิธีทางกล (ขัดด้วยกระดาษทราย)

ตารางที่ 4.3 ชนิดของสารเสริมการยึดติด ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะชนิดต่างๆ (ขัดด้วยกระดาษทราย) โดยปราศจากสารรองพื้น

| Vulcanization system | Type of adhesion promoter | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------|-------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | None | 303.14 ± 22.29 | 232.15 ± 83.41 | 311.99 ± 46.31 | | ✓ |
| | Zinc diacrylate | 212.14 ± 15.18 | 607.16 ± 40.80 | 471.35 ± 52.44 | | ✓ |
| | Zinc dimethacrylate | 263.05 ± 16.40 | 218.73 ± 31.95 | 420.28 ± 75.17 | | ✓ |
| | Cobalt stearate | 1071.72 ± 99.30 | 195.45 ± 58.35 | 211.86 ± 14.50 | | ✓ |
| | None | 77.34 ± 2.86 | 149.43 ± 22.58 | 154.32 ± 29.17 | | ✓ |
| | Zinc diacrylate | 1199.38 ± 73.61 | 1030.79 ± 294.47 | R* | | ✓ |
| Peroxide cure | Zinc dimethacrylate | 419.19 ± 10.13 | 437.51 ± 34.52 | 194.13 ± 46.19 | | ✓ |
| | Cobalt stearate | 84.14 ± 10.21 | 183.59 ± 33.60 | 117.32 ± 23.53 | | ✓ |

หมายเหตุ : มีการใช้สัญลักษณ์ดังต่อไปนี้ในการเขียนวิทยานิพนธ์ตลอดทั้งเล่ม

R* เกิดความล้มเหลวที่เนื้อยาง (Cohesive failure)

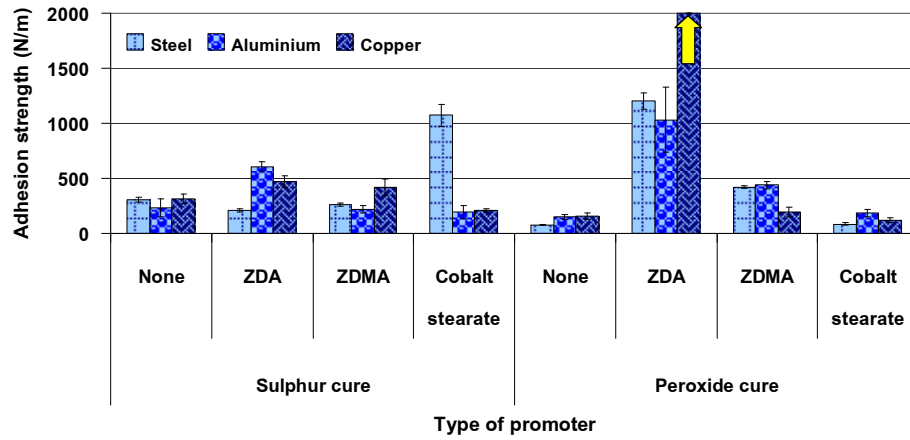
M เกิดความล้มเหลวระหว่างยาง/รองพื้นกับโลหะ (Adhesive failure)

ตารางที่ 4.4 ชนิดของสารเสริมการยึดติด ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยาง กับโลหะชนิดต่างๆ (ขัดด้วยกระดาษทราย) ที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยาง คอมเปานด์

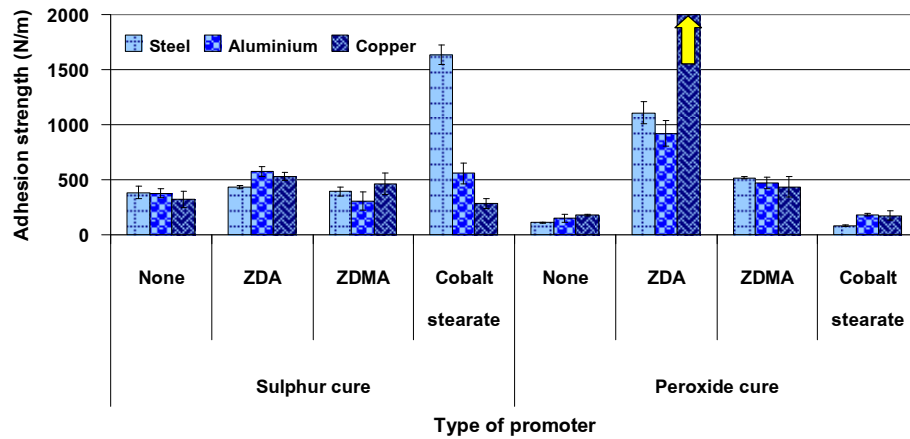
| Vulcanization system | Type of adhesion promoter | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------|-------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | None | 382.11 ± 54.80 | 376.09 ± 38.49 | 321.16 ± 75.32 | | ✓ |
| | Zinc diacrylate | 430.67 ± 14.98 | 573.87 ± 46.09 | 530.47 ± 40.29 | | ✓ |
| | Zinc dimethacrylate | 393.16 ± 39.50 | 305.15 ± 83.72 | 464.09 ± 95.03 | | ✓ |
| | Cobalt stearate | 1634.31 ± 89.45 | 556.56 ± 92.36 | 284.15 ± 47.69 | | ✓ |
| | None | 110.84 ± 4.46 | 151.58 ± 37.48 | 179.02 ± 5.20 | | ✓ |
| | Zinc diacrylate | 1108.13 ± 104.31 | 918.61 ± 115.56 | R* | | ✓ |
| Peroxide cure | Zinc dimethacrylate | 515.65 ± 10.90 | 470.85 ± 53.79 | 436.01 ± 94.01 | | ✓ |
| | Cobalt stearate | 79.04 ± 7.21 | 182.52 ± 10.92 | 174.23 ± 39.45 | | ✓ |

ตารางที่ 4.5 ชนิดของสารเสริมการยึดติด ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยาง กับโลหะชนิดต่างๆ (ขัดด้วยกระดาษทราย) ที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นทางการค้า

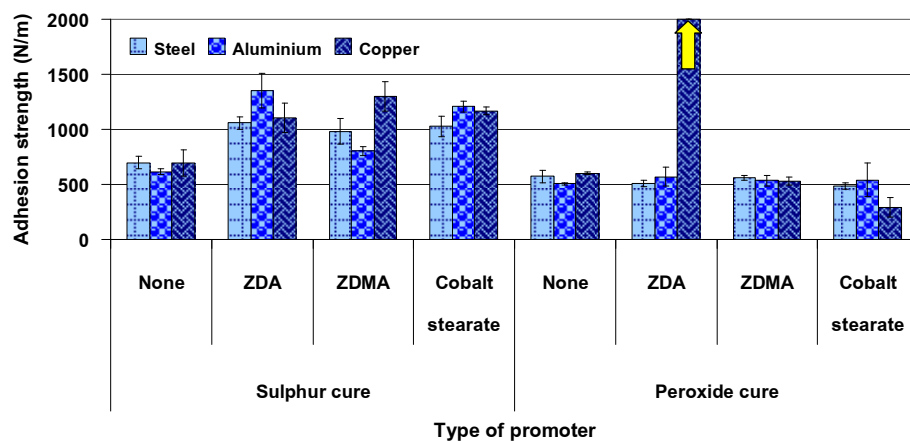
| Vulcanization system | Type of adhesion promoter | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------|---------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | None | 695.28 ± 55.51 | 615.03 ± 28.98 | 691.76 ± 120.05 | | ✓ |
| | Zinc diacrylate | 1056.43 ± 55.05 | 1350.50 ± 157.30 | 1104.86 ± 133.62 | | ✓ |
| | Zinc dimethacrylate | 980.76 ± 115.53 | 803.70 ± 41.85 | 1297.74 ± 137.19 | | ✓ |
| | Cobalt stearate | 1028.70 ± 93.78 | 1206.58 ± 49.07 | 1167.55 ± 31.36 | | ✓ |
| | None | 572.69 ± 54.59 | 504.47 ± 10.92 | 600.63 ± 12.60 | | ✓ |
| | Zinc diacrylate | 505.33 ± 30.89 | 570.25 ± 87.09 | R* | | ✓ |
| Peroxide cure | Zinc dimethacrylate | 558.18 ± 24.31 | 534.09 ± 51.54 | 530.74 ± 39.37 | | ✓ |
| | Cobalt stearate | 484.75 ± 32.26 | 540.31 ± 154.30 | 289.76 ± 90.22 | | ✓ |



(a) Without primer



(b) With primer compound solution



(c) With primer chemlok205A

รูปที่ 4.5 ชนิดของสารเสริมการยึดติด ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะชนิดต่างๆ (ขัดด้วยกระดาษทราย)

ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางที่ปราศจากสารเสริมการยึดติด และยางที่ใช้สารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate (ZDA), Zinc dimethacrylate (ZDMA) และ Cobalt stearate โดยวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันและเปอร์ออกไซด์ กับโลหะที่เตรียมผิวด้วยวิธีทางกล (ขัดด้วยกระดาษทราย) และมีการรองพื้นโลหะด้วยสารรองพื้นที่เตรียมขึ้นจากยางคอมพอนด์ และสารรองพื้นทางการค้า (Chemlok 205A) เพื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงในการยึดติดกับโลหะที่ปราศจากสารรองพื้น ดังแสดงในตารางที่ 4.3–4.5 และรูปที่ 4.5 พบว่าความล้มเหลวของการยึดติดระหว่างยางกับโลหะเหล็ก อะลูมิเนียม และทองแดง เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างยางกับแผ่นโลหะ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า เกิดความล้มเหลวแบบแอดฮีซีฟ (adhesive failure) ทุกชนิดของสารเสริมการยึดติด และทุกชนิดของสารรองพื้น ทั้งในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถันและเปอร์ออกไซด์ ยกเว้น การติดประสานระหว่างยางที่ใช้ Zinc diacrylate ในระบบเปอร์ออกไซด์ กับโลหะทองแดง (ทั้งที่ใช้และไม่ใช้สารรองพื้น) ที่พบว่ามีเกิดการเกิดความล้มเหลวของการยึดติดขึ้นภายในเนื้อยาง หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า เกิดความล้มเหลวแบบโคฮีซีฟ (cohesive failure) ซึ่งความล้มเหลวที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้ มีความแข็งแรงในการยึดติดระหว่างยางกับโลหะสูงมาก จนทำให้ยางเกิดการฉีกขาดในขณะที่ทำการทดสอบแบบปกด้วยมุม 90 องศา จึงไม่สามารถอ่านค่าความแข็งแรงในการติดประสานได้ เมื่อพิจารณาความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่ปราศจากสารรองพื้น ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (a) พบว่าในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน สารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate ให้ความสามารถในการเกิดแรงยึดเหนี่ยวหรือพันธะในการยึดติดระหว่างยางกับโลหะอะลูมิเนียมและทองแดงได้ง่าย จึงส่งผลให้การติดประสานมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับยางที่ปราศจากสารเสริมการยึดติด อีกทั้งยังให้ค่าสูงกว่าการใช้สารเสริมการยึดติด Zinc dimethacrylate และ Cobalt stearate อีกด้วย ส่วนสารเสริมการยึดติด Cobalt stearate สามารถเกิดพันธะในการยึดติดกับโลหะเหล็กได้ง่ายกว่าโลหะชนิดอื่นๆ จึงส่งผลให้ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะเหล็กมีค่าสูงกว่าโลหะอะลูมิเนียม และทองแดงอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่การวัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าสารเสริมการยึดติดทั้ง 3 ชนิด มีผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะทุกชนิด เมื่อเปรียบเทียบกับยางที่ปราศจากสารเสริมการยึดติด โดยสารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate ให้ความแข็งแรงในการยึดติดกับโลหะทั้ง 3 ชนิด สูงสุด อีกทั้งยังสูงกว่าสารเสริมการยึดติด Zinc dimethacrylate และ Cobalt stearate อย่างชัดเจน

สำหรับการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมพอนด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (b) พบว่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะทั้ง 3 ชนิด มีแนวโน้มเช่นเดียวกับการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่ปราศจากสารรองพื้น ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (a) ทั้งในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน และเปอร์ออกไซด์ กล่าวคือ ในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน สารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate ให้ความแข็งแรงในการติดประสานกับโลหะอะลูมิเนียมและทองแดงสูงที่สุด ในขณะที่สารเสริมการยึดติด Cobalt

stearate ให้ความแข็งแรงในการติดประสานสูงสุดเมื่อยึดติดกับโลหะเหล็ก สำหรับในระบบการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าสารเสริมการยึดติดทั้ง 3 ชนิด มีผลในการเพิ่มความแข็งแรงของการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ โดยสารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate มีผลทำให้โลหะเหล็ก อะลูมิเนียม และทองแดงมีความแข็งแรงในการติดประสานสูงสุดอีกด้วย เมื่อเปรียบเทียบกับ การติดประสานของสารเสริมการยึดติดอีก 2 ชนิด

สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่รองพื้นด้วย Chemlok 205A ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (c) พบว่าในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน สารเสริมการยึดติดทั้ง 3 ชนิด มีผลในการเพิ่มความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างยางกับโลหะทุกชนิด เมื่อเปรียบเทียบกับ การติดประสานของยางที่ปราศจากสารเสริมการยึดติด และยังมีแนวโน้มในการติดประสานที่เป็นแนวทางเดียวกับการติดประสานของโลหะที่ปราศจากสารรองพื้น และโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมปานด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (a) และ (b) ตามลำดับ ในขณะที่การรองพื้นโลหะด้วยสารรองพื้น Chemlok205A มีผลทำให้ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันกับโลหะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะสารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate ที่ให้ความแข็งแรงในการยึดติดกับโลหะอะลูมิเนียม และทองแดงได้สูงสุด ส่วนโลหะเหล็กมีความสามารถในการยึดติดกับยางได้สูงสุดเมื่อใช้สารเสริมการยึดติด Cobalt stearate สำหรับในระบบการวัลคาไนซ์เปอร์ออกไซด์ พบว่าสารเสริมการยึดติดแต่ละชนิดไม่มีผลในการเพิ่มความแข็งแรงของการติดประสานระหว่างยางกับโลหะทั้ง 3 ชนิด ยกเว้น การติดประสานระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติด Cobalt stearate ที่ยังคงให้ค่าความแข็งแรงในการติดประสานสูงสุด และยังเกิดความล้มเหลวในการติดประสานแบบโคฮีซีฟ เช่นเดียวกับการติดประสานของโลหะที่ปราศจากสารรองพื้น และโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมปานด์

2) การติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่เตรียมผิวด้วยวิธีทางกล (พ่นทราย)

ตารางที่ 4.6 ชนิดของสารเสริมการยึดติด ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะชนิดต่างๆ (พ่นทราย) ที่ปราศจากสารรองพื้น

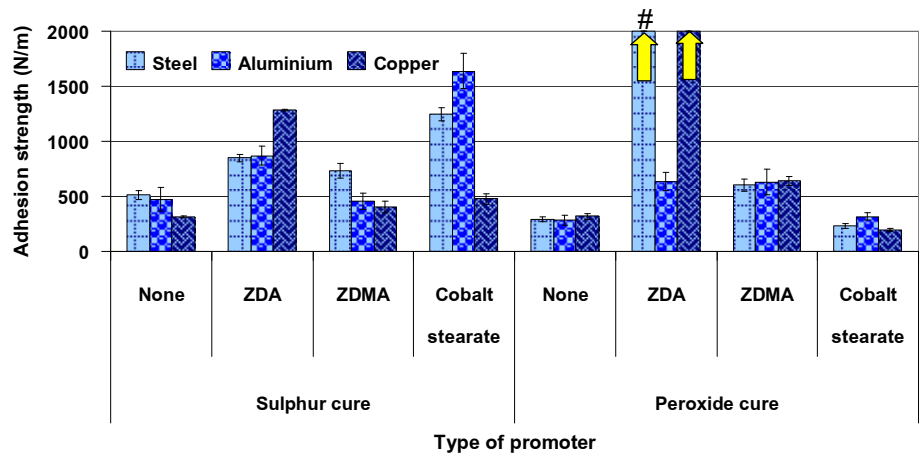
| Vulcanization system | Type of adhesion promoter | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------|-------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | None | 512.53 ± 40.47 | 472.72 ± 109.43 | 314.65 ± 9.22 | | ✓ |
| | Zinc diacrylate | 847.22 ± 35.26 | 865.91 ± 85.80 | 1281.28 ± 7.28 | | ✓ |
| | Zinc dimethacrylate | 729.08 ± 66.09 | 451.78 ± 74.82 | 403.55 ± 54.57 | | ✓ |
| | Cobalt stearate | 1246.60 ± 58.94 | 1637.36 ± 157.85 | 474.59 ± 47.46 | | ✓ |
| | None | 289.25 ± 21.96 | 284.00 ± 45.41 | 319.08 ± 26.93 | | ✓ |
| | Zinc diacrylate | 2530.60 ± 178.73 | 636.06 ± 81.91 | R* | | ✓ |
| Peroxide cure | Zinc dimethacrylate | 602.21 ± 55.92 | 630.43 ± 112.95 | 639.20 ± 39.13 | | ✓ |
| | Cobalt stearate | 232.84 ± 20.82 | 316.63 ± 31.07 | 195.39 ± 14.42 | | ✓ |

ตารางที่ 4.7 ชนิดของสารเสริมการยึดติด ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะชนิดต่างๆ (พ่นทราย) ที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมพอนด์

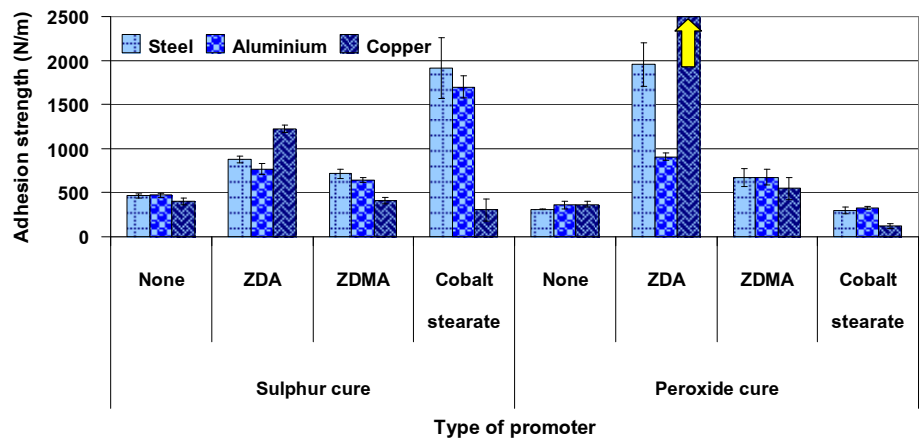
| Vulcanization system | Type of adhesion promoter | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------|--------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | None | 461.80 ± 22.66 | 471.94 ± 19.63 | 399.85 ± 38.92 | | ✓ |
| | Zinc diacrylate | 878.40 ± 35.52 | 769.56 ± 61.98 | 1225.48 ± 40.18 | | ✓ |
| | Zinc dimethacrylate | 716.14 ± 51.47 | 643.72 ± 26.27 | 411.11 ± 41.14 | | ✓ |
| | Cobalt stearate | 1912.36 ± 342.16 | 1699.93 ± 124.09 | 305.05 ± 128.41 | | ✓ |
| | None | 309.55 ± 6.16 | 359.64 ± 43.74 | 368.32 ± 29.31 | | ✓ |
| | Zinc diacrylate | 1956.65 ± 245.50 | 909.05 ± 40.78 | R* | | ✓ |
| Peroxide cure | Zinc dimethacrylate | 672.13 ± 98.77 | 675.12 ± 86.38 | 549.35 ± 126.19 | | ✓ |
| | Cobalt stearate | 299.53 ± 33.85 | 324.53 ± 16.27 | 122.22 ± 26.45 | | ✓ |

ตารางที่ 4.8 ชนิดของสารเสริมการยึดติด ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับ โลหะชนิดต่างๆ (พ่นทราย) ที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นทางการค้า

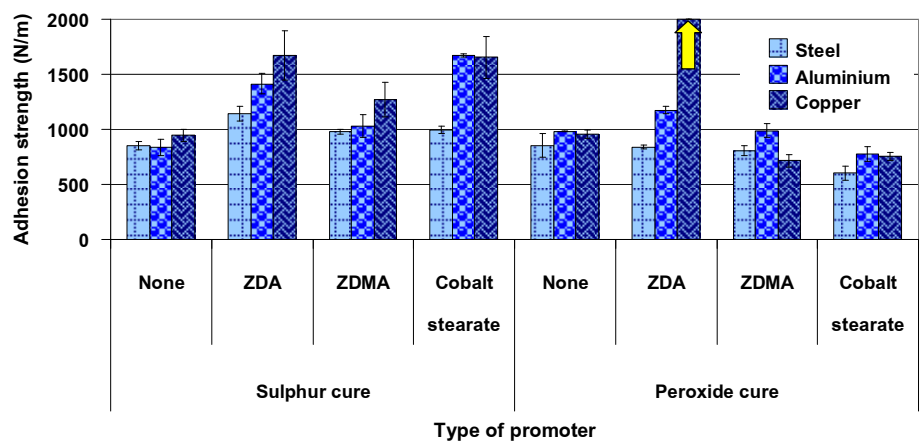
| Vulcanization system | Type of adhesion promoter | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------|---------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | None | 848.28 ± 38.57 | 836.11 ± 76.67 | 944.64 ± 54.47 | | ✓ |
| | Zinc diacrylate | 1142.35 ± 69.63 | 1410.94 ± 93.61 | 1674.74 ± 223.79 | | ✓ |
| | Zinc dimethacrylate | 978.19 ± 21.10 | 1032.38 ± 104.40 | 1269.13 ± 158.75 | | ✓ |
| | Cobalt stearate | 993.46 ± 33.45 | 1670.86 ± 13.51 | 1654.15 ± 188.56 | | ✓ |
| | None | 852.34 ± 107.46 | 979.41 ± 4.81 | 955.55 ± 39.46 | | ✓ |
| | Zinc diacrylate | 837.36 ± 18.83 | 1174.01 ± 35.84 | R* | | ✓ |
| Peroxide cure | Zinc dimethacrylate | 808.09 ± 44.79 | 987.98 ± 62.49 | 714.86 ± 55.85 | | ✓ |
| | Cobalt stearate | 603.91 ± 63.11 | 775.69 ± 65.28 | 753.71 ± 39.07 | | ✓ |



(a) Without primer (# : adhesive failure)



(b) With primer compound solution



(c) With primer chemlok205A

รูปที่ 4.6 ชนิดของสารเสริมการยึดติด ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะชนิดต่างๆ (พันทราย)

ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางที่ปราศจากสารเสริมการยึดติด และยางที่ใส่สารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate (ZDA), Zinc dimethacrylate (ZDMA) และ Cobalt stearate โดยวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันและเปอร์ออกไซด์ กับโลหะที่เตรียมผิวด้วยวิธีทางกล (ฟันทราย) และรองพื้นโลหะด้วยสารรองพื้นที่เตรียมขึ้นจากยางคอมพอนด์ และสารรองพื้น Chemlok 205A เพื่อเปรียบเทียบกับโลหะที่ปราศจากสารรองพื้น ดังแสดงในตารางที่ 4.6–4.8 และรูปที่ 4.6 พบว่าความล้มเหลวในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะทั้ง 3 ชนิด มีลักษณะเป็นแบบแอตชีฟทุกชนิดของสารเสริมการยึดติด และทุกชนิดของสารรองพื้น ทั้งในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถันและเปอร์ออกไซด์ ยกเว้น การติดประสานระหว่างยางที่ใส่สารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate ในระบบเปอร์ออกไซด์กับโลหะทองแดง ที่เกิดความล้มเหลวในการติดประสานแบบโคฮีซีฟ เมื่อพิจารณาความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่ปราศจากสารรองพื้น ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (a) พบว่าในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน สารเสริมการยึดติดทั้ง 3 ชนิด มีผลในการเพิ่มความแข็งแรงของการติดประสานระหว่างยางกับโลหะเหล็ก อะลูมิเนียม และทองแดง ให้มีค่าสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับการติดประสานของยางที่ปราศจากสารเสริมการยึดติด โดยเฉพาะสารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate ที่ให้ความแข็งแรงในการติดประสานกับโลหะทองแดงสูงที่สุด ในขณะที่สารเสริมการยึดติด Cobalt stearate มีผลทำให้ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะเหล็กและอะลูมิเนียมมีค่าสูงสุด สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานของยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าสารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate และ Zinc dimethacrylate มีผลต่อความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะทั้ง 3 ชนิด โดยเฉพาะสารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate ที่พบว่าเกิดแรงยึดเหนี่ยวหรือพันธะในการยึดติดกับโลหะทองแดงได้ง่ายที่สุด จึงส่งผลให้ความแข็งแรงในการติดประสานมีค่าสูงสุดเมื่อนำมายึดติดกับโลหะทองแดง

การติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมพอนด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (b) พบว่าความแข็งแรงของการติดประสานระหว่างยางกับโลหะมีแนวโน้มในการติดประสานที่เป็นแนวทางเดียวกันกับการติดประสานของโลหะที่ปราศจากสารรองพื้น ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (a) กล่าวคือสารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate สามารถเกิดพันธะการยึดติดกับโลหะทองแดงได้ง่าย จึงส่งผลทำให้ยางมีความแข็งแรงในการติดประสานกับโลหะทองแดงสูงที่สุด ในขณะที่สารเสริมการยึดติด Cobalt stearate มีความแข็งแรงในการติดประสานสูงสุด เมื่อยึดติดกับโลหะเหล็ก และอะลูมิเนียม อีกทั้งยังมีความแข็งแรงในการติดประสานที่สูงกว่าการใช้สารเสริมการยึดติดชนิดอื่นๆ อีกด้วย สำหรับในระบบการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าสารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate และ Zinc dimethacrylate มีผลในการเพิ่มความแข็งแรงของการติดประสานระหว่างยางกับโลหะทุกชนิด โดยที่ความแข็งแรงในการติดประสานของยางใส่สารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate มีค่าสูงกว่าการใช้ Zinc dimethacrylate อย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อนำมายึดติดกับโลหะเหล็ก และทองแดง

สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นทางการค้า ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (c) พบว่าในระบบการวัลคาไนซ์แบบก้ำมะกั้น ความแข็งแรงในการติดประสานของยางใส่สารเสริมการยึดติดมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ทุกชนิดของสารเสริมการยึดติด และทุกชนิดของโลหะ เมื่อเปรียบเทียบกับ การติดประสานของยางที่ปราศจากสารเสริมการยึดติด โดยสารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate มีความแข็งแรงในการติดประสานกับโลหะทองแดงได้สูงสุด ในขณะที่สารเสริมการยึดติด Cobalt stearate ให้ค่าการติดประสานสูงสุดเมื่อยึดติดกับโลหะเหล็กและอะลูมิเนียม ซึ่งความแข็งแรงในการติดประสานนี้มีแนวโน้มเช่นเดียวกับการติดประสานของโลหะที่ปราศจากสารรองพื้น และโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมพอนด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (a) และ (b) ตามลำดับ อีกทั้งสารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate ยังให้ความแข็งแรงในการติดประสานกับโลหะเหล็กที่ใกล้เคียงกับสารเสริมการยึดติด Cobalt stearate อีกด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าสารเสริมการยึดติด Cobalt stearate ยังให้ความแข็งแรงในการติดประสานกับโลหะทองแดงสูงใกล้เคียงกับการติดประสานของโลหะอะลูมิเนียม สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานของยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ กลับพบว่าสารเสริมการยึดติดทั้ง 3 ชนิด ไม่มีผลต่อความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะเหล็ก ในขณะที่สารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate และ Zinc dimethacrylate มีแนวโน้มในการเพิ่มความแข็งแรงของการติดประสานเมื่อนำมายึดติดกับโลหะอะลูมิเนียม นอกจากนี้ยังพบว่าสารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate ยังให้ความแข็งแรงในการติดประสานกับโลหะทองแดงสูงสุดอย่างเห็นได้ชัดอีกด้วย

3) การติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่เตรียมผิวด้วยวิธีทางเคมี (กัดผิวด้วยกรด)

ตารางที่ 4.9 ชนิดของสารเสริมการยึดติด ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะชนิดต่างๆ (กัดผิวด้วยกรด) ที่ปราศจากสารรองพื้น

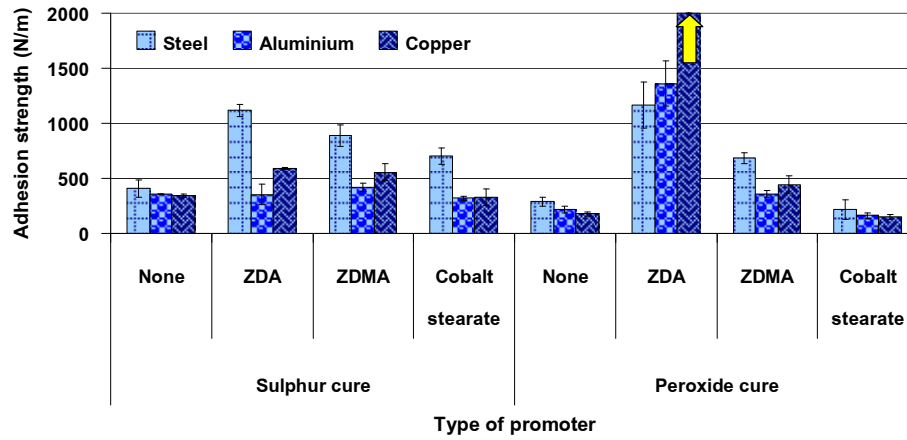
| Vulcanization system | Type of adhesion promoter | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------|-------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | None | 408.90 ± 78.18 | 357.96 ± 3.28 | 343.03 ± 15.80 | | ✓ |
| | Zinc diacrylate | 1116.21 ± 58.54 | 352.51 ± 93.89 | 591.59 ± 7.84 | | ✓ |
| | Zinc dimethacrylate | 888.63 ± 97.93 | 416.62 ± 36.83 | 555.82 ± 75.16 | | ✓ |
| | Cobalt stearate | 698.89 ± 75.56 | 317.67 ± 17.04 | 328.67 ± 75.87 | | ✓ |
| | None | 288.19 ± 38.76 | 214.74 ± 27.91 | 175.49 ± 21.82 | | ✓ |
| | Zinc diacrylate | 1164.22 ± 208.02 | 1360.99 ± 204.85 | R* | | ✓ |
| Peroxide cure | Zinc dimethacrylate | 683.46 ± 47.21 | 356.18 ± 30.82 | 443.45 ± 79.81 | | ✓ |
| | Cobalt stearate | 216.98 ± 92.14 | 160.59 ± 24.13 | 150.56 ± 23.60 | | ✓ |

ตารางที่ 4.10 ชนิดของสารเสริมการยึดติด ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะชนิดต่างๆ (กัดผิวด้วยกรด) ที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมปอนด์

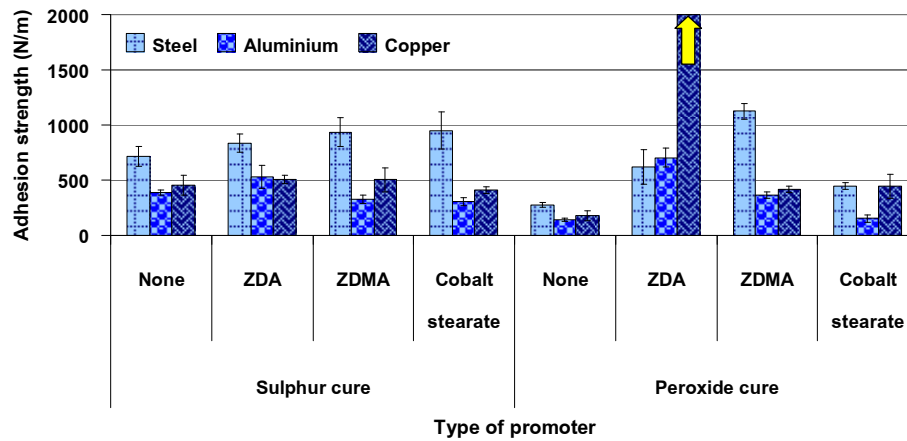
| Vulcanization system | Type of adhesion promoter | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------|--------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | None | 714.49 ± 90.91 | 385.53 ± 22.21 | 455.39 ± 92.59 | | ✓ |
| | Zinc diacrylate | 837.80 ± 83.45 | 526.74 ± 104.81 | 505.39 ± 36.38 | | ✓ |
| | Zinc dimethacrylate | 935.56 ± 130.20 | 329.56 ± 35.45 | 504.57 ± 110.78 | | ✓ |
| | Cobalt stearate | 950.73 ± 168.04 | 306.96 ± 39.35 | 411.01 ± 29.84 | | ✓ |
| | None | 277.09 ± 23.06 | 141.71 ± 11.47 | 182.15 ± 44.64 | | ✓ |
| | Zinc diacrylate | 617.24 ± 157.88 | 702.46 ± 85.55 | R* | | ✓ |
| Peroxide cure | Zinc dimethacrylate | 1124.42 ± 73.08 | 365.11 ± 30.58 | 417.58 ± 26.48 | | ✓ |
| | Cobalt stearate | 446.47 ± 30.49 | 155.14 ± 34.75 | 446.06 ± 109.17 | | ✓ |

ตารางที่ 4.11 ชนิดของสารเสริมการยึดติด ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยาง กับโลหะชนิดต่างๆ (กััดผิวด้วยกรด) ที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นทางการค้า

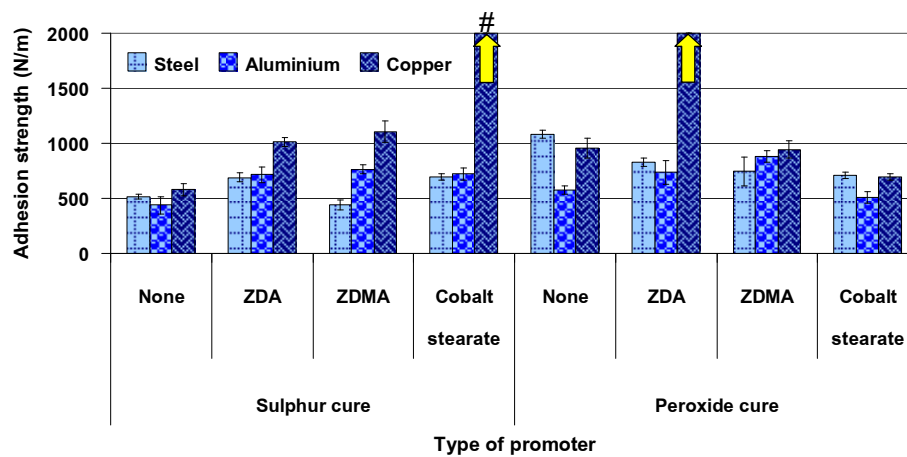
| Vulcanization system | Type of adhesion promoter | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------|---------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | None | 515.07 ± 23.13 | 437.99 ± 76.82 | 578.98 ± 53.26 | | ✓ |
| | Zinc diacrylate | 687.20 ± 41.62 | 713.77 ± 71.44 | 1012.57 ± 42.07 | | ✓ |
| | Zinc dimethacrylate | 439.49 ± 46.09 | 761.94 ± 40.93 | 1103.28 ± 97.92 | | ✓ |
| | Cobalt stearate | 692.11 ± 31.24 | 720.28 ± 54.80 | 2897.37 ± 319.38 | | ✓ |
| | None | 1082.09 ± 39.80 | 576.36 ± 38.40 | 952.27 ± 89.21 | | ✓ |
| | Zinc diacrylate | 825.88 ± 36.38 | 737.12 ± 108.14 | R* | | ✓ |
| Peroxide cure | Zinc dimethacrylate | 744.99 ± 131.28 | 880.21 ± 54.05 | 941.75 ± 79.06 | | ✓ |
| | Cobalt stearate | 708.48 ± 31.16 | 508.09 ± 50.91 | 693.68 ± 28.99 | | ✓ |



(a) Without primer



(b) With primer compound solution



(c) With primer chemlok205A (# : adhesive failure)

รูปที่ 4.7 ชนิดของสารเสริมการยึดติด ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะชนิดต่างๆ (กัดผิวด้วยกรด)

ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางที่ปราศจากสารเสริมการยึดติด และยางที่ใส่สารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate (ZDA), Zinc dimethacrylate (ZDMA) และ Cobalt stearate โดยวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันและเปอร์ออกไซด์ กับโลหะที่เตรียมผิวด้วยวิธีทางเคมี (กัดผิวด้วยกรด) และมีการรองพื้นโลหะด้วยสารรองพื้นที่เตรียมขึ้นจากยางคอมพอนด์และสารรองพื้น Chemlok 205A เพื่อเปรียบเทียบกับโลหะที่ปราศจากสารรองพื้น ดังแสดงในตารางที่ 4.9–4.11 และรูปที่ 4.7 พบว่าความล้มเหลวในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะเหล็ก อะลูมิเนียม และทองแดง มีลักษณะเป็นแบบแอดฮีซีฟทุกชนิดของสารเสริมการยึดติด และทุกชนิดของสารรองพื้น ทั้งในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถันและเปอร์ออกไซด์ ยกเว้นการติดประสานระหว่างยางที่ใส่สารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate ในระบบเปอร์ออกไซด์กับโลหะทองแดง ที่พบว่าความล้มเหลวในการติดประสานมีลักษณะเป็นแบบโคฮีซีฟ เมื่อพิจารณาความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะปราศจากสารรองพื้น ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (a) พบว่าในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน สารเสริมการยึดติดทั้ง 3 ชนิด มีแนวโน้มในการเพิ่มความแข็งแรงของการติดประสานระหว่างยางกับโลหะเหล็กอย่างเห็นได้ชัด โดยสารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate ให้ความแข็งแรงในการติดประสานสูงสุดกับโลหะเหล็ก เมื่อเปรียบเทียบกับยางที่ปราศจากสารเสริมการยึดติด และการติดประสานของยางกับโลหะชนิดอื่นๆ ในขณะที่การวัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าสารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate มีผลทำให้ความแข็งแรงของการติดประสานระหว่างยางกับโลหะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะการติดประสานกับโลหะทองแดง

การติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมพอนด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (b) พบว่าในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน สารเสริมการยึดติดทั้ง 3 ชนิด มีผลทำให้ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะทุกชนิด มีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะการติดประสานกับโลหะเหล็ก เช่นเดียวกับการติดประสานของโลหะที่ปราศจากสารรองพื้น ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (a) โดยที่สารเสริมการยึดติด Cobalt stearate มีความแข็งแรงในการติดประสานสูงสุดกับโลหะดังกล่าว สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานของยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าสารเสริมการยึดติดทั้ง 3 ชนิด มีผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะเหล็ก อะลูมิเนียม และทองแดง โดยสารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate มีความสามารถในการติดประสานกับโลหะอะลูมิเนียมและทองแดง สูงกว่าสารเสริมการยึดติดชนิดอื่นๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อติดประสานกับโลหะทองแดง

สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้น Chemlok 205A ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (c) พบว่าความแข็งแรงในการติดประสานของยางใส่สารเสริมการยึดติดในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถันมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ทุกชนิดของสารเสริมการยึดติด และทุกชนิดของโลหะ นอกจากนี้ยังพบว่ายางที่ใส่สารเสริมการยึดติดทั้ง 3 ชนิด

รวมทั้งยางที่ปราศจากสารเสริมการยึดติด สามารถเกิดพันธะในการยึดติดกับโลหะทองแดงได้สูงสุด โดยสารเสริมการยึดติดที่มีความแข็งแรงในการติดประสานกับโลหะทองแดงสูงสุด ได้แก่ Cobalt stearate แต่สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานของยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าสารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate มีผลทำให้ความแข็งแรงในการติดประสานกับโลหะทองแดงมีค่าสูงสุดอย่างเห็นได้ชัด และยังเกิดความล้มเหลวในการติดประสานเป็นแบบโคฮีซีฟอีกด้วย ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าพันธะในการยึดติดระหว่างยางกับโลหะมีความแข็งแรงสูงมาก จนทำให้เกิดความล้มเหลวในการยึดติดขึ้นภายในเนื้อยางขณะทำการทดสอบแบบปอก

4.2.2.2 ผลของชนิดโลหะต่อความสามารถในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาความสามารถในการติดประสานของโลหะ 3 ชนิด ได้แก่ เหล็ก (steel) อะลูมิเนียม (aluminium) และทองแดง (copper) โดยนำแผ่นโลหะที่มีความหนา 1.6 ± 0.1 มิลลิเมตร กว้าง 25 ± 0.05 มิลลิเมตร และยาว 60 มิลลิเมตร มาทำการเตรียมผิวด้วยวิธีทางกลและทางเคมี ตามหัวข้อ 3.3.1.4 จากนั้นนำยางคอมพอนด์ใส่สารเสริมการยึดติดที่เตรียมได้จากหัวข้อ 3.3.1.1 ซึ่งแสดงปริมาณยางและสารเคมีดังตารางที่ 3.2 และ 3.3 มายึดติดกับแผ่นโลหะ โดยขั้นตอนในการเตรียมขึ้นทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.2 แล้วทำการวัลคาไนซ์ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเบ้า ที่อุณหภูมิ 150°C (วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถัน) และอุณหภูมิ 160°C (วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์) หลังจากนั้นทดสอบความสามารถในการติดประสานแบบปอกด้วยมุม 90 องศา ตามหัวข้อ 3.3.4.2 ซึ่งผลของชนิดโลหะต่อความสามารถในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่ปราศจากสารรองพื้น แสดงดังตารางที่ 4.12–4.14 และรูปที่ 4.8 การติดประสานกับโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นที่เตรียมขึ้นจากยางคอมพอนด์ แสดงดังตารางที่ 4.15–4.17 และรูปที่ 4.9 และการติดประสานกับโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นทางการค้า (Chemlok 205A) แสดงดังตารางที่ 4.18–4.20 และรูปที่ 4.10 ตามลำดับดังนี้

1) การติดประสานระหว่างยางกับโลหะ โดยปราศจากสารรองพื้น (Without primer)

ตารางที่ 4.12 ชนิดของโลหะ กับการใช้สารเสริมการยึดติดชนิดต่างๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ (ขัดด้วยกระดาษทราย) ที่ปราศจากสารรองพื้น

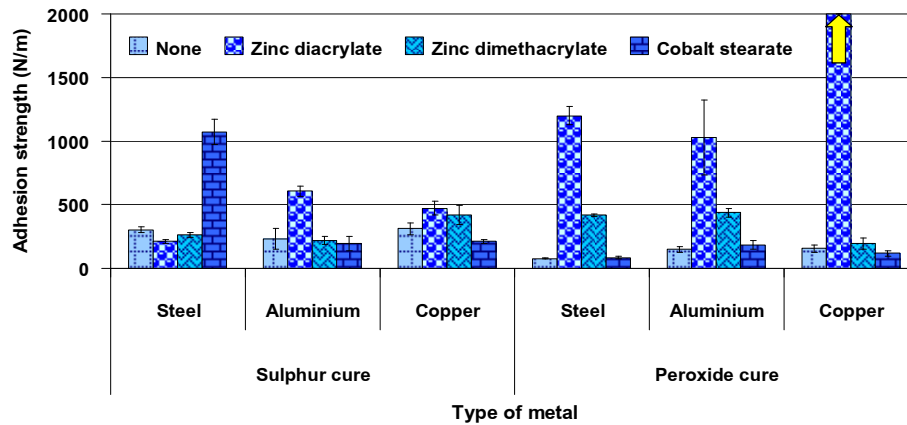
| Vulcanization system | Type of metal | Adhesion strength (N/m) | | | | Type of break | |
|----------------------|---------------|-------------------------|---------------------|---------------------|--------------------|---------------|---|
| | | None | Zinc diacrylate | Zinc dimethacrylate | Cobalt stearate | R* | M |
| Sulphur cure | Steel | 303.14 ± 22.29 | 212.14 ± 15.18 | 263.05 ± 16.40 | 1071.72 ± 99.30 | | ✓ |
| | Aluminium | 232.15 ± 83.41 | 607.16 ± 40.80 | 218.73 ± 31.95 | 195.45 ± 58.35 | | ✓ |
| | Copper | 311.99 ± 46.31 | 471.35 ± 52.44 | 420.28 ± 75.17 | 211.86 ± 14.50 | | ✓ |
| Peroxide cure | Steel | 77.34 ± 2.86 | 1199.38 ± 73.61 | 419.19 ± 10.13 | 84.14 ± 10.21 | | ✓ |
| | Aluminium | 149.43 ± 22.58 | 1030.79 ± 294.47 | 437.51 ± 34.52 | 183.59 ± 33.60 | | ✓ |
| | Copper | 154.32 ± 29.17 | R* | 194.13 ± 46.19 | 117.32 ± 23.53 | | ✓ |

ตารางที่ 4.13 ชนิดของโลหะ กับการใช้สารเสริมการยึดติดชนิดต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ (พ่นทราย) ที่ปราศจากสารรองพื้น

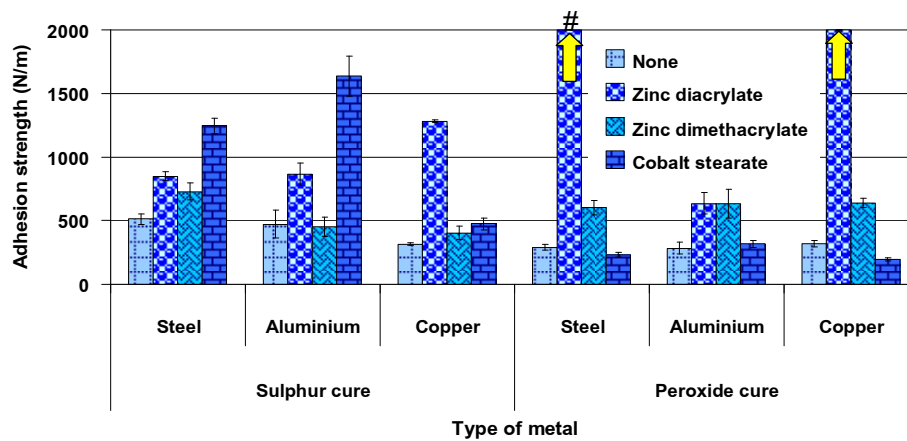
| Vulcanization system | Type of metal | Adhesion strength (N/m) | | | | Type of break | |
|----------------------|---------------|-------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------|---|
| | | None | Zinc diacrylate | Zinc dimethacrylate | Cobalt stearate | R* | M |
| Sulphur cure | Steel | 512.53 ± 40.47 | 847.22 ± 35.26 | 729.08 ± 66.09 | 1246.60 ± 58.94 | | ✓ |
| | Aluminium | 472.72 ± 109.43 | 865.91 ± 85.80 | 451.78 ± 74.82 | 1637.36 ± 157.85 | | ✓ |
| | Copper | 314.65 ± 9.22 | 1281.28 ± 7.28 | 403.55 ± 54.57 | 474.59 ± 47.46 | | ✓ |
| Peroxide cure | Steel | 289.25 ± 21.96 | 2530.60 ± 178.73 | 602.21 ± 55.92 | 232.84 ± 20.82 | | ✓ |
| | Aluminium | 284.00 ± 45.41 | 636.06 ± 81.91 | 630.43 ± 112.95 | 316.63 ± 31.07 | | ✓ |
| | Copper | 319.08 ± 26.93 | R* | 639.20 ± 39.13 | 195.39 ± 14.42 | | ✓ |

ตารางที่ 4.14 ชนิดของโลหะ กับการใช้สารเสริมการยึดติดชนิดต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ (กัดผิวด้วยกรด) ที่ปราศจากสารรองพื้น

| Vulcanization system | Type of metal | Adhesion strength (N/m) | | | | Type of break | |
|----------------------|---------------|-------------------------|---------------------|---------------------|-------------------|---------------|---|
| | | None | Zinc diacrylate | Zinc dimethacrylate | Cobalt stearate | R* | M |
| Sulphur cure | Steel | 408.90 ± 78.18 | 1116.21 ± 58.54 | 888.63 ± 97.93 | 698.89 ± 75.56 | | ✓ |
| | Aluminium | 357.96 ± 3.28 | 352.51 ± 93.89 | 416.62 ± 36.83 | 317.67 ± 17.04 | | ✓ |
| | Copper | 343.03 ± 15.80 | 591.59 ± 7.84 | 555.82 ± 75.16 | 328.67 ± 75.87 | | ✓ |
| Peroxide cure | Steel | 288.19 ± 38.76 | 1164.22 ± 208.02 | 683.46 ± 47.21 | 216.98 ± 92.14 | | ✓ |
| | Aluminium | 214.74 ± 27.91 | 1360.99 ± 204.85 | 356.18 ± 30.82 | 160.59 ± 24.13 | | ✓ |
| | Copper | 175.49 ± 21.82 | R* | 443.45 ± 79.81 | 150.56 ± 23.60 | | ✓ |

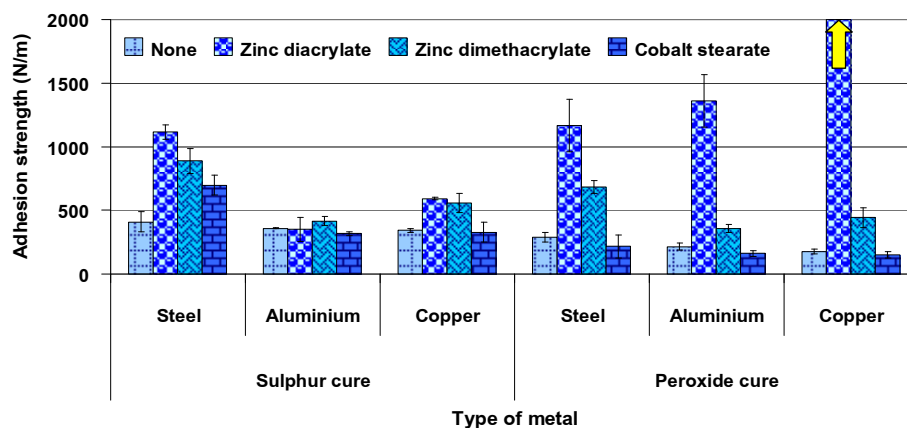


(a) Mechanical treatment (sandpaper blasting)



(b) Mechanical treatment (sand blasting)

หมายเหตุ # : Adhesive failure



(c) Chemical treatment (acid etching)

รูปที่ 4.8 ชนิดของโลหะ กับการใช้สารเสริมการยึดติดชนิดต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะ (ปราศจากสารรองพื้น)

ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างโลหะเหล็ก อะลูมิเนียม และทองแดง ที่เตรียมผิวด้วยวิธีทางกล (การขัดด้วยกระดาษทรายและการพ่นทราย) และวิธีทางเคมี (การกัดผิวด้วยกรด) โดยปราศจากสารรองพื้น กับยางที่ใส่สารเสริมการยึดติดและปราศจากสารเสริมการยึดติด ซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันและเปอร์ออกไซด์ ดังแสดงในตารางที่ 4.12–4.14 และรูปที่ 4.8 พบว่าความล้มเหลวในการติดประสานที่เกิดขึ้นระหว่างยางกับโลหะทั้ง 3 ชนิด มีลักษณะเป็นแบบแอดฮีซีฟทุกชนิดของโลหะทั้งการเตรียมผิวด้วยวิธีทางกล และทางเคมี รวมทั้งทุกชนิดของสารเสริมการยึดติดอีกด้วย ยกเว้น การติดประสานระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate ในระบบเปอร์ออกไซด์กับโลหะทองแดง ที่มีลักษณะของความล้มเหลวเป็นแบบโคฮีซีฟ เมื่อพิจารณาความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่เตรียมผิวโดยการขัดด้วยกระดาษทราย ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (a) พบว่าในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน โลหะเหล็กสามารถเกิดพันธะในการยึดติดกับยางใส่สารเสริมการยึดติด Cobalt stearate ได้สูงสุด ในขณะที่โลหะอะลูมิเนียม และทองแดง รวมทั้งการติดประสานของโลหะทั้ง 3 ชนิด ในระบบการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าการติดประสานของโลหะทองแดงกับยางที่ใส่สารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate มีความแข็งแรงในการติดประสานสูงสุดอย่างชัดเจน อาจจะเป็นเพราะโลหะทองแดงสามารถเกิดพันธะในการยึดติดกับสารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate ในช่วงของการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันได้ง่ายกว่าสารเสริมการยึดติดชนิดอื่นๆ

สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่เตรียมผิวโดยวิธี การพ่นทราย ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (b) พบว่าในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน โลหะเหล็ก และอะลูมิเนียม สามารถเกิดพันธะในการยึดติดทางกลกับยางใส่สารเสริมการยึดติด Cobalt stearate ได้ง่าย ซึ่งแตกต่างกับการติดประสานของโลหะทองแดง ที่สามารถเกิดการยึดติดสูงสุดเมื่อใช้สารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate สำหรับในระบบการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าโลหะทั้ง 3 ชนิด มีความแข็งแรงในการติดประสานกับยางใส่สารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate ได้สูงกว่าสารเสริมการยึดติดชนิดอื่นๆ โดยที่โลหะทองแดงมีความแข็งแรงในการติดประสานกับสารเสริมการยึดติดชนิดนี้ได้สูงสุด เช่นเดียวกับการติดประสานกับโลหะที่เตรียมผิวโดยวิธีการขัดด้วยกระดาษทรายดังแสดงในรูปที่ 4.8 (a)

สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่เตรียมผิวโดยวิธี การกัดผิวด้วยกรด ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (c) พบว่าความแข็งแรงในการติดประสานของโลหะทั้ง 3 ชนิด มีแนวโน้มที่เป็นแนวทางเดียวกัน กล่าวคือ สามารถเกิดการติดประสานกับยางใส่สารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate ได้สูงสุด ทั้งในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน และเปอร์ออกไซด์ โดยในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน โลหะเหล็กมีความสามารถในการติดประสานกับยางได้สูงสุด แต่ในระบบการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์กลับพบว่าโลหะที่มีความแข็งแรงในการติดประสานสูงสุด ได้แก่ โลหะทองแดง เช่นเดียวกับการติดประสานของโลหะที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีทางกลทั้ง 2 วิธี ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (a) และ (b) ตามลำดับ

2) การติดประสานระหว่างยางกับโลหะ ที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมพอนด์ (Primer compound solution)

ตารางที่ 4.15 ชนิดของโลหะ กับการใช้สารเสริมการยึดติดชนิดต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ (ขัดด้วยกระดาษทราย) ที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมพอนด์

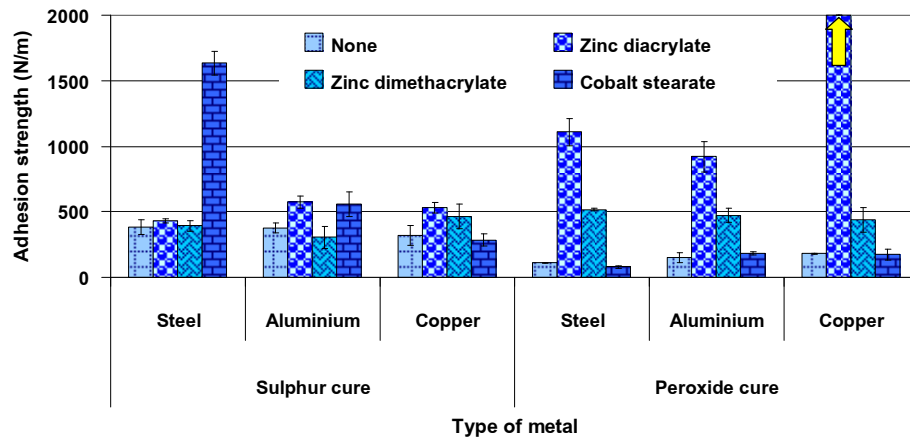
| Vulcanization system | Type of metal | Adhesion strength (N/m) | | | | Type of break | |
|----------------------|---------------|-------------------------|-----------------|---------------------|-----------------|---------------|---|
| | | None | Zinc diacrylate | Zinc dimethacrylate | Cobalt stearate | R* | M |
| Sulphur cure | Steel | 382.11 | 430.67 | 393.16 | 1634.31 | ✓ | |
| | | ± 54.80 | ± 14.98 | ± 39.50 | ± 89.45 | | |
| | Aluminium | 376.09 | 573.87 | 305.15 | 556.56 | ✓ | |
| | | ± 38.49 | ± 46.09 | ± 83.72 | ± 92.36 | | |
| | Copper | 321.16 | 530.47 | 464.09 | 284.15 | ✓ | |
| | | ± 75.32 | ± 40.29 | ± 95.03 | ± 47.69 | | |
| Peroxide cure | Steel | 110.84 | 1108.13 | 515.65 | 79.04 | ✓ | |
| | | ± 4.46 | ± 104.31 | ± 10.90 | ± 7.21 | | |
| | Aluminium | 151.58 | 918.61 | 470.85 | 182.52 | ✓ | |
| | | ± 37.48 | ± 115.56 | ± 53.79 | ± 10.92 | | |
| | Copper | 179.02 | R* | 436.01 | 174.23 | ✓ | |
| | | ± 5.20 | | ± 94.01 | ± 39.45 | | |

ตารางที่ 4.16 ชนิดของโลหะ กับการใช้สารเสริมการยึดติดชนิดต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ (พ่นทราย) ที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมปอนด์

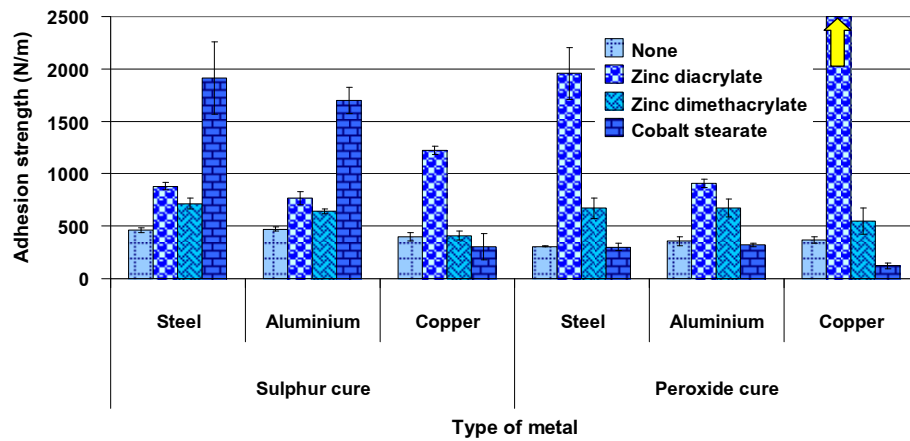
| Vulcanization system | Type of metal | Adhesion strength (N/m) | | | | Type of break | |
|----------------------|---------------|-------------------------|-----------------|---------------------|-----------------|---------------|---|
| | | None | Zinc diacrylate | Zinc dimethacrylate | Cobalt stearate | R* | M |
| Sulphur cure | Steel | 461.80 | 878.40 | 716.14 | 1912.36 | | ✓ |
| | | ± 22.66 | ± 35.52 | ± 51.47 | ± 342.16 | | |
| | Aluminium | 471.94 | 769.56 | 643.72 | 1699.93 | | ✓ |
| | | ± 19.63 | ± 61.98 | ± 26.27 | ± 124.09 | | |
| | Copper | 399.85 | 1225.48 | 411.11 | 305.05 | | ✓ |
| | | ± 38.92 | ± 40.18 | ± 41.14 | ± 128.41 | | |
| Peroxide cure | Steel | 309.55 | 1956.65 | 672.13 | 299.53 | | ✓ |
| | | ± 6.16 | ± 245.50 | ± 98.77 | ± 33.85 | | |
| | Aluminium | 359.64 | 909.05 | 675.12 | 324.53 | | ✓ |
| | | ± 43.74 | ± 40.78 | ± 86.38 | ± 16.27 | | |
| | Copper | 368.32 | R* | 549.35 | 122.22 | | ✓ |
| | | ± 29.31 | | ± 126.19 | ± 26.45 | | |

ตารางที่ 4.17 ชนิดของโลหะ กับการใช้สารเสริมการยึดติดชนิดต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ (กัดผิวด้วยกรด) ที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมพอนด์

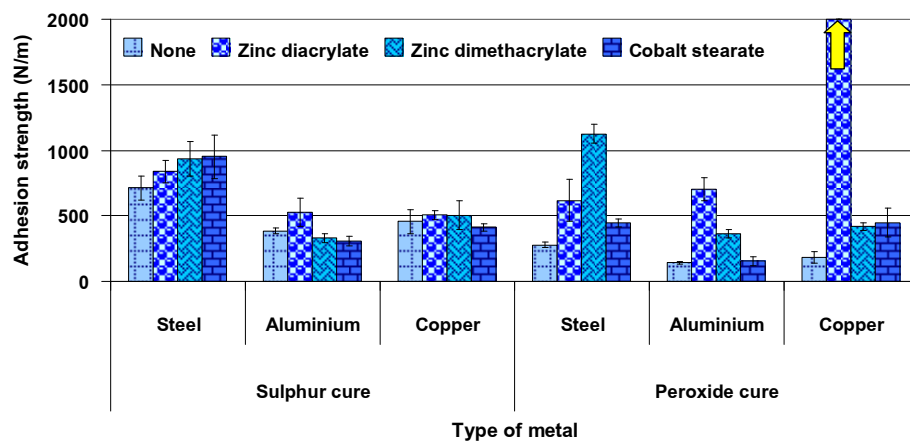
| Vulcanization system | Type of metal | Adhesion strength (N/m) | | | | Type of break | |
|----------------------|---------------|-------------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------|---|
| | | None | Zinc diacrylate | Zinc dimethacrylate | Cobalt stearate | R* | M |
| Sulphur cure | Steel | 714.49 ± 90.91 | 837.80 ± 83.45 | 935.56 ± 130.20 | 950.73 ± 168.04 | | ✓ |
| | Aluminium | 385.53 ± 22.21 | 526.74 ± 104.81 | 329.56 ± 35.45 | 306.96 ± 39.35 | | ✓ |
| | Copper | 455.39 ± 92.59 | 505.39 ± 36.38 | 504.57 ± 110.78 | 411.01 ± 29.84 | | ✓ |
| Peroxide cure | Steel | 277.09 ± 23.06 | 617.24 ± 157.88 | 1124.42 ± 73.08 | 446.47 ± 30.49 | | ✓ |
| | Aluminium | 141.71 ± 11.47 | 702.46 ± 85.55 | 365.11 ± 30.58 | 155.14 ± 34.75 | | ✓ |
| | Copper | 182.15 ± 44.64 | R* | 417.58 ± 26.48 | 446.06 ± 109.17 | | ✓ |



(a) Mechanical treatment (sandpaper blasting)



(b) Mechanical treatment (sand blasting)



(c) Chemical treatment (acid etching)

รูปที่ 4.9 ชนิดของโลหะ กับการใช้สารเสริมการยึดติดชนิดต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะ (รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมพอนด์)

ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะทั้ง 3 ชนิด ที่เตรียมผิวโดยวิธีการขัดด้วยกระดาษทราย การพ่นทรายและการกัดด้วยกรด โดยมีการรองพื้นโลหะด้วยสารรองพื้นที่เตรียมขึ้นจากยางคอมพอนด์ พร้อมทั้งใช้ยางทั้งที่ใส่สารเสริมการยึดติด และยางที่ปราศจากสารเสริมการยึดติด ซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันและเปอร์ออกไซด์ ดังแสดงในตารางที่ 4.15–4.17 และรูปที่ 4.9 พบว่าความล้มเหลวในการติดประสานระหว่างยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันและเปอร์ออกไซด์ กับโลหะเหล็ก อะลูมิเนียม และทองแดง มีลักษณะเป็นแบบแอดฮีซีฟทุกชนิดของโลหะทั้งการเตรียมผิวด้วยวิธีทางกล และทางเคมี รวมทั้งทุกชนิดของสารเสริมการยึดติดอีกด้วย ยกเว้น การติดประสานระหว่างยางที่ใส่สารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate ในระบบเปอร์ออกไซด์ กับโลหะทองแดง ที่มีลักษณะของความล้มเหลวเป็นแบบโคฮีซีฟ เมื่อพิจารณาความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่เตรียมผิวโดยการขัดด้วยกระดาษทราย ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (a) พบว่าในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน โลหะเหล็กสามารถเกิดพันธะในการยึดติดกับยางใส่สารเสริมการยึดติด Cobalt stearate ได้สูงสุด อย่างไม่เห็นได้ชัด เช่นเดียวกับการติดประสานของโลหะที่ปราศจากสารรองพื้น ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (a) ในขณะที่การติดประสานของโลหะอะลูมิเนียม ทองแดง รวมทั้งการติดประสานของโลหะทั้ง 3 ชนิด กับยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าโลหะดังกล่าวสามารถเกิดพันธะในการยึดติด ทางกลที่ดีกับยางใส่สารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate โดยมีค่าความแข็งแรงในการติดประสานสูงกว่ายางที่ใส่สารเสริมการยึดติดชนิดอื่นๆ โดยเฉพาะการติดประสานของโลหะทองแดง

สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่เตรียมผิวโดยวิธีการพ่นทราย ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (b) มีแนวโน้มในการติดประสานเช่นเดียวกับการยึดติดของโลหะที่ปราศจากสารรองพื้นดังรูปที่ 4.8 (b) ซึ่งในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน พบว่าโลหะเหล็กและอะลูมิเนียม สามารถเกิดพันธะในการยึดติดทางกลกับยางที่ใส่สารเสริมการยึดติด Cobalt stearate ได้สูงสุด โดยเฉพาะโลหะเหล็ก รองลงมาคือ ยางใส่สารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate และ Zinc dimethacrylate ตามลำดับ ในขณะที่โลหะทองแดงมีค่าความแข็งแรงในการติดประสานสูงสุด เมื่อยึดติดกับสารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate สำหรับยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าโลหะทองแดงมีความสามารถในการติดประสานกับยางใส่สารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate ได้สูงสุด อย่างไม่เห็นได้ชัด เช่นเดียวกับการติดประสานกับโลหะที่เตรียมผิวโดยการขัดด้วยกระดาษทราย ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (a)

สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่เตรียมผิวโดยวิธีการกัดผิวด้วยกรด ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (c) พบว่าในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน โลหะเหล็กมีพันธะในการยึดติดหรือเกิดแรงยึดเหนี่ยวในขณะที่ทำการวัลคาไนซ์ กับยางที่ใส่สารเสริมการยึดติดทั้ง 3 ชนิดได้ใกล้เคียงกัน โดยสามารถเกิดการติดประสานกับยางใส่สารเสริมการยึดติด Cobalt stearate ได้สูงที่สุด สำหรับในระบบการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์ พบว่า

โลหะทองแดงมีความสามารถในการติดประสานกับยางใส่สารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate สูงสุด และยังเกิดความล้มเหลวในการติดประสานแบบโคฮีซีฟ เช่นเดียวกับการติดประสานของโลหะที่ขัดด้วยกระดาษทราย และการพ่นทราย ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (a) และ (b) ตามลำดับ ซึ่งความล้มเหลวในการติดประสานเช่นนี้ สามารถยืนยันได้ว่าพันธะในการยึดติดระหว่างยางกับโลหะที่เกิดขึ้นในช่วงของการเกิดปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์มีความแข็งแรงสูงมาก จนเกิดความล้มเหลวขึ้นภายในเนื้อยาง

3) การติดประสานระหว่างยางกับโลหะ ที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นทางการค้า
(Primer chemlok205A)

ตารางที่ 4.18 ชนิดของโลหะ กับการใช้สารเสริมการยึดติดชนิดต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ (ขัดด้วยกระดาษทราย) ที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นทางการค้า

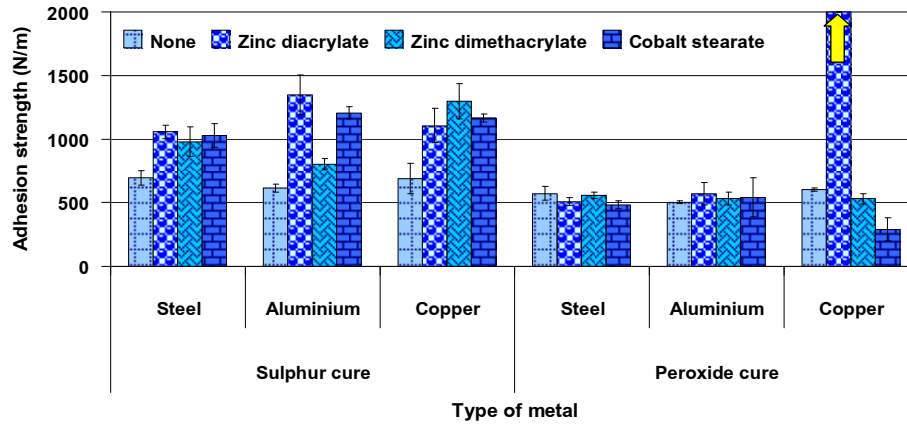
| Vulcanization system | Type of metal | Adhesion strength (N/m) | | | | Type of break | |
|----------------------|---------------|-------------------------|---------------------|---------------------|--------------------|---------------|---|
| | | None | Zinc diacrylate | Zinc dimethacrylate | Cobalt stearate | R* | M |
| Sulphur cure | Steel | 695.28 ± 55.51 | 1056.43 ± 55.05 | 980.76 ± 115.53 | 1028.70 ± 93.78 | | ✓ |
| | Aluminium | 615.03 ± 28.98 | 1350.50 ± 157.30 | 803.70 ± 41.85 | 1206.58 ± 49.07 | | ✓ |
| | Copper | 691.76 ± 120.05 | 1104.86 ± 133.62 | 1297.74 ± 137.19 | 1167.55 ± 31.36 | | ✓ |
| Peroxide cure | Steel | 572.69 ± 54.59 | 505.33 ± 30.89 | 558.18 ± 24.31 | 484.75 ± 32.26 | | ✓ |
| | Aluminium | 504.47 ± 10.92 | 570.25 ± 87.09 | 534.09 ± 51.54 | 540.31 ± 154.30 | | ✓ |
| | Copper | 600.63 ± 12.60 | R* | 530.74 ± 39.37 | 289.76 ± 90.22 | | ✓ |

ตารางที่ 4.19 ชนิดของโลหะ กับการใช้สารเสริมการยึดติดชนิดต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ (พ่นทราย) ที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นทางการค้า

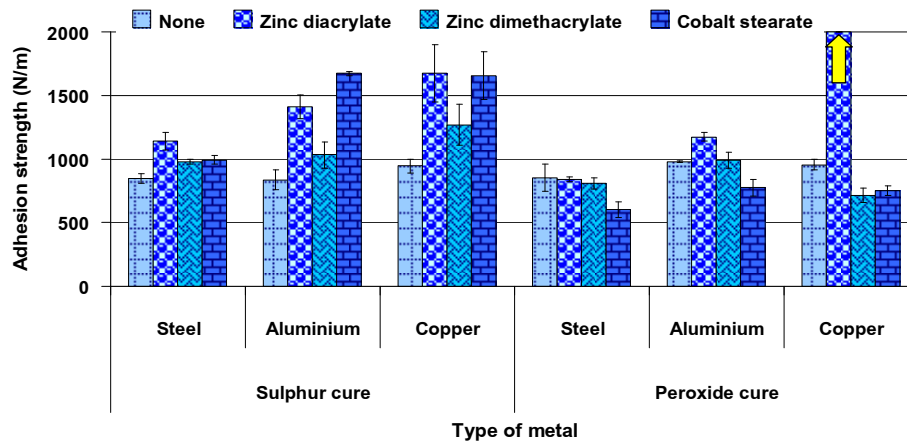
| Vulcanization system | Type of metal | Adhesion strength (N/m) | | | | Type of break | |
|----------------------|---------------|-------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------|---|
| | | None | Zinc diacrylate | Zinc dimethacrylate | Cobalt stearate | R* | M |
| Sulphur cure | Steel | 848.28 ± 38.57 | 1142.35 ± 69.63 | 978.19 ± 21.10 | 993.46 ± 33.45 | | ✓ |
| | Aluminium | 836.11 ± 76.67 | 1410.94 ± 93.61 | 1032.38 ± 104.40 | 1670.86 ± 13.51 | | ✓ |
| | Copper | 944.64 ± 54.47 | 1674.74 ± 223.79 | 1269.13 ± 158.75 | 1654.15 ± 188.56 | | ✓ |
| Peroxide cure | Steel | 852.34 ± 107.46 | 837.36 ± 18.83 | 808.09 ± 44.79 | 603.91 ± 63.11 | | ✓ |
| | Aluminium | 979.41 ± 4.81 | 1174.01 ± 35.84 | 987.98 ± 62.49 | 775.69 ± 65.28 | | ✓ |
| | Copper | 955.55 ± 39.46 | R* | 714.86 ± 55.85 | 753.71 ± 39.07 | | ✓ |

ตารางที่ 4.20 ชนิดของโลหะ กับการใช้สารเสริมการยึดติดชนิดต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ (กัดผิวด้วยกรด) ที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นทางการค้า

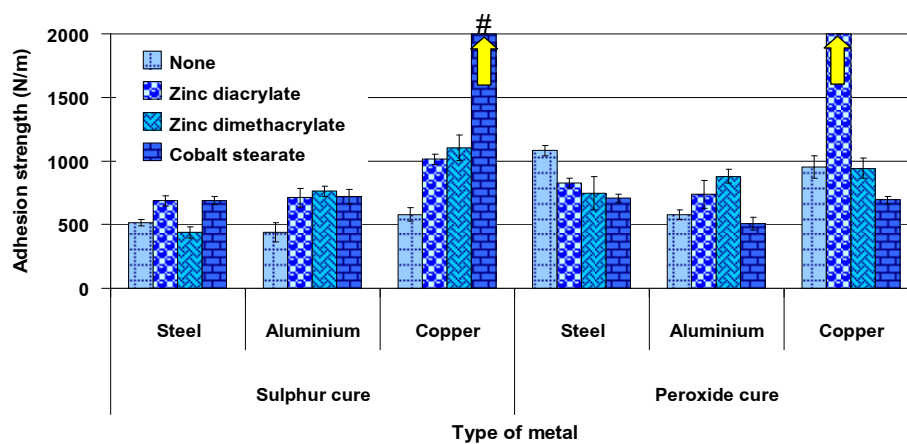
| Vulcanization system | Type of metal | Adhesion strength (N/m) | | | | Type of break | |
|----------------------|---------------|-------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------|---|
| | | None | Zinc diacrylate | Zinc dimethacrylate | Cobalt stearate | R* | M |
| Sulphur cure | Steel | 515.07 ± 23.13 | 687.20 ± 41.62 | 439.49 ± 46.09 | 692.11 ± 31.24 | | ✓ |
| | Aluminium | 437.99 ± 76.82 | 713.77 ± 71.44 | 761.94 ± 40.93 | 720.28 ± 54.80 | | ✓ |
| | Copper | 578.98 ± 53.26 | 1012.57 ± 42.07 | 1103.28 ± 97.92 | 2897.37 ± 319.38 | | ✓ |
| Peroxide cure | Steel | 1082.09 ± 39.80 | 825.88 ± 36.38 | 744.99 ± 131.28 | 708.48 ± 31.16 | | ✓ |
| | Aluminium | 576.36 ± 38.40 | 737.12 ± 108.14 | 880.21 ± 54.05 | 508.09 ± 50.91 | | ✓ |
| | Copper | 952.27 ± 89.21 | R* | 941.75 ± 79.06 | 693.68 ± 28.99 | | ✓ |



(a) Mechanical treatment (sandpaper blasting)



(b) Mechanical treatment (sand blasting)



(c) Chemical treatment (acid etching)

หมายเหตุ # : Adhesive failure

รูปที่ 4.10 ชนิดของโลหะ กับการใช้สารเสริมการยึดติดชนิดต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะ (รองพื้นด้วยสารรองพื้นทางการค้า)

ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างโลหะเหล็ก อะลูมิเนียม และทองแดง ที่เตรียมผิวโดยวิธีการขัดด้วยกระดาษทราย การพ่นทราย และการกัดผิวด้วยกรด พร้อมทั้งรองพื้นโลหะด้วยสารรองพื้นทางการค้า กับยางทั้งที่ใส่สารเสริมการยึดติดและปราศจากสารเสริมการยึดติด ซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันและเปอร์ออกไซด์ ดังแสดงในตารางที่ 4.18–4.20 และรูปที่ 4.10 พบว่าความล้มเหลวในการติดประสานระหว่างยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันและเปอร์ออกไซด์ กับโลหะเหล็ก อะลูมิเนียม และทองแดง มีลักษณะเป็นแบบแอดฮีซีฟทุกชนิดของโลหะทั้งการเตรียมผิวด้วยวิธีทางกล และทางเคมี รวมทั้งทุกชนิดของสารเสริมการยึดติดอีกด้วย ยกเว้น การติดประสานระหว่างยางที่ใส่สารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate ในระบบเปอร์ออกไซด์กับโลหะทองแดงที่มีลักษณะของความล้มเหลวเป็นแบบโคฮีซีฟ เมื่อพิจารณาความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่เตรียมผิวโดยวิธีการขัดด้วยกระดาษทราย ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (a) พบว่าในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน โลหะทั้ง 3 ชนิด มีแนวโน้มในการเกิดพันธะหรือแรงยึดเหนี่ยวกับสารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate ได้ง่าย โดยเฉพาะการติดประสานของโลหะอะลูมิเนียมกับยางที่ใส่สารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate ที่มีความแข็งแรงในการติดประสานสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะชนิดอื่นๆ สำหรับการติดประสานของโลหะกับยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าโลหะทองแดงมีความสามารถในการยึดติดกับยางที่ใส่สารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate อย่างชัดเจน และนอกจากมีค่าการติดประสานสูงสุดแล้วยังเกิดความล้มเหลวในการติดประสานแบบโคฮีซีฟ เช่นเดียวกับโลหะที่ปราศจากสารรองพื้น และรองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมพอนด์อีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (a) และ 4.9 (a) ตามลำดับ

สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่เตรียมผิวโดยวิธีการพ่นทราย ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (b) พบว่าโลหะเหล็ก อะลูมิเนียม และทองแดง มีแนวโน้มในการเกิดพันธะหรือแรงยึดเหนี่ยวของการยึดติดกับยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันและเปอร์ออกไซด์เป็นแนวทางเดียวกัน กล่าวคือโลหะทั้ง 3 ชนิด สามารถเกิดพันธะในการยึดติดกับยางใส่สารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate ได้ง่ายที่สุด จึงทำให้สามารถเกิดการยึดติดทางกลได้สูง โดยที่ความแข็งแรงในการติดประสานมีค่าสูงสุด เมื่อนำโลหะทองแดงมาติดประสานกับยางที่ใส่สารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate และวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันหรือเปอร์ออกไซด์

สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่เตรียมผิวโดยวิธีการกัดผิวด้วยกรด ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (c) พบว่าในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน โลหะเหล็ก และทองแดง สามารถเกิดพันธะในการยึดติดกับยางใส่สารเสริมการยึดติด Cobalt stearate สูงกว่าสารเสริมการยึดติดชนิดอื่นๆ โดยที่ความแข็งแรงในการติดประสานสูงสุดอย่างชัดเจนเมื่อใช้สารเสริมการยึดติดชนิดนี้ในการติดประสานกับโลหะทองแดง สำหรับในระบบการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าโลหะทองแดงมีความสามารถในการติดประสานกับยางใส่สารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate ได้สูงสุด อีกทั้งยังเกิดความล้มเหลวในการติด

ประสานแบบโคฮีซีฟอีกด้วย เช่นเดียวกับการติดประสานของโลหะทองแดงที่เตรียมผิวโดยวิธีการขัดด้วยกระดาษทราย และการพ่นทราย ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (a) และ (b) ตามลำดับ

4.2.2.3 ผลของวิธีการเตรียมผิวโลหะต่อความสามารถในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ

ศึกษาผลของวิธีการเตรียมผิวโลหะ โดยนำโลหะแผ่นเหล็ก (steel) อะลูมิเนียม (aluminium) และทองแดง (copper) ที่มีความหนา 1.6 ± 0.1 มิลลิเมตร กว้าง 25 ± 0.05 มิลลิเมตร และยาว 60 มิลลิเมตร มาผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีทางกล (ขัดด้วยกระดาษทรายและพ่นทราย) และการเตรียมผิวด้วยวิธีทางเคมี (กัดผิวด้วยกรด) ตามหัวข้อ 3.3.1.4 หลังจากนั้นนำยางคอมพอนด์ใส่สารเสริมการยึดติด ที่เตรียมได้จากหัวข้อ 3.3.1.1 โดยใช้ปริมาณยางและสารเคมีแสดงดังตารางที่ 3.2 และ 3.3 มายึดติดกับโลหะที่ผ่านการเตรียมผิวข้างต้น สำหรับขั้นตอนในการเตรียมชั้นทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.2 แล้วทำการวัลคาไนซ์ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเบ้าที่อุณหภูมิ 150°C (วัลคาไนซ์ด้วยระบบกัมมะถัน) และอุณหภูมิ 160°C (วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์) และทดสอบความสามารถในการติดประสานแบบปอก ด้วยมุม 90 องศา ตามหัวข้อ 3.3.4.2 ซึ่งผลของวิธีการเตรียมผิวโลหะต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกัมมะถันและเปอร์ออกไซด์กับโลหะทั้ง 3 ชนิด โดยใช้ยางที่ปราศจากสารเสริมการยึดติดแสดงดังตารางที่ 4.21–4.23 และรูปที่ 4.11 ยางที่ใช้สารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate แสดงดังตารางที่ 4.24–4.26 และรูปที่ 4.12 ยางที่ใช้สารเสริมการยึดติด Zinc dimethacrylate แสดงดังตารางที่ 4.27–4.29 และรูปที่ 4.13 และยางที่ใช้สารเสริมการยึดติด Cobalt stearate แสดงดังตารางที่ 4.30–4.32 และรูปที่ 4.14 ตามลำดับ ดังนี้

1) การติดประสานระหว่างยางที่ปราศจากสารเสริมการยึดติดกับโลหะชนิดต่างๆ

ตารางที่ 4.21 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางที่ปราศจากสารเสริมการยึดติดกับโลหะ โดยปราศจากสารรองพื้น

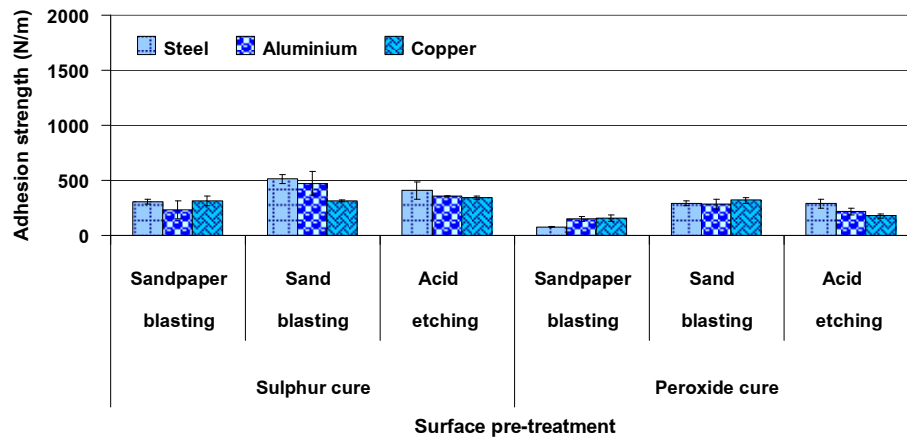
| Vulcanization system | Surface pre-treatment | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------|-------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | Sandpaper blasting | 303.14 ± 22.29 | 232.15 ± 83.41 | 311.99 ± 46.31 | | ✓ |
| | Sand blasting | 512.53 ± 40.47 | 472.72 ± 109.43 | 314.65 ± 9.22 | | ✓ |
| | Acid etching | 408.90 ± 78.18 | 357.96 ± 3.28 | 343.03 ± 15.80 | | ✓ |
| | Sandpaper blasting | 77.34 ± 2.86 | 149.43 ± 22.58 | 154.32 ± 29.17 | | ✓ |
| | Sand blasting | 289.25 ± 21.96 | 284.00 ± 45.41 | 319.08 ± 26.93 | | ✓ |
| | Acid etching | 288.19 ± 38.76 | 214.74 ± 27.91 | 175.49 ± 21.82 | | ✓ |

ตารางที่ 4.22 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางที่ปราศ
จากสารเสริมการยึดติด กับโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมเพานด์

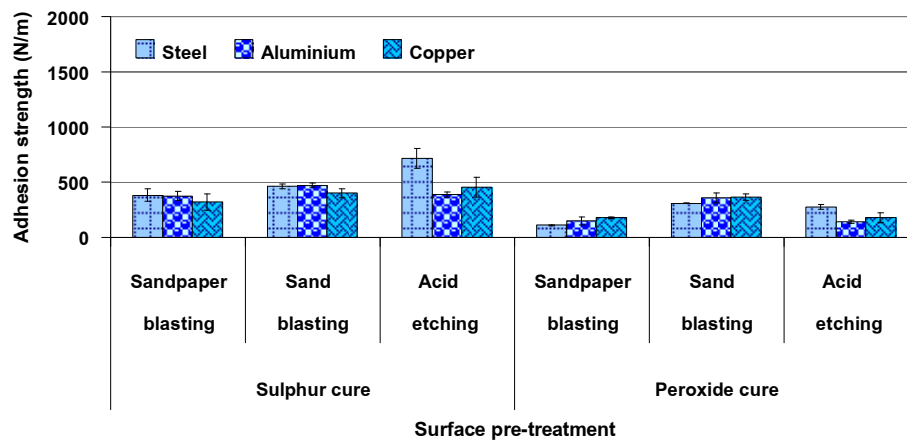
| Vulcanization system | Surface pre- treatment | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|-------------------------|------------------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|---------------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| | | | | | | |
| Sulphur cure | Sandpaper blasting | 382.11 ± 54.80 | 376.09 ± 38.49 | 321.16 ± 75.32 | | ✓ |
| | Sand blasting | 461.80 ± 22.66 | 471.94 ± 19.63 | 399.85 ± 38.92 | | ✓ |
| | Acid etching | 714.49 ± 90.91 | 385.53 ± 22.21 | 455.39 ± 92.59 | | ✓ |
| | Sandpaper blasting | 110.84 ± 4.46 | 151.58 ± 37.48 | 179.02 ± 5.20 | | ✓ |
| | Sand blasting | 309.55 ± 6.16 | 359.64 ± 43.74 | 368.32 ± 29.31 | | ✓ |
| | Acid etching | 277.09 ± 23.06 | 141.71 ± 11.47 | 182.15 ± 44.64 | | ✓ |

ตารางที่ 4.23 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางที่ปราศจากสารเสริมการยึดติด กับโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นทางการค้า

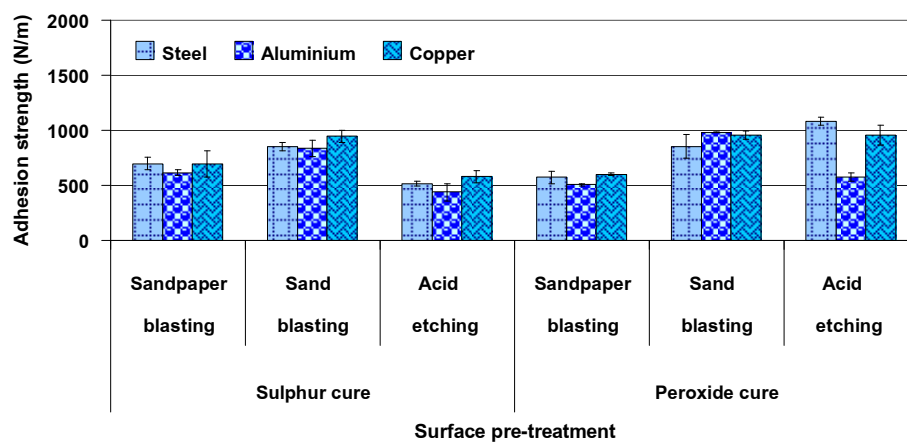
| Vulcanization system | Surface pre-treatment | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------|--------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| | | | | | | |
| Sulphur cure | Sandpaper blasting | 695.28 ± 55.51 | 615.03 ± 28.98 | 691.76 ± 120.05 | | ✓ |
| | Sand blasting | 848.28 ± 38.57 | 836.11 ± 76.67 | 944.64 ± 54.47 | | ✓ |
| | Acid etching | 515.07 ± 23.13 | 437.99 ± 76.82 | 578.98 ± 53.26 | | ✓ |
| | Sandpaper blasting | 572.69 ± 54.59 | 504.47 ± 10.92 | 600.63 ± 12.60 | | ✓ |
| | Sand blasting | 852.34 ± 107.46 | 979.41 ± 4.81 | 955.55 ± 39.46 | | ✓ |
| | Acid etching | 1082.09 ± 39.80 | 576.36 ± 38.40 | 952.27 ± 89.21 | | ✓ |



(a) Without primer



(b) With primer compound solution



(c) With primer chemlok205A

รูปที่ 4.11 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางที่ปราศจากสารเสริมการยึดติด กับโลหะชนิดต่างๆ

ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางที่ปราศจากสารเสริมการยึดติดที่เตรียมขึ้นด้วยกระบวนการวัลคาไนซ์แบบกัมมะถันและเปอร์ออกไซด์ กับโลหะทั้ง 3 ชนิด ที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีทางกล (ขัดด้วยกระดาษทรายและฟันททราย) และเตรียมผิวด้วยวิธีทางเคมี (กัดผิวด้วยกรด) โดยปราศจากสารรองพื้น และรองพื้นโลหะด้วยสารรองพื้นชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.21–4.23 และรูปที่ 4.11 พบว่าลักษณะของความล้มเหลวที่เกิดขึ้น เป็นแบบแอตอีซีฟ ทุกชนิดของโลหะ ทุกวิธีการของการเตรียมผิว และทุกชนิดของสารรองพื้น เมื่อพิจารณาผลจากการศึกษาความแข็งแรงในการยึดติดระหว่างยางกับโลหะที่ปราศจากสารรองพื้น ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (a) พบว่าการเตรียมผิวโลหะเหล็ก อะลูมิเนียม และทองแดงด้วยวิธีการฟันททรายมีแนวโน้มในการติดประสานกับยางสูงสุด ทั้งในระบบกัมมะถันและเปอร์ออกไซด์ ทั้งนี้เนื่องจากการเตรียมผิวด้วยวิธีการฟันททราย เป็นวิธีการที่ทำให้ผิวหน้าของโลหะมีความขรุขระมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งความขรุขระของผิวหน้าทำให้มีพื้นที่ผิวในการยึดติดระหว่างยางกับแผ่นโลหะทั้ง 3 ชนิดได้มากขึ้น โดยยางคอมปานด์จะไหลแทรกตัวไปบนพื้นผิวที่ขรุขระและช่องว่างอื่นๆ บนพื้นผิว (SpecialChem Adhesives & Sealants, 2007b) ในขณะที่การวัลคาไนซ์ ทำให้ยางสามารถเกิดการล็อกติดอยู่กับพื้นผิวของแผ่นโลหะ และมีการยึดติดทางกลเกิดขึ้น สำหรับในระบบการวัลคาไนซ์แบบกัมมะถัน พบว่าการเตรียมผิวด้วยวิธีการฟันททรายสามารถยึดติดกับโลหะเหล็กได้สูงสุด ในขณะที่การวัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ ส่งผลให้ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะทองแดงมีค่าสูงสุด เมื่อเตรียมผิวด้วยวิธีการฟันททราย

สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นที่เตรียมขึ้นจากยางคอมปานด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (b) พบว่ายางที่เตรียมด้วยระบบการวัลคาไนซ์แบบกัมมะถันมีแนวโน้มในการติดประสานกับโลหะเหล็ก และทองแดงที่ผ่านการเตรียมผิวโดยการกัดผิวด้วยกรดได้สูงกว่าการฟันททราย และขัดด้วยกระดาษทราย ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารรองพื้นที่เตรียมขึ้นจากยางคอมปานด์ แทรกตัวเข้าไปภายในช่องว่างของพื้นผิวเหล็ก และทองแดงที่ผ่านการฟันททราย แล้วเกิดการตกค้างของตัวทำละลายที่ใช้ในการเตรียมยางคอมปานด์ เนื่องจากการฟันททรายในบางครั้งมีผลทำให้พื้นผิวมีช่องว่างขนาดใหญ่ และมีรูลึกกว่าการเตรียมผิวด้วยวิธีการกัดผิวด้วยกรด ทำให้ตัวทำละลายไม่สามารถระเหยออกได้หมด จึงเป็นเหตุให้เกิดการยึดติดเชิงกลได้น้อยกว่าการเตรียมผิวด้วยวิธีการกัดผิวด้วยกรด แต่ยังมีค่าสูงกว่าการเตรียมผิวที่ขัดด้วยกระดาษทราย แต่อย่างไรก็ตาม พบว่าโลหะเหล็กมีค่าความแข็งแรงในการติดประสานกับยางสูงสุด โดยมีการเตรียมผิวโลหะด้วยการกัดผิวหน้าด้วยกรด สำหรับการติดประสานของยางในระบบเปอร์ออกไซด์กับโลหะทั้ง 3 ชนิด พบว่าการเตรียมผิวโลหะด้วยวิธีการฟันททรายมีแนวโน้มในการติดประสานสูงสุด เช่นเดียวกับโลหะที่ปราศจากสารรองพื้น

สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้น Chemlok 205A ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (c) พบว่าโลหะที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีทางกลมีความสามารถในการติดประสานกับยางในระบบการวัลคาไนซ์แบบกัมมะถันสูงกว่าการเตรียมผิวด้วยวิธีทางเคมี และยังสามารถในการยึดติดกับโลหะทั้ง 3 ชนิดสูงใกล้เคียงกัน โดยที่โลหะทองแดงมีแนวโน้มในการติดประสานสูงสุด สำหรับในระบบการวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ พบว่าโลหะที่เตรียมผิวด้วยวิธีการพ่นทรายมีความแข็งแรงในการติดประสานสูงกว่าการขัดด้วยกระดาษทราย เนื่องจากการพ่นทรายสามารถทำให้พื้นผิวของโลหะมีความขรุขระสม่ำเสมอ มากกว่าการขัดด้วยกระดาษทราย ดังแสดงในรูปที่ 4.1 จึงเป็นผลทำให้ยางสามารถไหลเข้าไปภายในช่องว่างของพื้นผิวแผ่นโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้น Chemlok 205A ในขณะที่ทำการวัลคาไนซ์ และเกิดการล็อกยางติดกับแผ่นโลหะได้ดีกว่าการขัดด้วยกระดาษทราย นอกจากนี้ยังพบว่าโลหะที่เตรียมผิวโลหะด้วยวิธีการพ่นทรายยังมีแนวโน้มในการติดประสานที่แข็งแรงกว่าการกัดผิวหน้าด้วยกรด ยกเว้น การติดประสานของโลหะเหล็ก ที่มีค่าการติดประสานต่ำกว่าการกัดผิวหน้าด้วยกรดเพียงเล็กน้อย ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารรองพื้น Chemlok 205A กับสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมผิวโลหะเกิดการตกค้างบริเวณผิวของโลหะเหล็ก หรืออาจจะเกิดจากการตกค้างของตัวทำละลายที่เหลือจากสารรองพื้น Chemlok 205A ผังอยู่ภายในช่องว่างของพื้นผิวโลหะที่มีรูลึกและขนาดใหญ่ แล้วไม่สามารถระเหยออกได้หมด จึงส่งผลทำให้ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างโลหะเหล็กกับยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์มีค่าสูงกว่าการเตรียมผิวด้วยวิธีทางกลทั้ง 2 วิธี นอกจากนี้ยังพบว่าสารรองพื้น Chemlok 205A มีผลทำให้ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะทุกชนิดมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะที่ปราศจากสารรองพื้นและรองพื้นด้วยสารรองพื้นเตรียมขึ้นจากยางคอมพอนด์

2) การติดประสานระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติดชนิด Zinc diacrylate กับโลหะชนิดต่างๆ

ตารางที่ 4.24 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติดชนิด Zinc diacrylate กับโลหะ โดยปราศจากสารรองพื้น

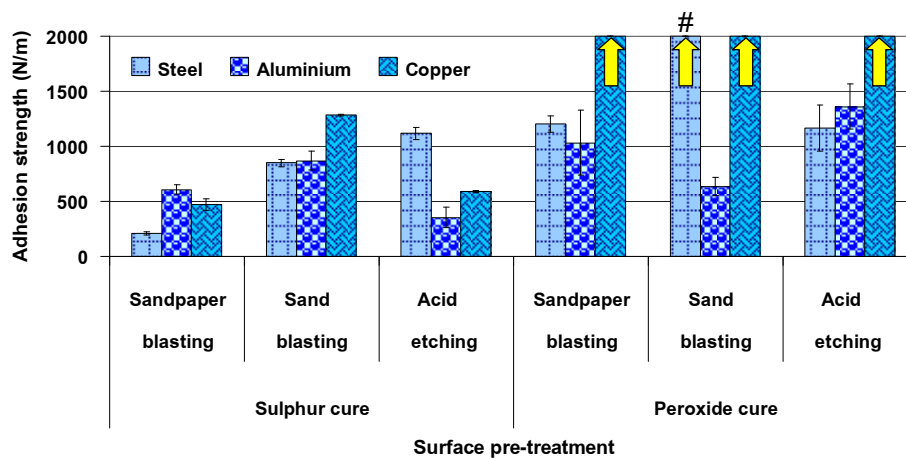
| Vulcanization system | Surface pre-treatment | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------|-------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| | | | | | | |
| Sulphur cure | Sandpaper blasting | 212.14 ± 15.18 | 607.16 ± 40.80 | 471.35 ± 52.44 | | ✓ |
| | Sand blasting | 847.22 ± 35.26 | 865.91 ± 85.80 | 1281.28 ± 7.28 | | ✓ |
| | Acid etching | 1116.21 ± 58.54 | 352.51 ± 93.89 | 591.59 ± 7.84 | | ✓ |
| | Sandpaper blasting | 1199.38 ± 73.61 | 1030.79 ± 294.47 | R* | | ✓ |
| | Sand blasting | 2530.60 ± 178.73 | 636.06 ± 81.91 | R* | | ✓ |
| | Acid etching | 1164.22 ± 208.02 | 1360.99 ± 204.85 | R* | | ✓ |

ตารางที่ 4.25 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติดชนิด Zinc diacrylate กับโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมพอนันต์

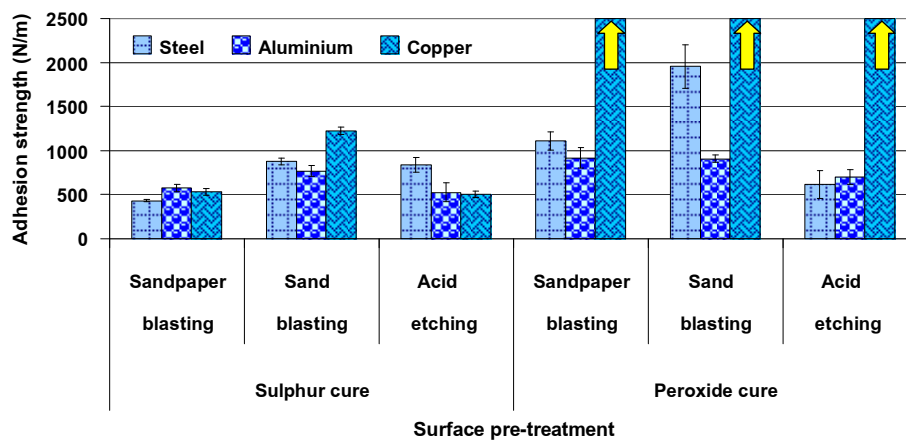
| Vulcanization system | Surface pre-treatment | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------|--------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| | | | | | | |
| Sulphur cure | Sandpaper blasting | 430.67 ± 14.98 | 573.87 ± 46.09 | 530.47 ± 40.29 | | ✓ |
| | Sand blasting | 878.40 ± 35.52 | 769.56 ± 61.98 | 1225.48 ± 40.18 | | ✓ |
| | Acid etching | 837.80 ± 83.45 | 526.74 ± 104.81 | 505.39 ± 36.38 | | ✓ |
| | Sandpaper blasting | 1108.13 ± 104.31 | 918.61 ± 115.56 | R* | | ✓ |
| | Sand blasting | 1956.65 ± 245.50 | 909.05 ± 40.78 | R* | | ✓ |
| | Acid etching | 617.24 ± 157.88 | 702.46 ± 85.55 | R* | | ✓ |

ตารางที่ 4.26 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติดชนิด Zinc diacrylate กับโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นทางการค้า

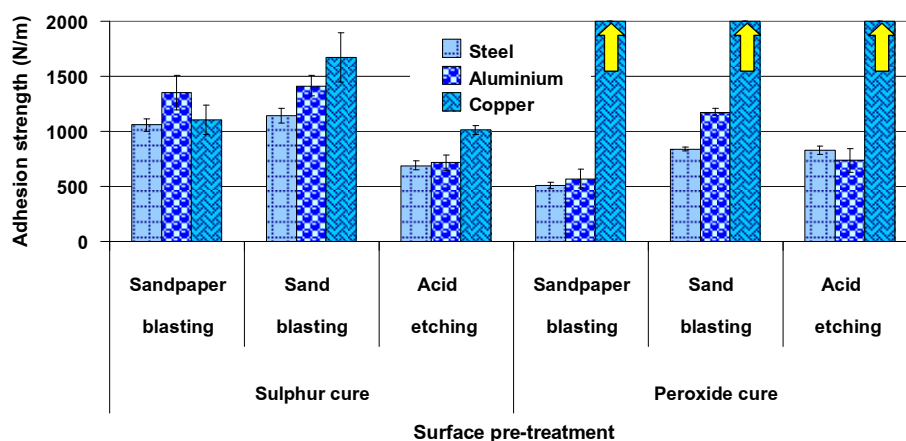
| Vulcanization system | Surface pre-treatment | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------|---------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| | | | | | | |
| Sulphur cure | Sandpaper blasting | 1056.43 ± 55.05 | 1350.50 ± 157.30 | 1104.86 ± 133.62 | | ✓ |
| | Sand blasting | 1142.35 ± 69.63 | 1410.94 ± 93.61 | 1674.74 ± 223.79 | | ✓ |
| | Acid etching | 687.20 ± 41.62 | 713.77 ± 71.44 | 1012.57 ± 42.07 | | ✓ |
| | Sandpaper blasting | 505.33 ± 30.89 | 570.25 ± 87.09 | R* | | ✓ |
| | Sand blasting | 837.36 ± 18.83 | 1174.01 ± 35.84 | R* | | ✓ |
| | Acid etching | 825.88 ± 36.38 | 737.12 ± 108.14 | R* | | ✓ |



(a) Without primer (# : adhesive failure)



(b) With primer compound solution



(c) With primer chemlok205A

รูปที่ 4.12 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางใสสารเสริมการยึดติดชนิด Zinc diacrylate กับโลหะชนิดต่างๆ

ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate (ZDA) ที่เตรียมขึ้นด้วยกระบวนการวัลคาไนซ์แบบก้ำมะถันและเปอร์ออกไซด์ กับ โลหะทั้ง 3 ชนิด ที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีทางกล (ขัดด้วยกระดาษทรายและฟันททราย) และเตรียมผิวด้วยวิธีทางเคมี (กัดผิวด้วยกรด) โดยปราศจากสารรองพื้น และรองพื้นโลหะด้วยสารรองพื้นชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.24–4.26 และรูปที่ 4.12 พบว่าลักษณะของความล้มเหลวที่เกิดขึ้น เป็นแบบแอดฮีซีฟทุกชนิดของโลหะ ทุกวิธีการของการเตรียมผิว และทุกชนิดของสารรองพื้น ยกเว้น การติดประสานระหว่างโลหะทองแดงกับยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ เมื่อพิจารณาผลจากการศึกษาความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่ปราศจากสารรองพื้น ดังแสดงในรูปที่ 4.12 (a) พบว่าการเตรียมผิวด้วยวิธีการฟันททราย มีผลทำให้ความแข็งแรงในการยึดติดระหว่างยางกับโลหะทองแดงมีค่าการติดประสานสูงที่สุด เนื่องจากวิธีการฟันททรายเป็นวิธีการเตรียมผิวที่ทำให้ผิวหน้าของโลหะมีความขรุขระอย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้ยางสามารถไหลเข้าไปภายในช่องว่างของพื้นผิวโลหะขณะทำการวัลคาไนซ์ และเกิดการยึดติดทางกลกับโลหะได้ จึงส่งผลให้โลหะที่เตรียมผิวด้วยการฟันททรายมีความแข็งแรงในการติดประสานสูงกว่าการเตรียมผิวด้วยวิธีการอื่นๆ แต่สำหรับการติดประสานของยางในระบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าการเตรียมผิวโลหะทองแดงด้วยวิธีการที่ต่างกัน ไม่มีผลในการทำให้ความแข็งแรงของการติดประสานระหว่างยางกับโลหะทองแดงมีค่าต่างกัน เนื่องจากยางสามารถเกิดพันธะหรือแรงยึดเหนี่ยวกับโลหะทองแดงได้สูงที่สุดกับทุกวิธีการเตรียมผิว อีกทั้งยังเกิดความล้มเหลวในการติดประสานเกิดขึ้นภายในเนื้อยางอีกด้วย หรือที่เรียกว่าเกิดความล้มเหลวแบบโคฮีซีฟ (cohesive failure) ซึ่งเป็นสิ่งที่สามารถยืนยันได้ว่าพันธะหรือแรงยึดเหนี่ยวในการยึดติดระหว่างยางกับโลหะทองแดงมีค่าสูงมาก จนไม่สามารถแยกแผ่นยางออกจากแผ่นโลหะได้ จึงทำให้ง่ายเกิดการฉีกขาดขณะทำการทดสอบแบบปอก

สำหรับความแข็งแรงในการยึดติดระหว่างยางกับโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นที่เตรียมขึ้นจากยางคอมพอนด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 (b) พบว่าการเตรียมผิวด้วยวิธีการฟันททราย ส่งผลให้ความแข็งแรงในการติดประสานของโลหะทั้ง 3 ชนิด มีค่าสูงกว่าการขัดด้วยกระดาษทราย และการกัดผิวหน้าด้วยกรด โดยที่ให้ความแข็งแรงในการติดประสานของโลหะทองแดงมีค่าสูงที่สุด เช่นเดียวกับการติดประสานของโลหะที่ปราศจากสารรองพื้นกับยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบก้ำมะถัน ดังแสดงในรูปที่ 4.12 (a) สำหรับการติดประสานของโลหะทั้ง 3 ชนิดกับยางในระบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าการเตรียมผิวโลหะทองแดงด้วยวิธีการที่ต่างกันไม่มีผลต่อค่าความแข็งแรงที่เกิดขึ้น อีกทั้งยังทำให้ความแข็งแรงในการติดประสานมีค่าสูงที่สุดกับทุกวิธีการเตรียมผิว และยังมีค่าความล้มเหลวของการติดประสานเกิดขึ้นภายในเนื้อยางอีกด้วย เช่นเดียวกับการติดประสานของโลหะที่ปราศจากสารรองพื้นกับยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 (a)

สำหรับความแข็งแรงในการยึดติดของโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นทางการค้า ดังแสดงในรูปที่ 4.12 (c) ในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน พบว่าโลหะที่ผ่านการเตรียมผิว ด้วยวิธีทางกล (ขัดด้วยกระดาษทรายและฟันทราย) มีความสามารถในการติดประสานกับยางที่ สูงกว่าการเตรียมผิวด้วยวิธีทางเคมี (กัดผิวด้วยกรด) ทุกชนิดของโลหะ นอกจากนี้ยังพบว่า การเตรียมผิวโลหะทองแดงด้วยวิธีการฟันทราย ส่งผลทำให้มีความแข็งแรงในการยึดติดกับยางสูง กว่าโลหะอะลูมิเนียมและเหล็ก ตามลำดับ สำหรับการติดประสานของยางในระบบการวัลคาไนซ์ แบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าการเตรียมผิวโลหะทองแดงด้วยวิธีทางกลและทางเคมี ไม่มีผลต่อค่า ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างโลหะทองแดงกับยางคอมพอนด์วัลคาไนซ์ด้วยระบบ เปอร์ออกไซด์ เช่นเดียวกับการติดประสานของโลหะทองแดงที่ปราศจากสารรองพื้น และรองพื้น ด้วยสารรองพื้นที่เตรียมขึ้นจากยางคอมพอนด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 (a) และ (b) ตามลำดับ

3) การติดประสานระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติดชนิด Zinc dimethacrylate กับโลหะชนิดต่างๆ

ตารางที่ 4.27 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางใส่สาร เสริมการยึดติดชนิด Zinc dimethacrylate กับโลหะ โดยปราศจากสารรองพื้น

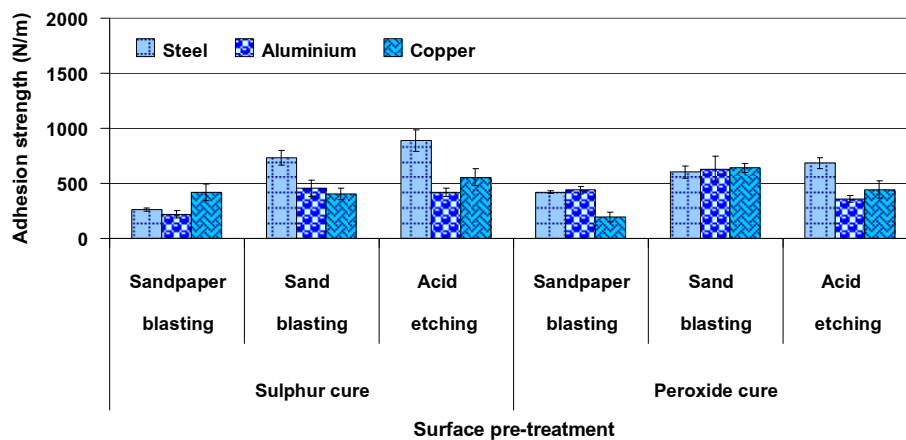
| Vulcanization system | Surface pre-treatment | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------|-------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| | | | | | | |
| Sulphur cure | Sandpaper blasting | 263.05 ± 16.40 | 218.73 ± 31.95 | 420.28 ± 75.17 | | ✓ |
| | Sand blasting | 729.08 ± 66.09 | 451.78 ± 74.82 | 403.55 ± 54.57 | | ✓ |
| | Acid etching | 888.63 ± 97.93 | 416.62 ± 36.83 | 555.82 ± 75.16 | | ✓ |
| | Sandpaper blasting | 419.19 ± 10.13 | 437.51 ± 34.52 | 194.13 ± 46.19 | | ✓ |
| | Sand blasting | 602.21 ± 55.92 | 630.43 ± 112.95 | 639.20 ± 39.13 | | ✓ |
| | Acid etching | 683.46 ± 47.21 | 356.18 ± 30.82 | 443.45 ± 79.81 | | ✓ |

ตารางที่ 4.28 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติดชนิด Zinc dimethacrylate กับโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมเพาท์

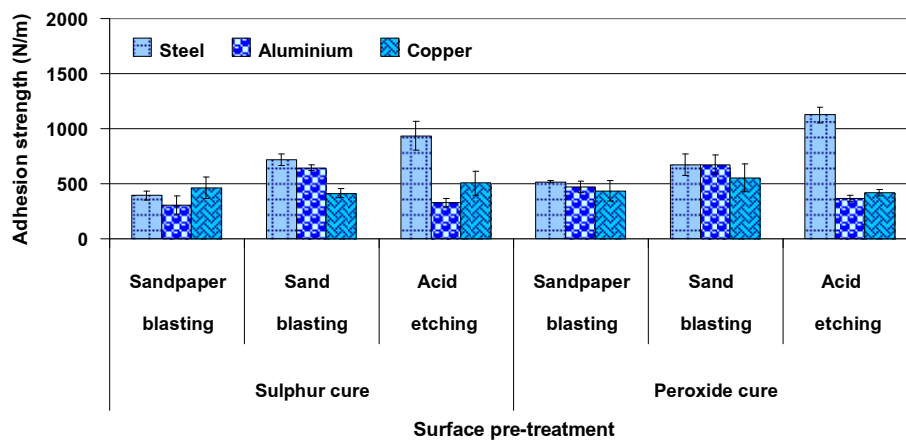
| Vulcanization system | Surface pre-treatment | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------|--------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| | | | | | | |
| Sulphur cure | Sandpaper blasting | 393.16 ± 39.50 | 305.15 ± 83.72 | 464.09 ± 95.03 | | ✓ |
| | Sand blasting | 716.14 ± 51.47 | 643.72 ± 26.27 | 411.11 ± 41.14 | | ✓ |
| | Acid etching | 935.56 ± 130.20 | 329.56 ± 35.45 | 504.57 ± 110.78 | | ✓ |
| | Sandpaper blasting | 515.65 ± 10.90 | 470.85 ± 53.79 | 436.01 ± 94.01 | | ✓ |
| | Sand blasting | 672.13 ± 98.77 | 675.12 ± 86.38 | 549.35 ± 126.19 | | ✓ |
| | Acid etching | 1124.42 ± 73.08 | 365.11 ± 30.58 | 417.58 ± 26.48 | | ✓ |

ตารางที่ 4.29 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติดชนิด Zinc dimethacrylate กับโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นทางการค้า

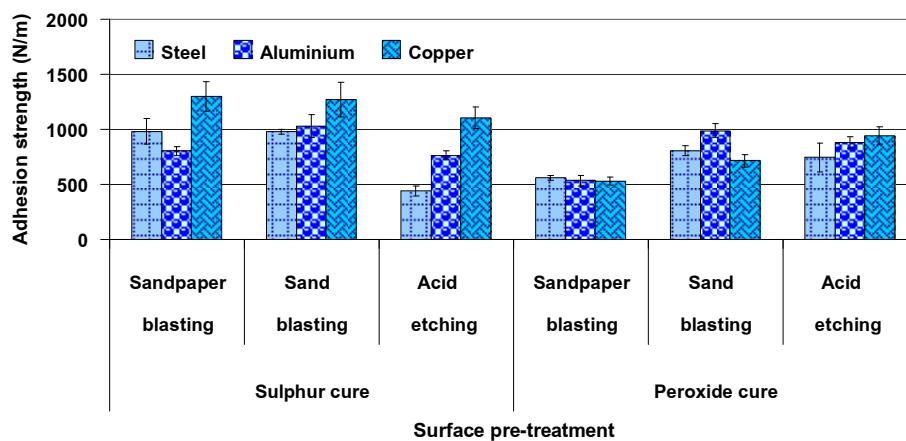
| Vulcanization system | Surface pre-treatment | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------|---------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| | | | | | | |
| Sulphur cure | Sandpaper blasting | 980.76 ± 115.53 | 803.70 ± 41.85 | 1297.74 ± 137.19 | | ✓ |
| | Sand blasting | 978.19 ± 21.10 | 1032.38 ± 104.40 | 1269.13 ± 158.75 | | ✓ |
| | Acid etching | 439.49 ± 46.09 | 761.94 ± 40.93 | 1103.28 ± 97.92 | | ✓ |
| | Sandpaper blasting | 558.18 ± 24.31 | 534.09 ± 51.54 | 530.74 ± 39.37 | | ✓ |
| | Sand blasting | 808.09 ± 44.79 | 987.98 ± 62.49 | 714.86 ± 55.85 | | ✓ |
| | Acid etching | 744.99 ± 131.28 | 880.21 ± 54.05 | 941.75 ± 79.06 | | ✓ |



(a) Without primer



(b) With primer compound solution



(c) With primer chemlok205A

รูปที่ 4.13 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางใสสารเสริมการยึดติดชนิด Zinc dimethacrylate กับโลหะชนิดต่างๆ

ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติด Zinc dimethacrylate (ZDMA) ที่เตรียมขึ้นด้วยกระบวนการวัลคาไนซ์แบบกัมมะถันและเปอร์ออกไซด์ กับโลหะทั้ง 3 ชนิด ที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีทางกล (ขัดด้วยกระดาษทรายและฟันททราย) และเตรียมผิวด้วยวิธีทางเคมี (กัดผิวด้วยกรด) โดยปราศจากสารรองพื้น และรองพื้นด้วยสารรองพื้นชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.27–4.29 และรูปที่ 4.13 พบว่าลักษณะของความล้มเหลวที่เกิดขึ้น เป็นแบบแอดฮีซีฟทุกชนิดของโลหะ ทุกวิธีการของการเตรียมผิว และทุกชนิดของสารรองพื้น เมื่อพิจารณาค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่ปราศจากสารรองพื้น ดังแสดงในรูปที่ 4.13 (a) ในระบบการวัลคาไนซ์แบบกัมมะถัน พบว่าการเตรียมผิวโลหะเหล็ก และทองแดงด้วยวิธีการกัดผิวด้วยกรด ส่งผลให้ความแข็งแรงในการติดประสานมีสูงกว่าการเตรียมผิวโดยการฟันททราย และการขัดด้วยกระดาษทราย โดยที่โลหะเหล็กมีค่าการติดประสานสูงสุด อาจจะเป็นผลมาจากการฟันททรายทำให้พื้นผิวของโลหะบางส่วนมีรอยขรุขระที่ลึก และขนาดใหญ่เกินไป จึงมีฟองอากาศฝังอยู่ภายในช่องว่างแทนการฝังตัวของยาง เป็นเหตุให้เกิดการยึดติดทางกลลดลง หรืออาจจะเป็นผลมาจากสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมผิวโลหะเหล็ก และทองแดงเกิดการตกค้างบนผิวของโลหะ ทำปฏิกิริยาเคมีกับยางที่นำมายึดติดโดยตรง จึงส่งผลให้ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะเหล็ก และทองแดงที่กัดผิวด้วยกรดมีค่าสูงกว่าการเตรียมผิวทางกล สำหรับการติดประสานของยางในระบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าการเตรียมผิวโลหะทั้ง 3 ชนิดด้วยวิธีการฟันททรายมีแนวโน้มในการติดประสานที่ใกล้เคียงกัน และยังมีค่าความแข็งแรงในการติดประสานที่สูงกว่าการเตรียมผิวด้วยวิธีอื่นอีกด้วย ยกเว้นการเตรียมผิวโลหะเหล็ก ซึ่งพบว่าการเตรียมผิวด้วยวิธีการฟันททรายมีค่าต่ำกว่าการเตรียมผิวด้วยวิธีการกัดผิวหน้าด้วยกรดเพียงเล็กน้อย และยังมีแนวโน้มในการติดประสานเช่นเดียวกับกับยางในระบบกัมมะถันข้างต้น

สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมพอนด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 (b) ในระบบการวัลคาไนซ์แบบกัมมะถัน พบว่าการเตรียมผิวโลหะเหล็ก และทองแดงด้วยวิธีการกัดผิวด้วยกรด ส่งผลทำให้มีค่าความแข็งแรงในการติดประสานที่สูงกว่าการเตรียมผิวโดยการฟันททราย โดยที่โลหะเหล็กมีค่าการติดประสานสูงสุด เช่นเดียวกับการติดประสานของโลหะที่ปราศจากสารรองพื้น ดังแสดงในรูปที่ 4.12 (a) ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากการเตรียมผิวเช่นเดียวกัน สำหรับการติดประสานของยางในระบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าการเตรียมผิวด้วยวิธีการกัดผิวด้วยกรด มีผลทำให้การติดประสานของโลหะเหล็กมีค่าสูงกว่าการเตรียมผิวด้วยวิธีการฟันททรายและการขัดด้วยกระดาษทรายอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งอาจจะเป็นเพราะการแทรกตัวของสารรองพื้นที่เตรียมขึ้นจากยางคอมพอนด์ เข้าไปภายในช่องว่างของพื้นผิวเหล็กที่ฟันททราย แล้วเกิดการตกค้างของตัวทำละลายที่ใช้ในการเตรียมยางคอมพอนด์ เนื่องจากการฟันททรายในบางครั้งมีผลทำให้พื้นผิวมีช่องว่างขนาดใหญ่ และมีรูลึกกว่าการเตรียมผิวด้วยวิธีการกัดผิวด้วยกรด ทำให้ตัวทำละลายไม่สามารถระเหยออก

ได้หมด หรืออาจจะมีสาเหตุมาจากสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมผิวโลหะเหล็กเกิดการตกค้างบริเวณผิวของโลหะ ทำปฏิกิริยาเคมีกับสารรองพื้นจากยางคอมปอนด์ จึงส่งผลให้ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะเหล็กที่กัดผิวด้วยกรดมีค่าสูงกว่าการเตรียมผิวทางกล จึงเป็นเหตุให้เกิดการยึดติดเชิงกลที่ต่ำกว่าด้วย

สำหรับความแข็งแรงในการยึดติดระหว่างยางกับโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้น Chemlok 205A ดังแสดงในรูปที่ 4.13 (c) ในระบบการวัลคาไนซ์แบบกัมมะถัน พบว่าโลหะทั้ง 3 ชนิด ที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีทางกล (ขัดด้วยกระดาษทรายและฟันททราย) มีความสามารถในการติดประสานกับยางได้สูงกว่าการเตรียมผิวด้วยวิธีทางเคมี (กัดผิวด้วยกรด) โดยที่โลหะทองแดงมีค่าการติดประสานสูงสุด เมื่อเตรียมผิวด้วยวิธีทางกลทั้ง 2 วิธี เนื่องจากการเตรียมผิวด้วยวิธีการทางกลสามารถทำให้พื้นผิวของโลหะมีความขรุขระสม่ำเสมอมากกว่าการเตรียมผิวด้วยวิธีทางเคมี ดังแสดงในรูปที่ 4.1 จึงเป็นผลทำให้ยางคอมปอนด์สามารถไหลในขณะที่ทำการวัลคาไนซ์เข้าไปภายในช่องว่างของพื้นผิวบนแผ่นโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นทางการค้า และเกิดการล็อกยางติดกับแผ่นโลหะได้ดีกว่าการเตรียมผิวด้วยวิธีการทางเคมี แต่สำหรับการติดประสานของยางในระบบการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าการเตรียมผิวโลหะเหล็ก และอะลูมิเนียมด้วยวิธีการฟันททรายมีผลต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน โดยทำให้มีค่าในการติดประสานสูงสุด โดยเฉพาะการติดประสานของโลหะอะลูมิเนียม ในขณะที่การติดประสานของโลหะทองแดงที่เตรียมผิวโดยการกัดผิวด้วยกรด มีความแข็งแรงสูงกว่าการฟันททราย และยังมีค่าการติดประสานที่ใกล้เคียงกับโลหะอะลูมิเนียมที่เตรียมผิวด้วยการฟันททราย ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมผิวโลหะทองแดงเกิดการตกค้างบริเวณผิวของโลหะ ทำปฏิกิริยาเคมีกับสารรองพื้น Chemlok 205A และยางที่นำมายึดติด หรืออาจเกิดจากการตกค้างของตัวทำละลายของสารรองพื้น Chemlok 205A ที่ฝังอยู่ภายในช่องว่างของพื้นผิวโลหะที่มีรูลึกและขนาดใหญ่ แล้วไม่สามารถระเหยออกได้หมด จึงส่งผลทำให้ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างโลหะทองแดงกับยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์มีค่าสูงขึ้น และสูงกว่าการเตรียมผิวด้วยวิธีทางกล

4) การติดประสานระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติดชนิด Cobalt stearate กับโลหะชนิดต่างๆ

ตารางที่ 4.30 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติดชนิด Cobalt stearate กับโลหะ โดยปราศจากสารรองพื้น

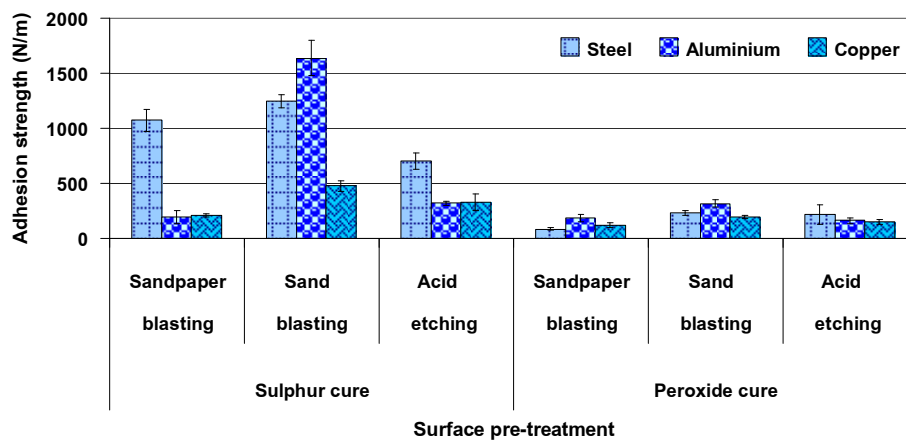
| Vulcanization system | Surface pre-treatment | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------|-------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| | | | | | | |
| Sulphur cure | Sandpaper blasting | 1071.72 ± 99.30 | 195.45 ± 58.35 | 211.86 ± 14.50 | | ✓ |
| | Sand blasting | 1246.60 ± 58.94 | 1637.36 ± 157.85 | 474.59 ± 47.46 | | ✓ |
| | Acid etching | 698.89 ± 75.56 | 317.67 ± 17.04 | 328.67 ± 75.87 | | ✓ |
| | Sandpaper blasting | 84.14 ± 10.21 | 183.59 ± 33.60 | 117.32 ± 23.53 | | ✓ |
| | Sand blasting | 232.84 ± 20.82 | 316.63 ± 31.07 | 195.39 ± 14.42 | | ✓ |
| | Acid etching | 216.98 ± 92.14 | 160.59 ± 24.13 | 150.56 ± 23.60 | | ✓ |

ตารางที่ 4.31 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติดชนิด Cobalt stearate กับโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมเพาเนนต์

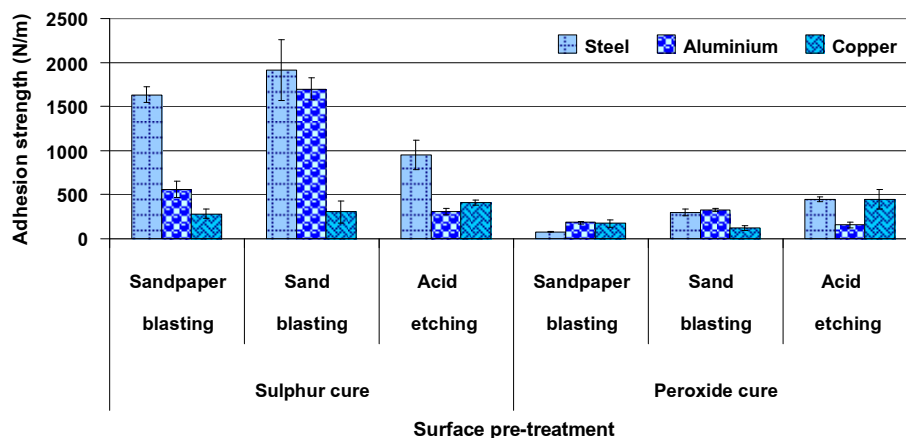
| Vulcanization system | Surface pre-treatment | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------|--------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| | | | | | | |
| Sulphur cure | Sandpaper blasting | 1634.31 ± 89.45 | 556.56 ± 92.36 | 284.15 ± 47.69 | | ✓ |
| | Sand blasting | 1912.36 ± 342.16 | 1699.93 ± 124.09 | 305.05 ± 128.41 | | ✓ |
| | Acid etching | 950.73 ± 168.04 | 306.96 ± 39.35 | 411.01 ± 29.84 | | ✓ |
| | Sandpaper blasting | 79.04 ± 7.21 | 182.52 ± 10.92 | 174.23 ± 39.45 | | ✓ |
| | Sand blasting | 299.53 ± 33.85 | 324.53 ± 16.27 | 122.22 ± 26.45 | | ✓ |
| | Acid etching | 446.47 ± 30.49 | 155.14 ± 34.75 | 446.06 ± 109.17 | | ✓ |

ตารางที่ 4.32 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติดชนิด Cobalt stearate กับโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นทางการค้า

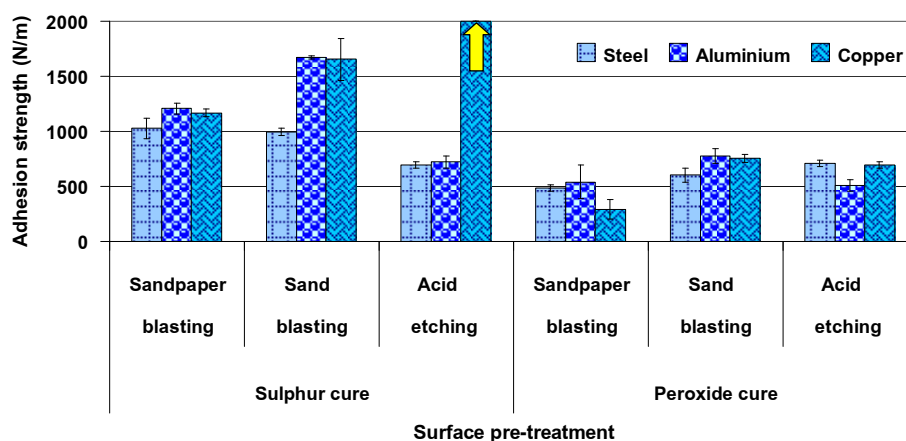
| Vulcanization system | Surface pre-treatment | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------|---------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| | | | | | | |
| Sulphur cure | Sandpaper blasting | 1028.70 ± 93.78 | 1206.58 ± 49.07 | 1167.55 ± 31.36 | | ✓ |
| | Sand blasting | 993.46 ± 33.45 | 1670.86 ± 13.51 | 1654.15 ± 188.56 | | ✓ |
| | Acid etching | 692.11 ± 31.24 | 720.28 ± 54.80 | 2897.37 ± 319.38 | | ✓ |
| | Sandpaper blasting | 484.75 ± 32.26 | 540.31 ± 154.30 | 289.76 ± 90.22 | | ✓ |
| | Sand blasting | 603.91 ± 63.11 | 775.69 ± 65.28 | 753.71 ± 39.07 | | ✓ |
| | Acid etching | 708.48 ± 31.16 | 508.09 ± 50.91 | 693.68 ± 28.99 | | ✓ |



(a) Without primer



(b) With primer compound solution



(c) With primer chemlok205A

รูปที่ 4.14 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติดชนิด Cobalt stearate กับโลหะชนิดต่างๆ

ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติด Cobalt stearate ที่เตรียมขึ้นด้วยกระบวนการวัลคาไนซ์แบบกัมมะถันและเปอร์ออกไซด์ กับโลหะทั้ง 3 ชนิด ที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีทางกล (ขัดด้วยกระดาษทรายและฟันททราย) และเตรียมผิวด้วยวิธีทางเคมี (กัดผิวด้วยกรด) โดยปราศจากสารรองพื้น และรองพื้นโลหะด้วยสารรองพื้นจากยางคอมพอนด์และสารรองพื้นทางการค้า แสดงดังตารางที่ 4.30–4.32 และรูปที่ 4.14 พบว่าลักษณะของความลัมเหลวที่เกิดขึ้น เป็นแบบแอดฮีซีฟทุกชนิดของโลหะ ทุกวิธีการของการเตรียมผิว และทุกชนิดของสารรองพื้น เมื่อพิจารณาความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่ปราศจากสารรองพื้น ดังแสดงในรูปที่ 4.14 (a) พบว่าการเตรียมผิวโลหะโดยการฟันททรายส่งผลให้การติดประสานระหว่างยางกับโลหะทั้ง 3 ชนิด มีค่าสูงกว่าการเตรียมผิวด้วยวิธีการขัดด้วยกระดาษทราย และการกัดผิวด้วยกรด ทั้งในระบบการวัลคาไนซ์แบบกัมมะถันและเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเป็นผลเนื่องจากการเตรียมผิวโดยการฟันททรายสามารถทำให้ผิวของโลหะเกิดความขรุขระที่สม่ำเสมอมากกว่าการเตรียม ผิวโดยการขัดด้วยกระดาษทราย และการกัดผิวด้วยกรด จึงทำให้ยางคอมพอนด์สามารถไหลเข้าไปภายในช่องว่างของพื้นผิวโลหะ และเกิดการยึดติดทางกล (mechanical interlocking) ขึ้นได้มากกว่าเช่นกัน ในการวัลคาไนซ์ด้วยระบบกัมมะถัน พบว่าการเตรียมผิวโลหะด้วยวิธีการฟันททราย มีผลทำให้ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะอะลูมิเนียมมีค่าสูงสุด สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานของโลหะกับยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าการเตรียมผิวโลหะด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน ไม่ได้ส่งผลต่อความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะทั้ง 3 ชนิดมากนัก โดยที่การเตรียมผิวด้วยการฟันททรายมีแนวโน้มในการติดประสานสูงที่สุด เมื่อพิจารณาชนิดของโลหะแล้ว พบว่าโลหะอะลูมิเนียมมีการติดประสานสูงกว่าโลหะชนิดอื่น ๆ เช่นเดียวกับในระบบการวัลคาไนซ์แบบกัมมะถันข้างต้น นอกจากนี้ยังพบว่าความแข็งแรงในการติดประสานของยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกัมมะถันมีค่าสูงกว่ายางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์อย่างชัดเจนทุกชนิดของโลหะ และทุกวิธีการของการเตรียมผิว

สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมพอนด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 (b) ในระบบการวัลคาไนซ์แบบกัมมะถัน พบว่าการเตรียมผิวโลหะทั้ง 3 ชนิด ด้วยวิธีการฟันททราย มีค่าความแข็งแรงในการติดประสานที่สูงกว่าการเตรียมผิวด้วยวิธีการอื่น เนื่องจากการเตรียมผิวด้วยวิธีการฟันททรายเป็นวิธีการที่ทำให้ผิวของโลหะมีความขรุขระมากที่สุด และยังมีความสม่ำเสมอทั่วทั้งผิวหน้า ดังแสดงในรูปที่ 4.1 จึงเป็นเหตุทำให้ความแข็งแรงในการติดประสานของโลหะที่เตรียมผิวด้วยวิธีฟันททรายมีค่าสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงในการติดประสานของโลหะแต่ละชนิด พบว่าโลหะเหล็กมีความแข็งแรงในการติดประสานสูงที่สุด ทุกวิธีของการเตรียมผิว สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานของยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ พบว่ามีแนวโน้มในการติดประสานที่ต่ำกว่ายางวัลคาไนซ์ด้วยระบบกัมมะถัน ทุกชนิดของโลหะ และทุกวิธีของการเตรียมผิว นอกจากนี้

ยังพบว่าในระบบการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์ การเตรียมผิวโดยการกัดผิวด้วยกรด มีผลทำให้การติดประสานของโลหะเหล็ก และทองแดง มีแนวโน้มที่เท่ากัน และยังมีค่าสูงกว่าการติดประสานกับโลหะอะลูมิเนียมอย่างเห็นได้ชัด

สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานของโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้น Chemlok 205A ดังในรูปที่ 4.14 (c) แสดงให้เห็นว่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถัน มีความสามารถในการเกิดการยึดติดทางกลได้อย่างแข็งแรง กับโลหะทั้ง 3 ชนิด และยังทำให้มีค่าสูงกว่าการวัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์อีกด้วย สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานของยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถัน พบว่าโลหะทองแดงที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีทางเคมี คือการกัดผิวด้วยกรด มีค่าการติดประสานสูงสุดอย่างชัดเจน ซึ่งจากผลการทดลองดังกล่าวอาจจะเป็นไปได้ว่าความแข็งแรงที่เกิดขึ้นจากการเตรียมผิวด้วยวิธีทางเคมีอาจเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารรองพื้น Chemlok 205A กับสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมผิวโลหะเกิดการตกค้างบริเวณผิวของโลหะทองแดง หรืออาจเกิดจากการตกค้างของตัวทำละลายในสารรองพื้น Chemlok 205A ที่ฝังอยู่ภายในช่องว่างของพื้นผิวโลหะที่มีรูลึกและขนาดใหญ่ แล้วไม่สามารถระเหยออกได้หมด จึงส่งผลทำให้ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างโลหะทองแดงกับยางมีค่าสูงกว่าการเตรียมผิวด้วยวิธีทางกล สำหรับการติดประสานของยางในระบบเปอร์ออกไซด์กับโลหะ พบว่าโลหะอะลูมิเนียม มีแนวโน้มในการติดประสานสูงสุด เมื่อผ่านการเตรียมผิวโดยการพ่นทราย เช่นเดียวกับการติดประสานของโลหะที่ปราศจากสารรองพื้น ดังแสดงในรูปที่ 4.14 (a)

4.2.2.4 ผลของชนิดสารรองพื้นต่อความสามารถในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ

ศึกษาผลของการใช้สารรองพื้น 2 ชนิด ได้แก่ สารรองพื้นที่เตรียมขึ้นจากยางคอมพอนด์ (primer compound) และสารรองพื้นทางการค้า (primer chemlok 205A) โดยทำการเคลือบผิวหน้าโลหะด้วยวิธีการจุ่มแผ่นโลหะที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีทางกลและทางเคมี ตามหัวข้อ 3.3.1.4 ลงในสารรองพื้นก่อนนำไปยึดติดกับยางคอมพอนด์ที่เตรียมได้จากหัวข้อ 3.3.1.1 โดยมีปริมาณยางและสารเคมี ดังแสดงในตารางที่ 3.2 และ 3.3 เพื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงในการติดประสานกับโลหะที่ปราศจากสารรองพื้น ซึ่งขั้นตอนในการเตรียมชิ้นทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.2 แล้วทำการวัลคาไนซ์ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเบ้าที่อุณหภูมิ 150°C (วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถัน) และอุณหภูมิ 160°C (วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์) และทดสอบความสามารถในการติดประสานแบบบ็อก ด้วยมุม 90 องศา ตามหัวข้อ 3.3.4.2 ซึ่งผลของชนิดสารรองพื้นที่ยึดติดกับโลหะที่เตรียมผิวด้วยวิธีทางกล (ขัดด้วยกระดาษทราย) แสดงดังตารางที่ 4.33–4.36 และรูปที่ 4.15 เตรียมผิวด้วยวิธีทางกล (พ่นทราย) แสดงดังตารางที่ 4.37–4.40

และรูปที่ 4.16 และเตรียมผิวด้วยวิธีทางเคมี (กัดผิวด้วยกรด) แสดงดังตารางที่ 4.41–4.44 และรูปที่ 4.17 ตามลำดับดังนี้

1) การติดประสานระหว่างยางกับโลหะชนิดต่างๆ ที่เตรียมผิวด้วยวิธีทางกล (ขัดด้วยกระดาษทราย)

ตารางที่ 4.33 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางปราศจากสารเสริมการยึดติดกับโลหะ (ขัดด้วยกระดาษทราย)

| Vulcanization system | Type of primer | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|-----------------|-------------------------|-------------------|--------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | Without primer | 303.14 ± 22.29 | 232.15 ± 83.41 | 311.99 ± 46.31 | | ✓ |
| | Primer compound | 382.11 ± 54.80 | 376.09 ± 38.49 | 321.16 ± 75.32 | | ✓ |
| | Primer chemlok | 695.28 ± 55.51 | 615.03 ± 28.98 | 691.76 ± 120.05 | | ✓ |
| | Without primer | 77.34 ± 2.86 | 149.43 ± 22.58 | 154.32 ± 29.17 | | ✓ |
| | Primer compound | 110.84 ± 4.46 | 151.58 ± 37.48 | 179.02 ± 5.20 | | ✓ |
| | Primer chemlok | 572.69 ± 54.59 | 504.47 ± 10.92 | 600.63 ± 12.60 | | ✓ |

ตารางที่ 4.34 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติดชนิด Zinc diacrylate กับโลหะ (ขัดด้วยกระดาษทราย)

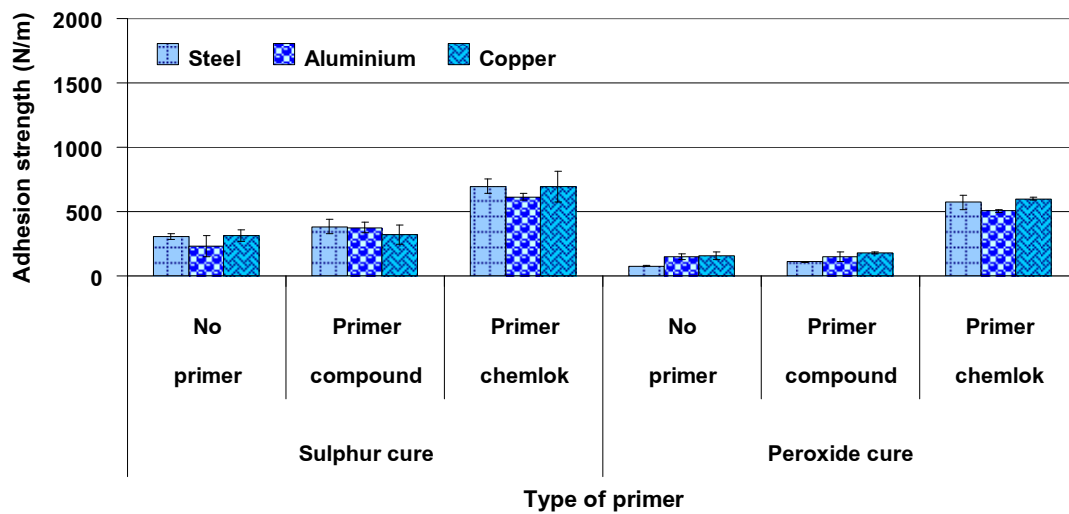
| Vulcanization system | Type of primer | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|-----------------|-------------------------|---------------------|---------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | Without primer | 212.14 ± 15.18 | 607.16 ± 40.80 | 471.35 ± 52.44 | | ✓ |
| | Primer compound | 430.67 ± 14.98 | 573.87 ± 46.09 | 530.47 ± 40.29 | | ✓ |
| | Primer chemlok | 1056.43 ± 55.05 | 1350.50 ± 157.30 | 1104.86 ± 133.62 | | ✓ |
| Peroxide cure | Without primer | 1199.38 ± 73.61 | 1030.79 ± 294.47 | R* | | ✓ |
| | Primer compound | 1108.13 ± 104.31 | 918.61 ± 115.56 | R* | | ✓ |
| | Primer chemlok | 505.33 ± 30.89 | 570.25 ± 87.09 | R* | | ✓ |

ตารางที่ 4.35 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติดชนิด Zinc dimethacrylate กับโลหะ (ขั้วด้วยกระดาษทราย)

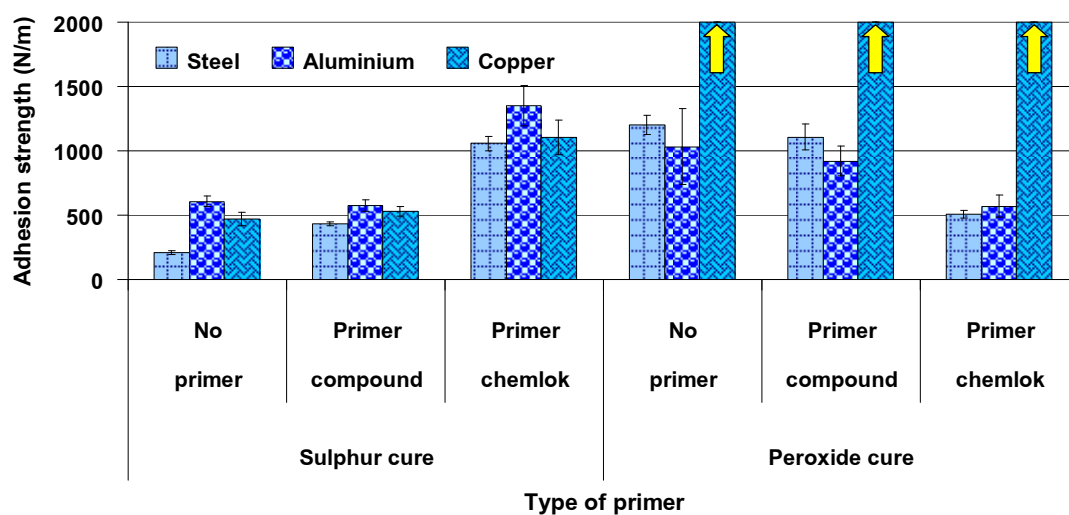
| Vulcanization system | Type of primer | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|-----------------|-------------------------|-------------------|---------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | Without primer | 263.05 ± 16.40 | 218.73 ± 31.95 | 420.28 ± 75.17 | | ✓ |
| | Primer compound | 393.16 ± 39.50 | 305.15 ± 83.72 | 464.09 ± 95.03 | | ✓ |
| | Primer chemlok | 980.76 ± 115.53 | 803.70 ± 41.85 | 1297.74 ± 137.19 | | ✓ |
| | Without primer | 419.19 ± 10.13 | 437.51 ± 34.52 | 194.13 ± 46.19 | | ✓ |
| Peroxide cure | Primer compound | 515.65 ± 10.90 | 470.85 ± 53.79 | 436.01 ± 94.01 | | ✓ |
| | Primer chemlok | 558.18 ± 24.31 | 534.09 ± 51.54 | 530.74 ± 39.37 | | ✓ |

ตารางที่ 4.36 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติดชนิด Cobalt stearate กับโลหะ (ขัดด้วยกระดาษทราย)

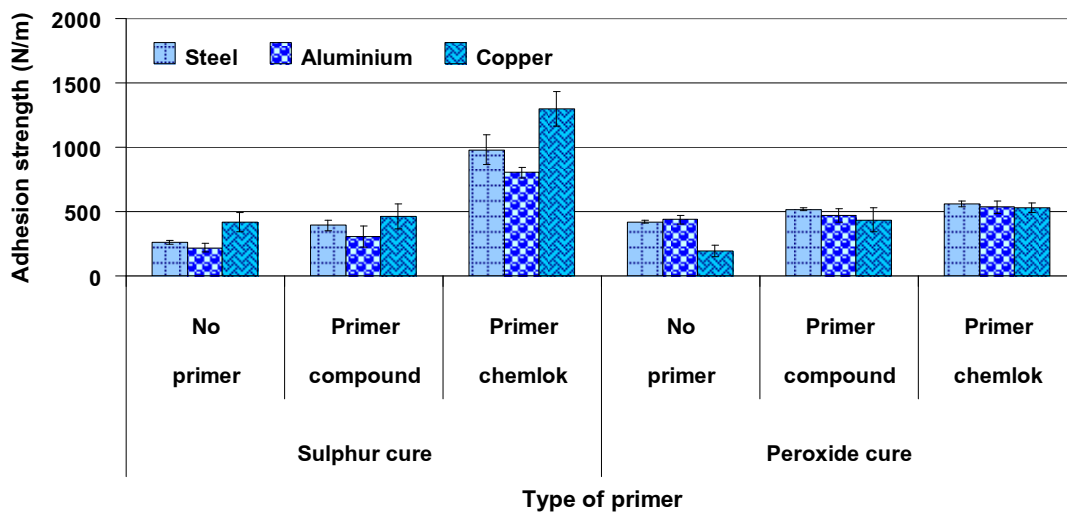
| Vulcanization system | Type of primer | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|-----------------|-------------------------|--------------------|--------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | Without primer | 1071.72 ± 99.30 | 195.45 ± 58.35 | 211.86 ± 14.50 | | ✓ |
| | Primer compound | 1634.31 ± 89.45 | 556.56 ± 92.36 | 284.15 ± 47.69 | | ✓ |
| | Primer chemlok | 1028.70 ± 93.78 | 1206.58 ± 49.07 | 1167.55 ± 31.36 | | ✓ |
| Peroxide cure | Without primer | 84.14 ± 10.21 | 183.59 ± 33.60 | 117.32 ± 23.53 | | ✓ |
| | Primer compound | 79.04 ± 7.21 | 182.52 ± 10.92 | 174.23 ± 39.45 | | ✓ |
| | Primer chemlok | 484.75 ± 32.26 | 540.31 ± 154.30 | 289.76 ± 90.22 | | ✓ |



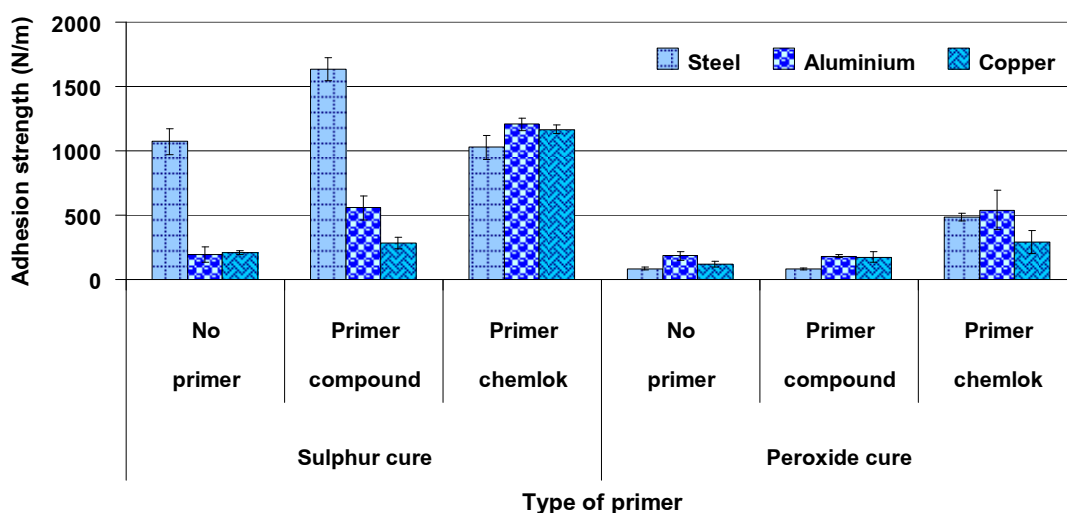
(a) Without adhesion promoter



(b) Zinc diacrylate (ZDA)



(c) Zinc dimethacrylate (ZDMA)



(d) Cobalt stearate

รูปที่ 4.15 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะ (ขัดด้วยกระดาษทราย)

ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างโลหะเหล็ก อะลูมิเนียม และทองแดงที่เตรียมผิวโดยการขัดด้วยกระดาษทรายทั้งที่ใช้และไม่ใช้สารรองพื้น กับยางวัลคาไนซ์ด้วยระบบกัมมะถัน และเปอร์ออกไซด์ ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.33–4.36 และรูปที่ 4.15 พบว่าลักษณะของความล้มเหลวที่เกิดขึ้นเป็นแบบแอดฮีซีฟ ทุกชนิดของสารรองพื้น ทุกชนิดของโลหะ และทุกชนิดของสารเสริมการยึดติด ยกเว้น การติดประสานระหว่างโลหะ ทองแดงกับยางใส่สารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate ในระบบการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์ที่เกิดความ

ล้มเหลวในการติดประสานเป็นแบบโคฮีซีฟ เมื่อพิจารณาค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างโลหะที่เตรียมผิวโดยการขัดด้วยกระดาษทราย และรองพื้นด้วยสารรองพื้นชนิดต่างๆ กับยางที่ปราศจากสารเสริมการยึดติด ดังแสดงในรูปที่ 4.15 (a) พบว่าสารรองพื้นมีผลทำให้ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะทั้ง 3 ชนิดมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะที่ปราศจากสารรองพื้น โดยสารรองพื้นทางการค้าให้ความแข็งแรงในการติดประสานของโลหะสูงกว่าโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมปานด์ และโลหะที่ปราศจากสารรองพื้นตามลำดับ ทั้งในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน และเปอร์ออกไซด์ ซึ่งโลหะเหล็ก อะลูมิเนียม และทองแดงมีความแข็งแรงในการติดประสานกับยางวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันใกล้เคียงกัน และมีค่าการติดประสานสูงสุดเมื่อรองพื้นโลหะด้วยสารรองพื้น Chemlok 205A สำหรับยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าโลหะทั้ง 3 ชนิด มีค่าการติดประสานที่ใกล้เคียงกันเมื่อรองพื้นโลหะด้วยสารรองพื้น Chemlok 205A โดยที่การติดประสานของโลหะเหล็กและทองแดงมีแนวโน้มในการติดประสานสูงสุด เช่นเดียวกับการติดประสานของยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถัน

สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างโลหะที่เตรียมผิวโดยการขัดด้วยกระดาษทราย และรองพื้นด้วยสารรองพื้นชนิดต่างๆ กับยางที่ใส่สารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate ดังแสดงในรูปที่ 4.15 (b) พบว่าในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน มีแนวโน้มในการติดประสานเช่นเดียวกับการติดประสานของยางที่ปราศจากสารเสริมการยึดติด ดังแสดงในรูปที่ 4.15 (a) กล่าวคือความแข็งแรงในการติดประสานมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อรองพื้นโลหะด้วยสารรองพื้นจากยางคอมปานด์และสารรองพื้นทางการค้า ตามลำดับ เนื่องจากสารรองพื้นสามารถไหลเข้าไปภายในช่องว่างของพื้นผิวโลหะและเกิดการล็อกติดกับพื้นผิวของโลหะ ดังนั้นเมื่อนำยางคอมปานด์มาวัลคาไนซ์ให้ยึดติดกับโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้น จึงส่งผลให้ความแข็งแรงในการติดประสานมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยที่สารรองพื้น Chemlok 205A สามารถเพิ่มพันธะหรือแรงยึดเหนี่ยวในการยึดติดให้กับโลหะทั้ง 3 ชนิด จึงมีผลทำให้ความแข็งแรงในการติดประสานมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อนำมายึดติดกับยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถัน โดยเฉพาะการติดประสานของโลหะอะลูมิเนียม สำหรับการติดประสานของยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะเหล็กและอะลูมิเนียมมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่การติดประสานของโลหะทองแดง พบว่าสารรองพื้นไม่มีผลต่อความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติดกับโลหะทองแดง เนื่องจากสารรองพื้นไม่มีผลทำให้ค่าความแข็งแรงในการติดประสานมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง อีกทั้งยังทำให้เกิดความล้มเหลวในการติดประสานแบบโคฮีซีฟ อีกด้วย ซึ่งเป็นสิ่งยืนยันได้ว่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะทองแดงมีค่าสูงมาก จนไม่สามารถแยกแผ่นยางออกจากแผ่นโลหะได้ จึงทำให้เกิดความล้มเหลวขึ้นภายในเนื้อยาง

สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างโลหะที่เตรียมผิวโดยการขัดด้วยกระดาษทราย และรองพื้นด้วยสารรองพื้นชนิดต่างๆ กับยางที่ใส่สารเสริมการยึดติด Zinc dimethacrylate ดังแสดงในรูปที่ 4.15 (c) พบว่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างโลหะทั้ง 3 ชนิดกับยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถัน และเปอร์ออกไซด์มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน กล่าวคือ สารรองพื้นมีผลทำให้ความแข็งแรงในการติดประสานของโลหะเหล็ก อะลูมิเนียม และทองแดงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยที่สารรองพื้น Chemlok 205A มีผลทำให้ความแข็งแรงในการติดประสานมีค่าสูงสุดโดยเฉพาะการติดประสานของโลหะทองแดง ในขณะที่การติดประสานของยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าค่าความแข็งแรงในการติดประสานของโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นชนิดต่างๆ มีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน โดยที่ความแข็งแรงในการติดประสานของโลหะทั้ง 3 ชนิด มีค่าการติดประสานสูงสุดเมื่อรองพื้นโลหะด้วยสารรองพื้น Chemlok 205A เช่นเดียวกับการติดประสานของยางที่ปราศจากสารเสริมการยึดติด ดังแสดงในรูปที่ 4.15 (a)

สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างโลหะที่เตรียมผิวโดยการขัดด้วยกระดาษทราย และรองพื้นด้วยสารรองพื้นชนิดต่างๆ กับยางที่ใส่สารเสริมการยึดติด Cobalt stearate ดังแสดงในรูปที่ 4.15 (d) พบว่าสารรองพื้นมีผลในการเพิ่มความแข็งแรงของการติดประสานระหว่างยางกับโลหะทั้ง 3 ชนิด ทั้งในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถันและเปอร์ออกไซด์ โดยในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน พบว่าสารรองพื้นเตรียมขึ้นจากยางคอมพอนด์มีผลทำให้โลหะเหล็กสามารถเกิดการยึดติดกับยางใส่สารเสริมการยึดติด Cobalt stearate ได้สูงสุด สำหรับยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ กลับพบว่าสารรองพื้น Chemlok 205A มีผลทำให้ความแข็งแรงในการติดประสานมีค่าสูงสุดกับทุกชนิดของโลหะ เมื่อเทียบกับโลหะที่ปราศจากสารรองพื้น และรองพื้นด้วยสารรองพื้นเตรียมขึ้นจากยางคอมพอนด์ โดยเฉพาะการติดประสานของโลหะอะลูมิเนียม นอกจากนี้ยังพบว่าความแข็งแรงในการติดประสานของยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันมีค่าสูงกว่ายางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ ทุกชนิดของโลหะ ทั้งที่ใช้และไม่ใช้สารรองพื้น

2) การติดประสานระหว่างยางกับโลหะชนิดต่างๆ ที่เตรียมผิวด้วยวิธีทางกล (พ่นทราย)

ตารางที่ 4.37 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางปราศจากสารเสริมการยึดติดกับโลหะ (พ่นทราย)

| Vulcanization system | Type of primer | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|-----------------|-------------------------|--------------------|-------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| | | | | | | |
| Sulphur cure | Without primer | 512.53 ± 40.47 | 472.72 ± 109.43 | 314.65 ± 9.22 | | ✓ |
| | Primer compound | 461.80 ± 22.66 | 471.94 ± 19.63 | 399.85 ± 38.92 | | ✓ |
| | Primer chemlok | 848.28 ± 38.57 | 836.11 ± 76.67 | 944.64 ± 54.47 | | ✓ |
| | Without primer | 289.25 ± 21.96 | 284.00 ± 45.41 | 319.08 ± 26.93 | | ✓ |
| | Primer compound | 309.55 ± 6.16 | 359.64 ± 43.74 | 368.32 ± 29.31 | | ✓ |
| | Primer chemlok | 852.34 ± 107.46 | 979.41 ± 4.81 | 955.55 ± 39.46 | | ✓ |

ตารางที่ 4.38 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติดชนิด Zinc diacrylate กับโลหะ (พ่นทราย)

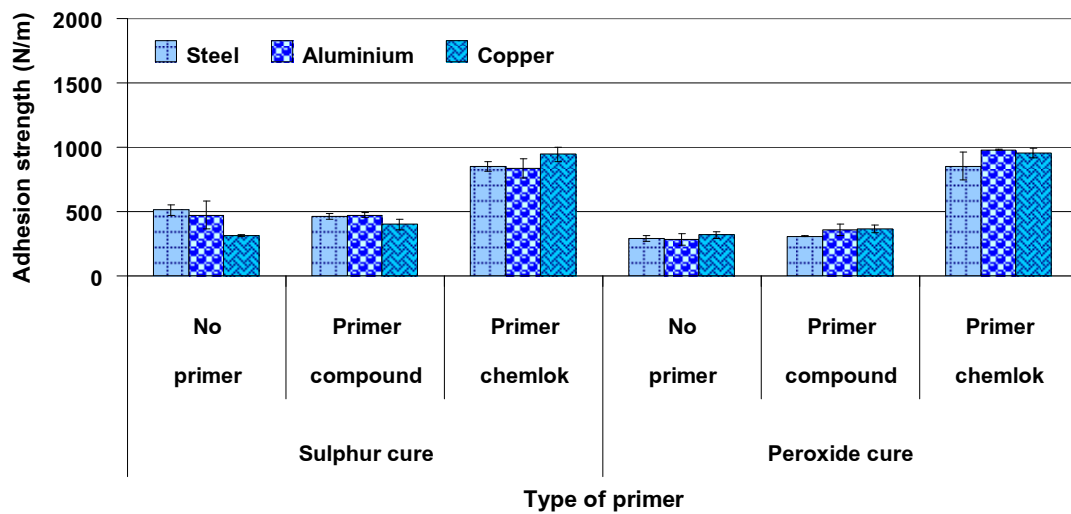
| Vulcanization system | Type of primer | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|-----------------|-------------------------|--------------------|---------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | Without primer | 847.22 ± 35.26 | 865.91 ± 85.80 | 1281.28 ± 7.28 | | ✓ |
| | Primer compound | 878.40 ± 35.52 | 769.56 ± 61.98 | 1225.48 ± 40.18 | | ✓ |
| | Primer chemlok | 1142.35 ± 69.63 | 1410.94 ± 93.61 | 1674.74 ± 223.79 | | ✓ |
| Peroxide cure | Without primer | 2530.60 ± 178.73 | 636.06 ± 81.91 | R* | | ✓ |
| | Primer compound | 1956.65 ± 245.50 | 909.05 ± 40.78 | R* | | ✓ |
| | Primer chemlok | 837.36 ± 18.83 | 1174.01 ± 35.84 | R* | | ✓ |

ตารางที่ 4.39 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติดชนิด Zinc dimethacrylate กับโลหะ (พันทราย)

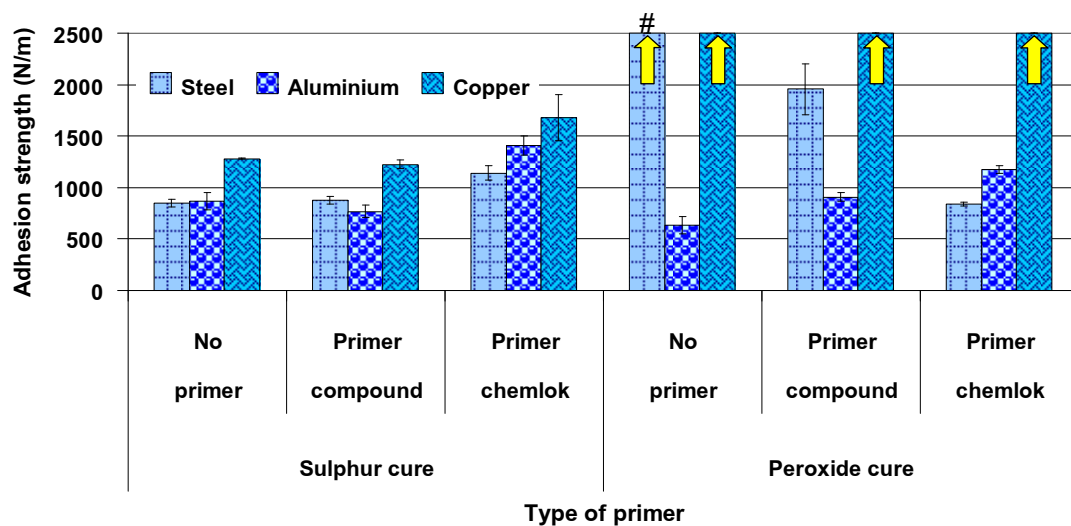
| Vulcanization system | Type of primer | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|-----------------|-------------------------|---------------------|---------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| | | | | | | |
| Sulphur cure | Without primer | 729.08 ± 66.09 | 451.78 ± 74.82 | 403.55 ± 54.57 | | ✓ |
| | Primer compound | 716.14 ± 51.47 | 643.72 ± 26.27 | 411.11 ± 41.14 | | ✓ |
| | Primer chemlok | 978.19 ± 21.10 | 1032.38 ± 104.40 | 1269.13 ± 158.75 | | ✓ |
| | Without primer | 602.21 ± 55.92 | 630.43 ± 112.95 | 639.20 ± 39.13 | | ✓ |
| | Primer compound | 672.13 ± 98.77 | 675.12 ± 86.38 | 549.35 ± 126.19 | | ✓ |
| | Primer chemlok | 808.09 ± 44.79 | 987.98 ± 62.49 | 714.86 ± 55.85 | | ✓ |

ตารางที่ 4.40 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติดชนิด Cobalt stearate กับโลหะ (พ่นทราย)

| Vulcanization system | Type of primer | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|-----------------|-------------------------|---------------------|---------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | Without primer | 1246.60 ± 58.94 | 1637.36 ± 157.85 | 474.59 ± 47.46 | | ✓ |
| | Primer compound | 1912.36 ± 342.16 | 1699.93 ± 124.09 | 305.05 ± 128.41 | | ✓ |
| | Primer chemlok | 993.46 ± 33.45 | 1670.86 ± 13.51 | 1654.15 ± 188.56 | | ✓ |
| | Without primer | 232.84 ± 20.82 | 316.63 ± 31.07 | 195.39 ± 14.42 | | ✓ |
| Peroxide cure | Primer compound | 299.53 ± 33.85 | 324.53 ± 16.27 | 122.22 ± 26.45 | | ✓ |
| | Primer chemlok | 603.91 ± 63.11 | 775.69 ± 65.28 | 753.71 ± 39.07 | | ✓ |

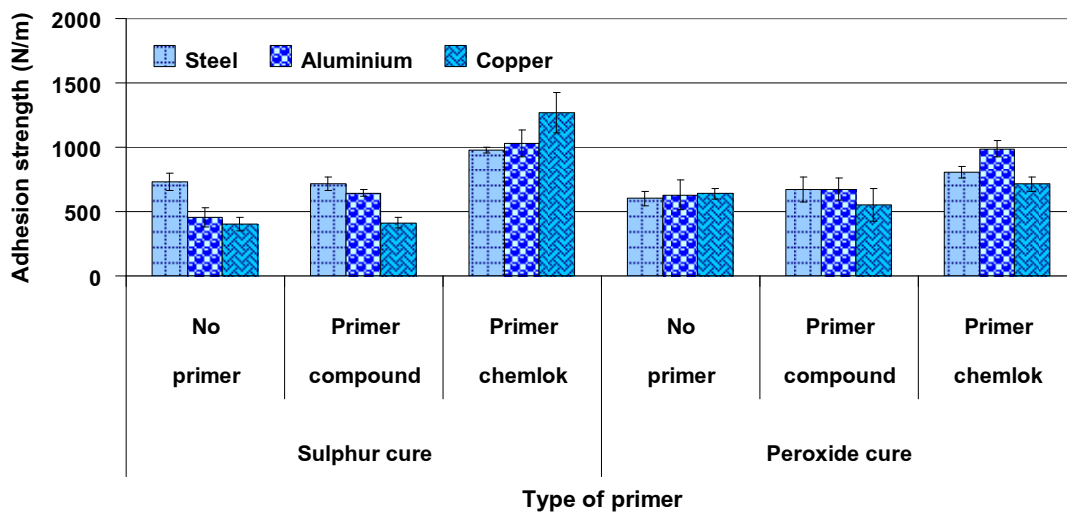


(a) Without adhesion promoter

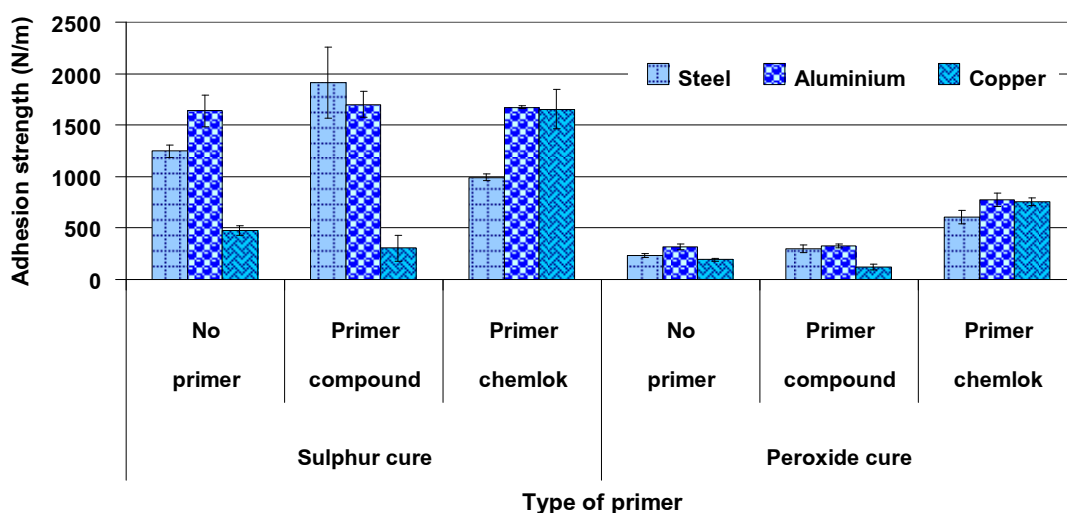


(b) Zinc diacrylate (ZDA)

หมายเหตุ # : Adhesive failure



(c) Zinc dimethacrylate (ZDMA)



(d) Cobalt stearate

รูปที่ 4.16 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ (พันทราย)

ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างโลหะเหล็ก อะลูมิเนียม และทองแดงที่เตรียมผิวโดยการพันทรายทั้งที่ใช้และไม่ใช้สารรองพื้น กับยางวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันและเปอร์ออกไซด์ ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.37–4.40 และรูปที่ 4.16 พบว่าลักษณะของความล้มเหลวที่เกิดขึ้นเป็นแบบแอดฮีซีฟ ทุกชนิดของสารรองพื้น ทุกชนิดของโลหะ และทุกชนิดของสารเสริมการยึดติด ยกเว้น การติดประสานระหว่างโลหะ ทองแดงกับยางใส่สารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate ในระบบการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์ที่เกิดความล้มเหลว

ในการติดประสานเป็นแบบโคฮีซีฟ เช่นเดียวกับโลหะที่เตรียมผิวโดยการขัดด้วยกระดาษทราย เมื่อพิจารณาค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นชนิดต่างๆ กับยางที่ปราศจากสารเสริมการยึดติด ดังแสดงในรูปที่ 4.16 (a) พบว่าสารรองพื้นมีผลทำให้ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยสารรองพื้น Chemlok 205A มีแนวโน้มในการเพิ่มความแข็งแรงของการติดประสานระหว่างยางกับโลหะได้สูงสุด รองลงมาคือสารรองพื้นที่เตรียมขึ้นจากยางคอมพอนด์ และโลหะที่ปราศจากสารรองพื้น ทั้งในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถันและเปอร์ออกไซด์ โดยเฉพาะการรองพื้นด้วยสารรองพื้น Chemlok 205A มีผลทำให้ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะทองแดงมีค่าสูงสุด เมื่อใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานกับยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าสารรองพื้น Chemlok 205A มีส่วนในการเพิ่มความแข็งแรงของการติดประสานในโลหะทั้ง 3 ชนิด เมื่อเปรียบเทียบกับการรองพื้นด้วยสารรองพื้นที่เตรียมขึ้นจากยางคอมพอนด์ และโลหะที่ปราศจากสารรองพื้นอย่างชัดเจน

สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานกับยางใส่สารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate ดังแสดงในรูปที่ 4.16 (b) พบว่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นชนิดต่างๆ กับยางในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถันและเปอร์ออกไซด์ มีแนวโน้มในการติดประสานที่เป็นแนวทางเดียวกัน กล่าวคือ ความแข็งแรงในการติดประสานมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่อรองพื้นโลหะด้วยสารรองพื้น Chemlok 205A โดยเฉพาะการติดประสานของโลหะทองแดง นอกจากนี้ยังพบว่า ในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน ความล้มเหลวของการติดประสานระหว่างยางกับโลหะทองแดงที่รองพื้นด้วย Chemlok 205A เกิดความล้มเหลวแบบแอดฮีซีฟ ในขณะที่ระบบการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์ ความล้มเหลวในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะทองแดงที่เกิดขึ้นเป็นแบบโคฮีซีฟ ทุกชนิดของสารรองพื้น

สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานของโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นชนิดต่างๆ กับยางที่ใส่สารเสริมการยึดติด Zinc dimethacrylate ดังแสดงในรูปที่ 4.16 (c) พบว่าในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะทั้ง 3 ชนิด มีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อรองพื้นโลหะด้วยสารรองพื้น Chemlok 205A โดยที่โลหะทองแดงมีค่าการติดประสานสูงสุด เช่นเดียวกับการติดประสานของยางที่ใส่สารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate ดังแสดงในรูปที่ 4.16 (b) ในส่วนของการติดประสานกับยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าค่าความแข็งแรงในการติดประสานของโลหะที่ปราศจากสารรองพื้น และโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมพอนด์มีแนวโน้มในการติดประสานที่ใกล้เคียงกัน ทุกชนิดของโลหะ แต่ความแข็งแรงในการติดประสานของโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้น Chemlok 205A มีความแข็งแรงในการติดประสานสูงกว่าสารรองพื้นชนิดอื่นๆ โดยที่โลหะอะลูมิเนียมมีความแข็งแรงในการติดประสานสูงสุด

สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานของโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นชนิดต่าง ๆ กับยางที่ใส่สารเสริมการยึดติด Cobalt stearate ดังแสดงในรูปที่ 4.16 (d) พบว่าสารรองพื้นเตรียมขึ้นจากยางคอมปานด์ มีแนวโน้มในการติดประสานกับโลหะเหล็กสูงสุดเช่นเดียวกับการติดประสานของโลหะที่เตรียมผิวโดยการขัดด้วยกระดาษทราย ดังแสดงในรูปที่ 4.15 (d) สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานของยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าการรองพื้นโลหะด้วยสารรองพื้นทางการค้า มีผลทำให้ค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะทั้ง 3 ชนิด มีค่าสูงกว่าการติดประสานของโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมปานด์ และโลหะที่ปราศจากสารรองพื้นอย่างชัดเจน โดยโลหะที่มีความแข็งแรงในการติดประสานสูงสุด ทั้งที่มีการรองพื้นและปราศจากสารรองพื้น ได้แก่ โลหะอะลูมิเนียม

3) การติดประสานระหว่างยางกับโลหะชนิดต่าง ๆ ที่เตรียมผิวด้วยวิธีทางเคมี (กัดผิวด้วยกรด)

ตารางที่ 4.41 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่าง ๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางปราศจากสารเสริมการยึดติดกับโลหะ (กัดผิวด้วยกรด)

| Vulcanization of system | Type of primer | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|-------------------------------|----------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|---------------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | Without primer | 408.90 ± 78.18 | 357.96 ± 3.28 | 343.03 ± 15.80 | | ✓ |
| | Primer compound | 714.49 ± 90.91 | 385.53 ± 22.21 | 455.39 ± 92.59 | | ✓ |
| | Primer chemlok | 515.07 ± 23.13 | 437.99 ± 76.82 | 578.98 ± 53.26 | | ✓ |
| Peroxide cure | Without primer | 288.19 ± 38.76 | 214.74 ± 27.91 | 175.49 ± 21.82 | | ✓ |
| | Primer compound | 277.09 ± 23.06 | 141.71 ± 11.47 | 182.15 ± 44.64 | | ✓ |
| | Primer chemlok | 1082.09 ± 39.80 | 576.36 ± 38.40 | 952.27 ± 89.21 | | ✓ |
| | | | | | | ✓ |

ตารางที่ 4.42 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติดชนิด Zinc diacrylate กับโลหะ (กัดผิวด้วยกรด)

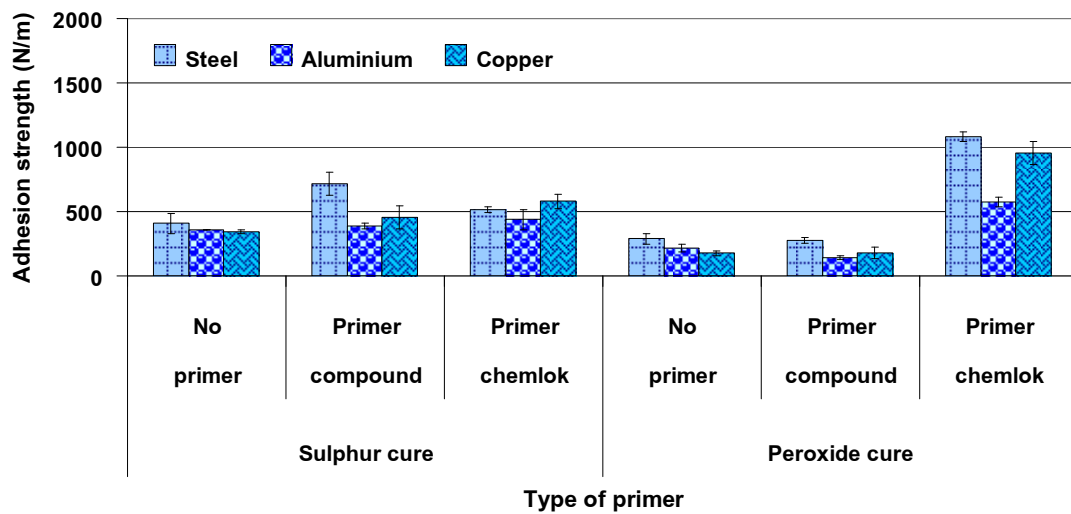
| Vulcanization system | Type of primer | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|-----------------|-------------------------|---------------------|--------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | Without primer | 1116.21 ± 58.54 | 352.51 ± 93.89 | 591.59 ± 7.84 | | ✓ |
| | Primer compound | 837.80 ± 83.45 | 526.74 ± 104.81 | 505.39 ± 36.38 | | ✓ |
| | Primer chemlok | 687.20 ± 41.62 | 713.77 ± 71.44 | 1012.57 ± 42.07 | | ✓ |
| Peroxide cure | Without primer | 1164.22 ± 208.02 | 1360.99 ± 204.85 | R* | | ✓ |
| | Primer compound | 617.24 ± 157.88 | 702.46 ± 85.55 | R* | | ✓ |
| | Primer chemlok | 825.88 ± 36.38 | 737.12 ± 108.14 | R* | | ✓ |

ตารางที่ 4.43 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติดชนิด Zinc dimethacrylate กับโลหะ (กััดด้วยกรด)

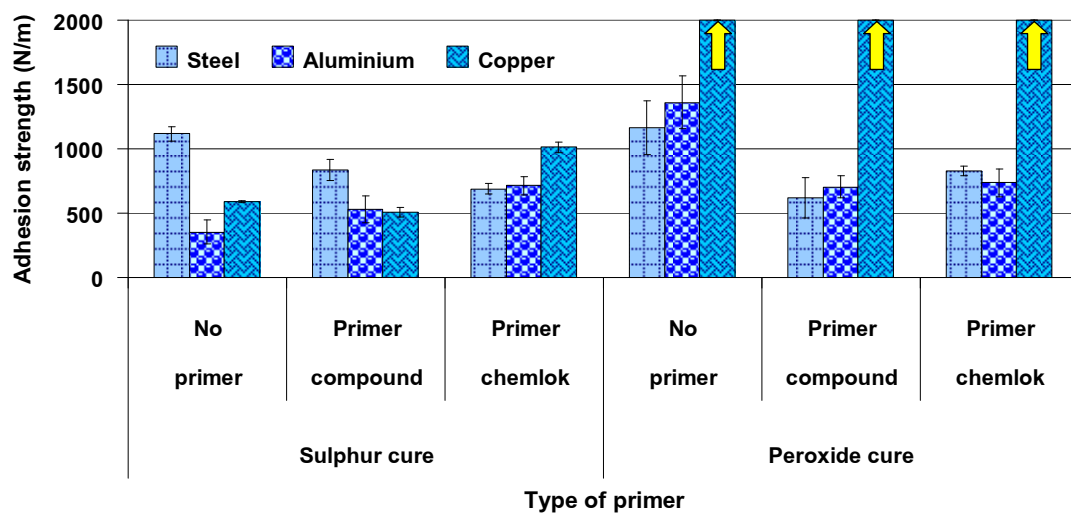
| Vulcanization system | Type of primer | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|-----------------|-------------------------|-------------------|--------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | Without primer | 888.63 ± 97.93 | 416.62 ± 36.83 | 555.82 ± 75.16 | | ✓ |
| | Primer compound | 935.56 ± 130.20 | 329.56 ± 35.45 | 504.57 ± 110.78 | | ✓ |
| | Primer chemlok | 439.49 ± 46.09 | 761.94 ± 40.93 | 1103.28 ± 97.92 | | ✓ |
| | Without primer | 683.46 ± 47.21 | 356.18 ± 30.82 | 443.45 ± 79.81 | | ✓ |
| Peroxide cure | Primer compound | 1124.42 ± 73.08 | 365.11 ± 30.58 | 417.58 ± 26.48 | | ✓ |
| | Primer chemlok | 744.99 ± 131.28 | 880.21 ± 54.05 | 941.75 ± 79.06 | | ✓ |

ตารางที่ 4.44 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติดชนิด Cobalt stearate กับโลหะ (กัดผิวด้วยกรด)

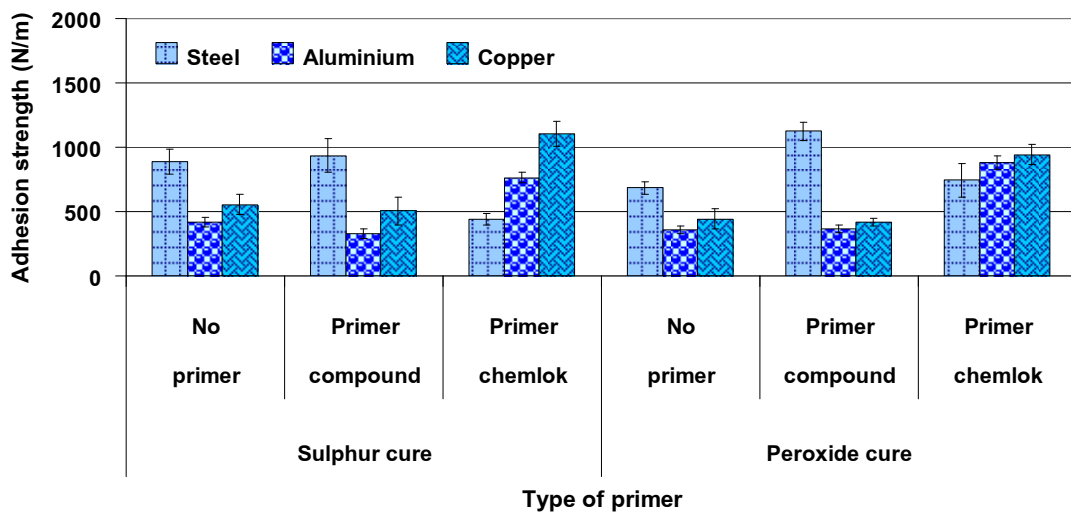
| Vulcanization system | Type of primer | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|-----------------|-------------------------|-------------------|---------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | Without primer | 698.89 ± 75.56 | 317.67 ± 17.04 | 328.67 ± 75.87 | | ✓ |
| | Primer compound | 950.73 ± 168.04 | 306.96 ± 39.35 | 411.01 ± 29.84 | | ✓ |
| | Primer chemlok | 692.11 ± 31.24 | 720.28 ± 54.80 | 2897.37 ± 319.38 | | ✓ |
| Peroxide cure | Without primer | 216.98 ± 92.14 | 160.59 ± 24.13 | 150.56 ± 23.60 | | ✓ |
| | Primer compound | 446.47 ± 30.49 | 155.14 ± 34.75 | 446.06 ± 109.17 | | ✓ |
| | Primer chemlok | 708.48 ± 31.16 | 508.09 ± 50.91 | 693.68 ± 28.99 | | ✓ |



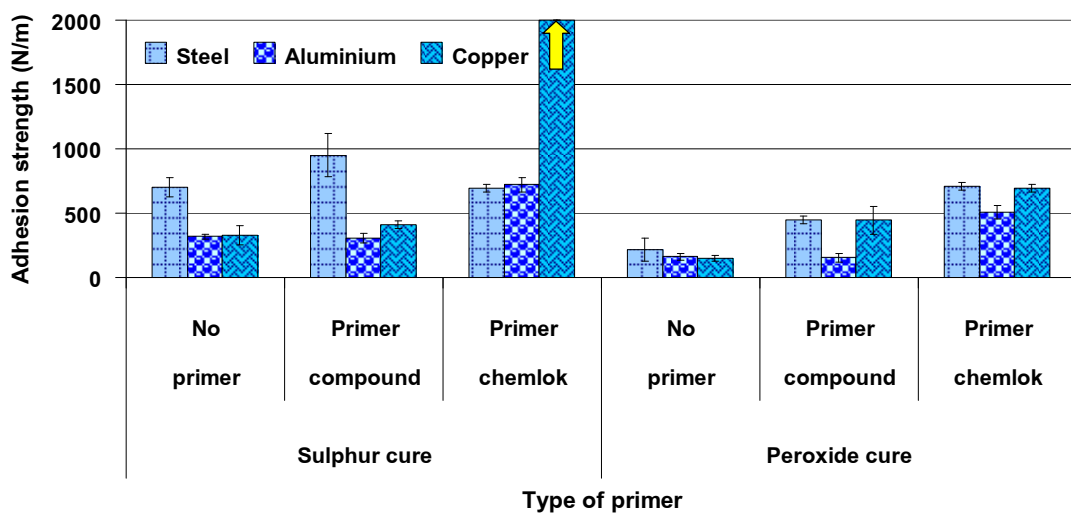
(a) Without adhesion promoter



(b) Zinc diacrylate (ZDA)



(c) Zinc dimethacrylate (ZDMA)



(d) Cobalt stearate

รูปที่ 4.17 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะ (กัดผิวด้วยกรด)

ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างโลหะเหล็ก อะลูมิเนียม และทองแดงที่เตรียมผิวโดยการกัดผิวด้วยกรด ทั้งที่ใช้และไม่ใช้สารรองพื้นกับยางวัลคาไนซ์ด้วยระบบก้ำมะถันและเปอร์ออกไซด์ ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.41–4.44 และรูปที่ 4.17 พบว่าลักษณะของความล้มเหลวที่เกิดขึ้น เป็นแบบแอดฮีซีฟ ทุกชนิดของสารรองพื้น ทุกชนิดของโลหะ และทุกชนิดของสารเสริมการยึดติด ยกเว้น การติดประสานระหว่างโลหะ ทองแดงกับยางใส่สารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate ในระบบการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์ ที่เกิด

ความล้มเหลวในการติดประสานเป็นแบบโคฮีซีฟ เมื่อพิจารณาค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นชนิดต่างๆ กับยางที่ปราศจากสารเสริมการยึดติด ดังแสดงในรูปที่ 4.17 (a) ในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน พบว่าสารรองพื้นมีผลทำให้ความแข็งแรงในการติดประสานของโลหะทั้ง 3 ชนิด มีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยที่เมื่อนำสารรองพื้นเตรียมขึ้นจากยางคอมพอนด์มาใช้ในการรองพื้นโลหะเหล็ก ส่งผลให้ความแข็งแรงในการติดประสานมีค่าสูงสุด สำหรับในระบบการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าความแข็งแรงในการติดประสานของโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นทางการค้ามีค่าสูงกว่าโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมพอนด์ และโลหะที่ปราศจากสารรองพื้นอย่างชัดเจน โดยเฉพาะการติดประสานของโลหะเหล็ก เช่นเดียวกับการติดประสานของยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถัน

สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานกับยางที่ใส่สารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate ดังแสดงในรูปที่ 4.17 (b) พบว่าความแข็งแรงในการติดประสานของยางที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน มีแนวโน้มในการติดประสานกับโลหะเหล็กได้สูงสุด โดยปราศจากสารรองพื้น นอกจากนี้ยังพบว่ายางที่เตรียมขึ้นจากกระบวนการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์มีความแข็งแรงในการติดประสานกับโลหะทองแดงสูงสุด ทุกชนิดของสารรองพื้น หรือแม้ปราศจากสารรองพื้นก็ตาม อีกทั้งยังมีพันธะในการยึดติดที่แข็งแรงมาก จนทำให้เกิดความล้มเหลวในการติดประสานแบบโคฮีซีฟอีกด้วย

สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานกับยางที่ใส่สารเสริมการยึดติด Zinc dimethacrylate ดังแสดงในรูปที่ 4.17 (c) พบว่าในระบบวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน สารรองพื้น Chemlok 205A มีผลทำให้ความแข็งแรงในการติดประสานของโลหะทองแดงมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารรองพื้นจากยางคอมพอนด์ และโลหะทองแดงที่ปราศจากสารรองพื้น อีกทั้งยังมีแนวโน้มในการติดประสานที่สูงสุดอีกด้วย ในส่วนของการติดประสานระหว่างโลหะกับยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าสารรองพื้นมีผลในการเพิ่มความแข็งแรงของการติดประสานระหว่างยางกับโลหะทุกชนิด โดยสารรองพื้นเตรียมขึ้นจากยางคอมพอนด์ได้ส่งผลให้ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะเหล็กมีค่าสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับความแข็งแรงในการติดประสานกับโลหะชนิดอื่น

สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานของโลหะ กับยางที่ใส่สารเสริมการยึดติด Cobalt stearate ดังแสดงในรูปที่ 4.17 (d) พบว่าในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน สารรองพื้น Chemlok 205A มีผลทำให้ความแข็งแรงในการติดประสานของโลหะอะลูมิเนียม และทองแดงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะการติดประสานของโลหะทองแดงที่พบว่ามีค่าการติดประสานสูงสุดอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเปรียบเทียบกับการติดประสานของโลหะชนิดอื่นๆ เช่นเดียวกับการติดประสานของยางใส่สารเสริมการยึดติด Zinc diacrylate ดังแสดงในรูปที่ 4.17 (c) ในระบบการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าสารรองพื้น Chemlok 205A มีผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะทั้ง 3 ชนิด โดยที่โลหะเหล็ก และ

ทองแดงมีความแข็งแรงในการติดประสานของโลหะใกล้เคียงกัน และยังมีค่าความแข็งแรงในการติดประสานสูงสุดอีกด้วย

4.3 ผลจากการสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต ที่อัตราส่วนโมลของ NR/HEMA ต่าง ๆ

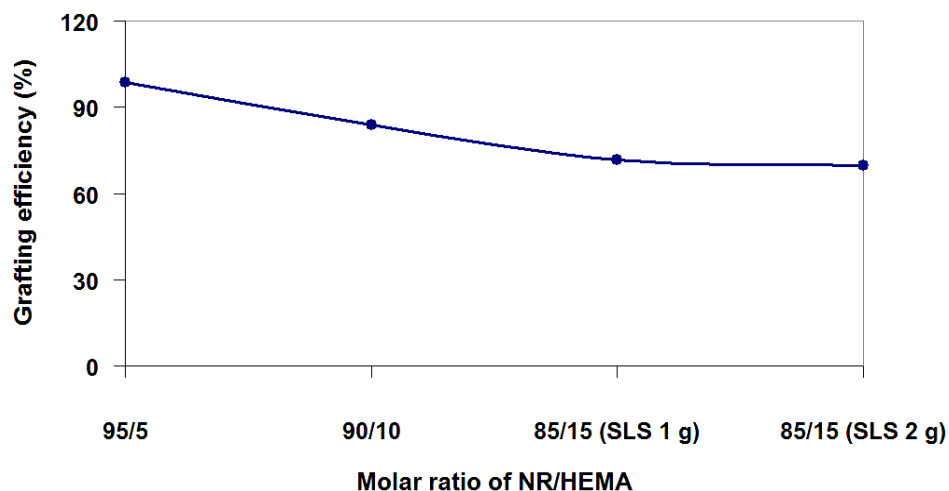
จากการสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตที่อัตราส่วนโมลของ NR/HEMA : 95/5, 90/10 และ 85/15 พบว่าสารผสมที่ได้ในแต่ละชุดการทดลองมีลักษณะเป็นอิมัลชัน ซึ่งหลังจากทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์แห้งแล้ว จึงนำผลิตภัณฑ์ดังกล่าวไปทำการสกัดแบบซอกซ์เล็ต (soxhlet extraction) ตามหัวข้อ 3.3.2.2 หลังจากนั้นนำผลิตภัณฑ์ส่วนที่เหลือจากการสกัดก็คือ ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (NR-g-HEMA) ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการกราฟต์โคพอลิเมอร์, Transmittance ratio และศึกษาโครงสร้างของกราฟต์โคพอลิเมอร์ ด้วยเทคนิค FT-IR ได้ผลการทดลองแสดงดังต่อไปนี้

1) เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการกราฟต์โคพอลิเมอร์ (%Grafting efficiency, %GE) ของยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตที่อัตราส่วนโมลของ NR/HEMA : 95/5, 90/10 และ 85/15 ที่อุณหภูมิ 50°C

นำน้ำยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ ระหว่างยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (HEMA) ซึ่งเตรียมตามสูตรในตารางที่ 3.7 โดยใช้อัตราส่วนโมลของยางธรรมชาติต่อ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์ (NR/HEMA) : 95/5, 90/10 และ 85/15 ที่อุณหภูมิ 50°C แสดงผลการทดลอง ดังตารางที่ 4.45 และรูปที่ 4.27

ตารางที่ 4.45 เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการกราฟต์ของน้ำยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนโมลของ NR/HEMA : 95/5, 90/10 และ 85/15 ที่อุณหภูมิ 50°C

| NR/HEMA (molar ratio) | Grafting efficiency (%) |
|--------------------------|-------------------------|
| 95/5 | 98.79 |
| 90/10 | 83.80 |
| 85/15 (SLS 1 g.) | 71.52 |
| 85/15 (SLS 2 g.) | 69.76 |



รูปที่ 4.18 เปอร์เซนต์ประสิทธิภาพการกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตที่อัตราส่วนโมลของ NR/HEMA : 95/5, 90/10 และ 85/15 ที่อุณหภูมิ 50°C

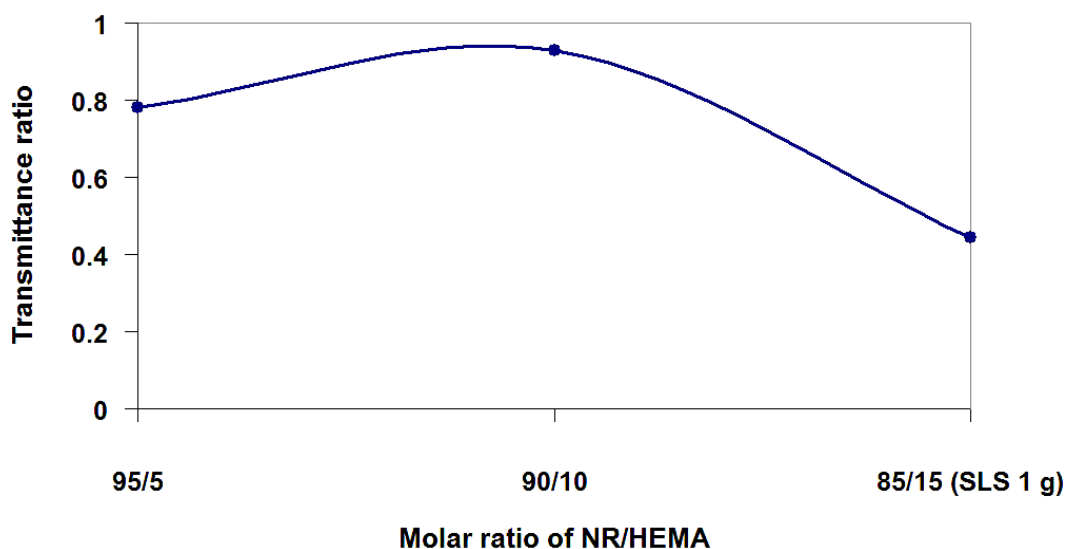
เมื่อพิจารณาเปอร์เซนต์ประสิทธิภาพการกราฟต์โคพอลิเมอร์ของ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (HEMA) บนยางธรรมชาติ ดังแสดงในตารางที่ 4.45 และรูปที่ 4.18 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโมลของ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตมากขึ้น เปอร์เซนต์ประสิทธิภาพการกราฟต์มีแนวโน้มลดลงตามจำนวนโมลของ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตที่เพิ่มขึ้น การลดลงของประสิทธิภาพการกราฟต์ของ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตบนยางธรรมชาตินี้ เนื่องจาก 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์ มีโอกาสที่จะเกิดเป็นโฮโมพอลิเมอร์ไรเซชัน ทำให้ได้พอลิ(2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต) ที่มากขึ้น นอกจากนี้ยังพบอีกว่า การเพิ่มปริมาณของมอนอเมอร์ในการเข้าทำปฏิกิริยาบนบริเวณที่ว่องไว (Reactive site) บนพื้นผิวของอนุภาคยางซึ่งมีปริมาณของมอนอเมอร์ที่มาก ทำให้ชั้นของมอนอเมอร์ที่ล้อมรอบอนุภาคยางอยู่มีความหนาแน่นมากขึ้น ทำให้การทำงานของตัวริเริ่มปฏิกิริยาในการเข้าไปยังผิวของอนุภาคยาง และก่อให้เกิดปฏิกิริยาเป็นไปได้อย่างยาก ดังนั้นตัวริเริ่มปฏิกิริยาจะก่อให้เกิดปฏิกิริยารบกวนแทน (Side reaction) เช่น การเกิดการถ่ายโอนสายโซ่ไปยังมอนอเมอร์ และทำให้มอนอเมอร์รวมตัวกันเองเกิดเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ จึงเป็นเหตุทำให้ประสิทธิภาพของการกราฟต์ลดลง และแนวโน้มดังกล่าวมีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ (ปวีณา, 2548)

2) Transmittance ratio ของน้ำยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนโมล NR/HEMA : 95/5, 90/10 และ 85/15 ที่อุณหภูมิ 50°C

ผลจากการเตรียมน้ำยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ โดยการกราฟต์ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (HEMA) ลงบนยางธรรมชาติ ซึ่งเตรียมตามสูตรในตารางที่ 3.7 โดยใช้อัตราส่วนโมลของ NR/HEMA : 95/5, 90/10 และ 85/15 ที่อุณหภูมิ 50°C แสดงผลการทดลองดังตารางที่ 4.46 และรูปที่ 4.19

ตารางที่ 4.46 Transmittance ratio ของอัตราส่วนโมล NR/HEMA : 95/5, 90/10 และ 85/15 ที่อุณหภูมิ 50°C

| NR/HEMA (molar ratio) | Transmittance ratio |
|--------------------------|---------------------|
| 95/5 | 0.7795 |
| 90/10 | 0.9120 |
| 85/15 (SLS 1 g.) | 0.4439 |
| 85/15 (SLS 2 g.) | ไม่สามารถหาค่าได้ |

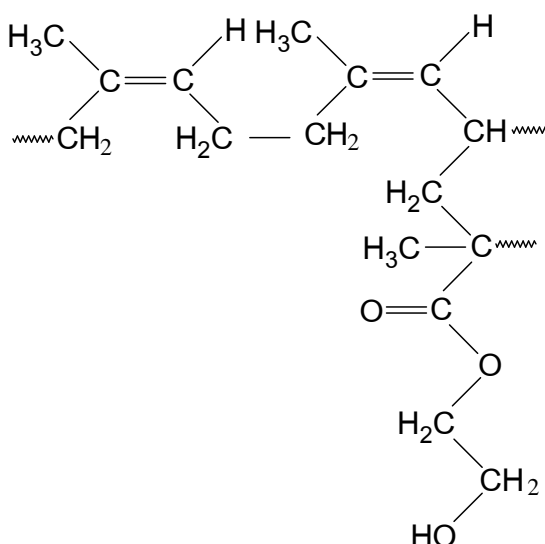


รูปที่ 4.19 Transmittance ratio ของอัตราส่วนโมล NR/HEMA : 95/5, 90/10 และ 85/15 ที่อุณหภูมิ 50°C

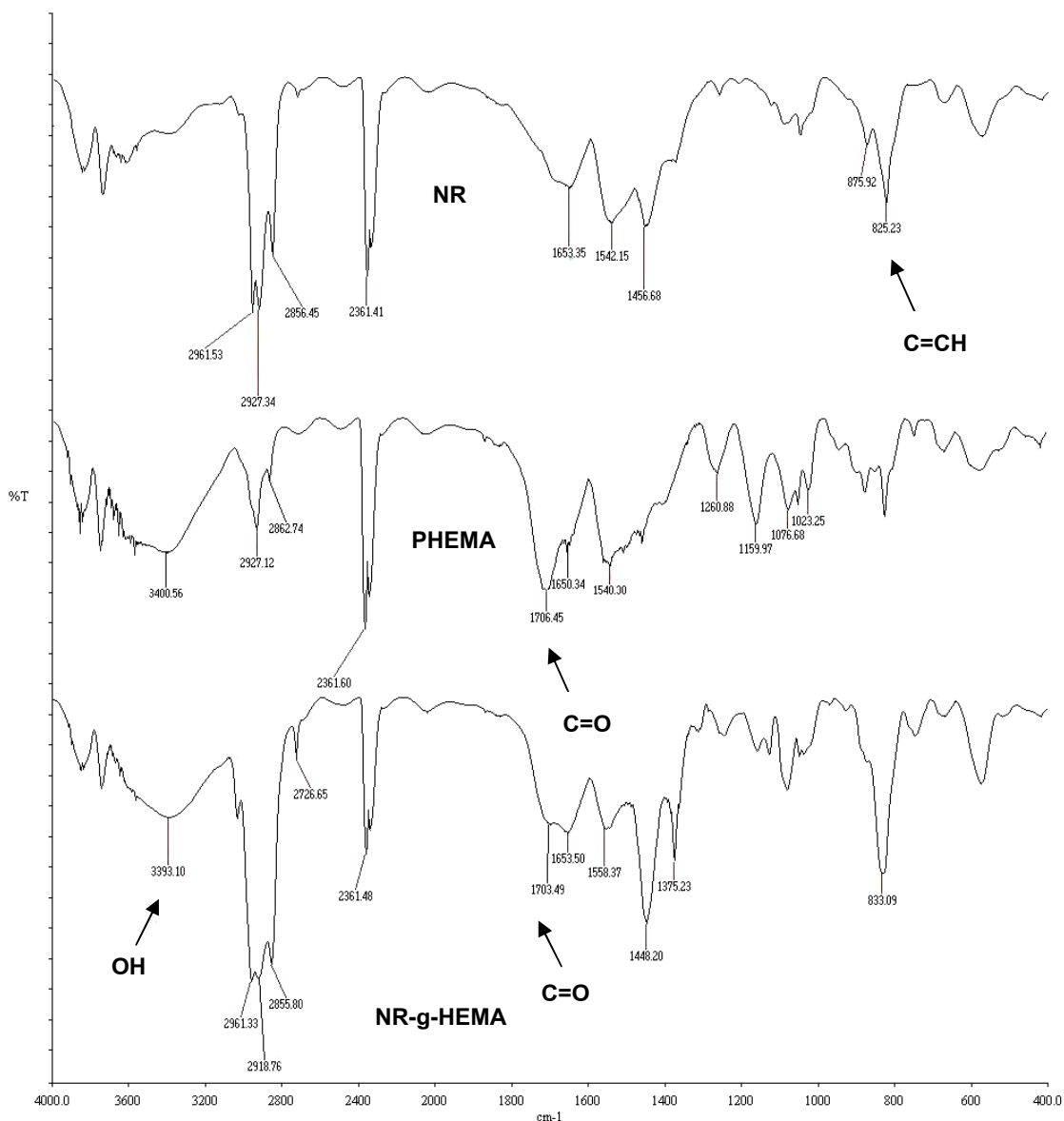
ระดับการเกิดกราฟต์ของ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตบนยางธรรมชาติมีแนวโน้มลดลง ดังแสดงในตารางที่ 4.46 และรูปที่ 4.19 โดยพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณมอนอเมอร์ของ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตมากขึ้น (อัตราส่วนโมล NR/HEMA มากกว่า 90/10) เนื่องจากมอนอเมอร์ของ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตมีโอกาสที่จะเกิดไฮโมพอลิเมอร์เชนได้ พอลิ(2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต) ที่มากขึ้น ซึ่งมีความสอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการกราฟต์ (%grafting efficiency) ดังนั้นจึงทำให้ประสิทธิภาพการกราฟต์ลดลง ในการทดลองมีการเพิ่มอัตราส่วนโมลของ NR/HEMA เป็น 85/15 ดังนั้นจึงต้องมีการเพิ่มปริมาณของสารลดแรงตึงผิว (โดยแปรปริมาณ SLS ที่ 1 และ 2 กรัม) ด้วยเหตุนี้จึงมีผลทำให้สารลดแรงตึงผิวไปห่อหุ้มอนุภาคของยางหนาเกินไป ทำให้การเกิดปฏิกิริยาเป็นไปได้อย่างยาก หรือเกิดอย่างไม่สมบูรณ์ จึงไม่สามารถใช้โซเดียมลอริลซัลเฟต (SLS) ในปริมาณ 2 กรัมได้

3) การศึกษาโครงสร้างของกราฟต์โคพอลิเมอร์ ด้วยเทคนิค FT-IR

ผลการศึกษาการกราฟต์ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (HEMA) ลงบนยางธรรมชาติ ซึ่งเตรียมตามสูตรในตารางที่ 3.7 โดยใช้อัตราส่วนโมลของ NR/HEMA : 95/5, 90/10 และ 85/15 ที่อุณหภูมิ 50°C พบว่าสามารถสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างที่น่าจะเป็นไปได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.20 ได้เป็นผลสำเร็จ และสามารถยืนยันได้ด้วย IR สเปกตรัมของกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต เมื่อเปรียบเทียบกับ IR สเปกตรัมของยางธรรมชาติ และพอลิ(2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต) ดังแสดงรูปที่ 4.21 และ 4.22



รูปที่ 4.20 โครงสร้างของกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (NR-g-HEMA)

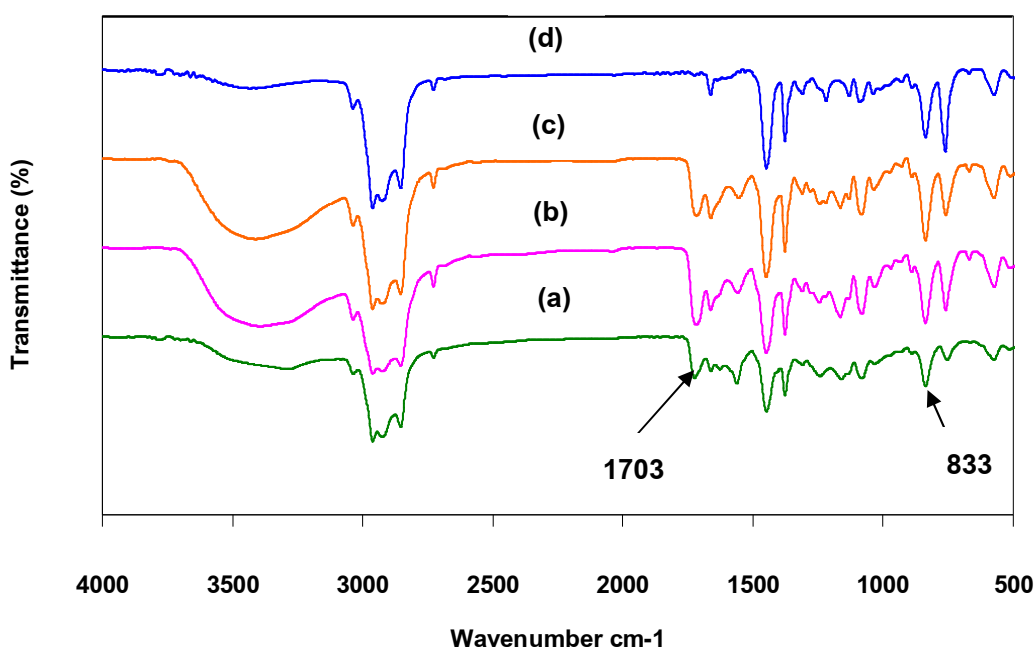


รูปที่ 4.21 IR สเปกตรัมของยางธรรมชาติ พอลิ(2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต) และยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ (NR-g-HEMA) ที่อัตราส่วนโมลของ NR/HEMA : 95/5

จากการนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR และนำ IR สเปกตรัมมาเปรียบเทียบกับ IR สเปกตรัมของยางธรรมชาติ และพอลิ (2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต) ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.21 ซึ่งพบว่า IR สเปกตรัมของยางธรรมชาติมียอด (Peak) ปรากฏที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1653 cm^{-1} ซึ่งได้แสดงถึงการมีพันธะของ C=C อย่างชัดเจน ส่วนยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ (NR-g-HEMA) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ มียอดของ OH ปรากฏที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3393 cm^{-1} และมียอดของ C=O ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1703 cm^{-1} ซึ่งอยู่ในตำแหน่งเดียวกับยอดของ C=O ของ พอลิ (2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต) ที่

ตำแหน่งเลขคลื่น 1706 cm^{-1} และเมื่อพิจารณา IR สเปกตรัมของยางธรรมชาติที่ตำแหน่งเลขคลื่น 825 cm^{-1} กับส่วนยอดของ $\text{C}=\text{CH}$ ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 833 cm^{-1} ของยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ พบว่า มีค่าการดูดกลืน (Absorbance) ลดลงมาก แสดงว่าพันธะคู่ ($\text{C}=\text{C}$) ได้เกิดปฏิกิริยากับพอลิ(2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต) จากผลการดูดกลืนที่ลดลงนี้สามารถยืนยันได้ว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์มีโมเลกุลของ พอลิ(2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต) กราฟต์ลงบนโมเลกุลของยางธรรมชาติ และคาดว่าน่าจะมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 4.20 นอกจากนี้ยังสามารถยืนยันได้จากการละลายของกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติและพอลิ(2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต) ดังแสดงในตาราง ก.1 (ภาคผนวก ก)

จากการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกราฟต์โคพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค FT-IR ในช่วง $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$ โดยทำการแปรปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนโมลของ NR/HEMA : 95/5, 90/10 และ 85/15 (แปรปริมาณ SLS 1 และ 2 กรัม) ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 IR สเปกตรัมของกราฟต์โคพอลิเมอร์ (NR-g-HEMA) ที่อัตราส่วนโมล NR/HEMA เท่ากับ (a) 95/5 (b) 90/10 (c) 85/15 ปริมาณ SLS 1 กรัม (d) 85/15 ปริมาณ SLS 2 กรัม

จากรูปที่ 4.22 พบว่าสเปกตรัมอินฟราเรดที่ตำแหน่งเลขคลื่น 836 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการมีพันธะ $\text{C}=\text{CH}$ นั้น มีการดูดกลืน (Absorbance) ลดลงมาก เมื่อเทียบกับสเปกตรัม

อินฟราเรดของยางธรรมชาติบริสุทธิ์ ในรูปที่ 4.21 แสดงว่าพันธะคู่เกิดปฏิกิริยากับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต และเป็นการยืนยันได้ว่าผลิตภัณฑ์ที่เหลือจากการสกัดนั้นเป็นส่วนของกราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่าง NR/HEMA จริง ยกเว้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกราฟต์ที่อัตราส่วนของ NR/HEMA : 85/15 โดยใส่ SLS ปริมาณ 2 กรัม ไม่เกิดการกราฟต์ขึ้น อาจเนื่องมาจากสารลดแรงตึงผิวไปห่อหุ้มอนุภาคยางหนาเกินไป ทำให้มอนอเมอร์ไม่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ของยางได้ มีผลทำให้การเกิดปฏิกิริยาเป็นไปได้ยาก จึงทำให้ยางกราฟต์สูตรนี้ไม่เหมาะในการศึกษาต่อไป

4.4 ผลของการใช้ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ ต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ

4.4.1 ผลของการใช้ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต ที่อัตราส่วนโมลของยางธรรมชาติต่อ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (NR/HEMA) : 90/10 และ 85/15 ต่อสมบัติเชิงกล

เตรียมยางคอมปอนด์ตามสูตรในตารางที่ 3.4 และ 3.5 โดยมีการใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต ในอัตราส่วนโมลของยางธรรมชาติต่อ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (NR/HEMA) : 90/10 ปริมาณ 10 phr และ 33 phr และในอัตราส่วนโมลของยางธรรมชาติต่อ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต : 85/15 ปริมาณ 43 phr ซึ่งมีลำดับการผสมแสดงดังตารางที่ 3.1 จากนั้นขึ้นรูปยางคอมปอนด์ด้วยวิธีการอัดเบ้าที่อุณหภูมิ 150°C (วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถัน) และอุณหภูมิ 160°C (วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์) ตามเวลาในการวัลคาไนซ์ที่ได้จากเครื่อง MDR ดังแสดงในตารางที่ 4.47 แล้วทำการเตรียมชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ และนำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง เพื่อหาค่าสมบัติเชิงกล เช่น โมดูลัสที่ 100% (100% Modulus) ความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) ของยางทั้งที่ใส่และไม่ใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ แสดงผลการทดลองดังตารางที่ 4.48 และรูปที่ 4.23–4.25

เมื่อนำคอมเปานด์ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนโมลของ NR/HEMA : 90/10 ปริมาณ 10 phr และ 33 phr ที่อัตราส่วน NR/HEMA : 85/15 ปริมาณ 43 phr มาศึกษา ลักษณะการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่อง MDR ที่อุณหภูมิ 150°C (วัลคาไนซ์ด้วยระบบกัมมะถัน) และ อุณหภูมิ 160°C (วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์) พบว่าปริมาณของยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ ไม่มีผลต่อช่วงระยะเวลาที่สามารถแปรรูปได้ (scorch time, T_{s_1}) และเวลาในการวัลคาไนซ์ (cure time, $T_{c_{90}}$) ดังสรุปได้ในตารางที่ 4.47

ตารางที่ 4.47 ลักษณะการวัลคาไนซ์คอมเปานด์ยางใส่สารเสริมการยึดติดที่ได้จากการ สังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์ ด้วยระบบกัมมะถันและเปอร์ออกไซด์

| Amount of NR-g-HEMA | Sulphur cure @ 150°C | | Peroxide cure @ 160°C | |
|------------------------|------------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------|
| | T_{s_1} (Min:Sec) | $T_{c_{90}}$ (Min:Sec) | T_{s_1} (Min:Sec) | $T_{c_{90}}$ (Min:Sec) |
| None | 1.18 ± 0.10 | 2.49 ± 0.60 | 0.54 ± 0.26 | 16.55 ± 1.02 |
| NR-g-HEMA* 10 phr | 1.03 ± 0.02 | 2.04 ± 0.02 | 1.00 ± 0.01 | 18.23 ± 1.13 |
| NR-g-HEMA* 33 phr | 1.29 ± 0.01 | 2.38 ± 0.01 | 1.01 ± 0.01 | 17.46 ± 0.06 |
| NR-g-HEMA** 43 phr | 1.48 ± 0.03 | 2.57 ± 0.04 | 0.57 ± 0.02 | 17.26 ± 1.31 |

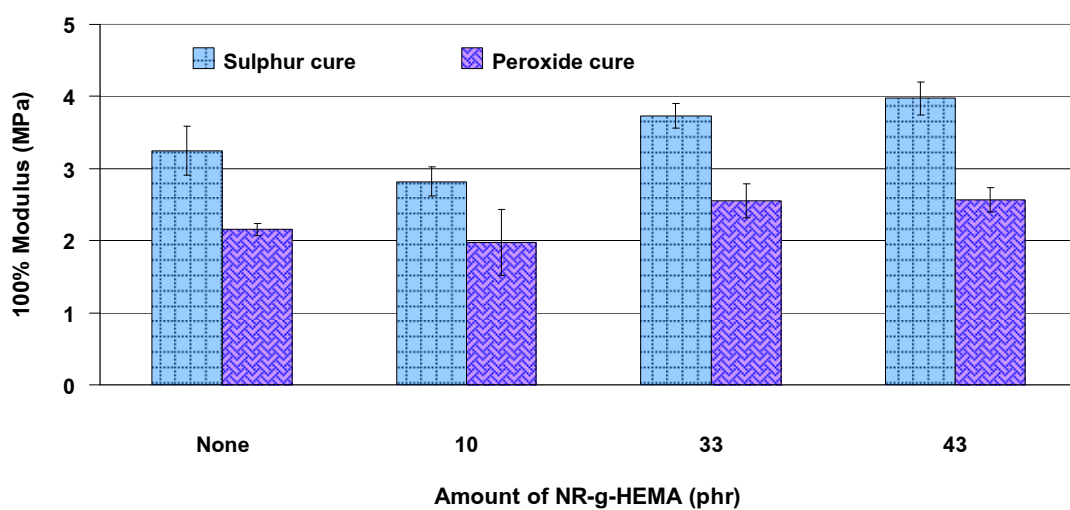
หมายเหตุ : * อัตราส่วนโมลของ NR/HEMA : 90/10

** อัตราส่วนโมลของ NR/HEMA : 85/15

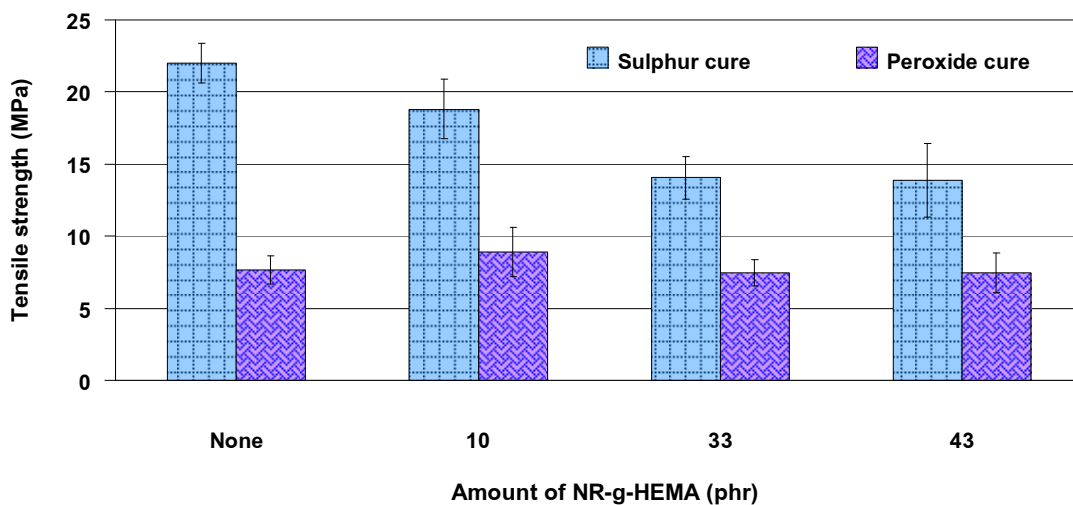
จากตารางที่ 4.47 พบว่าลักษณะการวัลคาไนซ์ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ ปริมาณต่างๆ ไม่มีความแตกต่างจากยางที่ปราศจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ กล่าวคือมีช่วง ระยะเวลาที่สามารถแปรรูปได้ (scorch time) และเวลาในการวัลคาไนซ์ (cure time) ที่ใกล้เคียง กัน โดยการวัลคาไนซ์ยางด้วยระบบกัมมะถัน ใช้เวลาในการวัลคาไนซ์ประมาณ 2-3 นาที และ ยางที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์ ใช้เวลาประมาณ 17-19 นาที นอกจากนี้ยัง พบว่าการวัลคาไนซ์ยางด้วยระบบกัมมะถันใช้เวลาในการวัลคาไนซ์สั้นกว่ายางในระบบเปอร์ ออกไซด์อย่างชัดเจน

ตารางที่ 4.48 ผลของระบบการวัลคาไนซ์ และอัตราส่วนโมลของ NR/HEMA : 90/10 และ 85/15 ที่แปรปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ต่อสมบัติเชิงกล

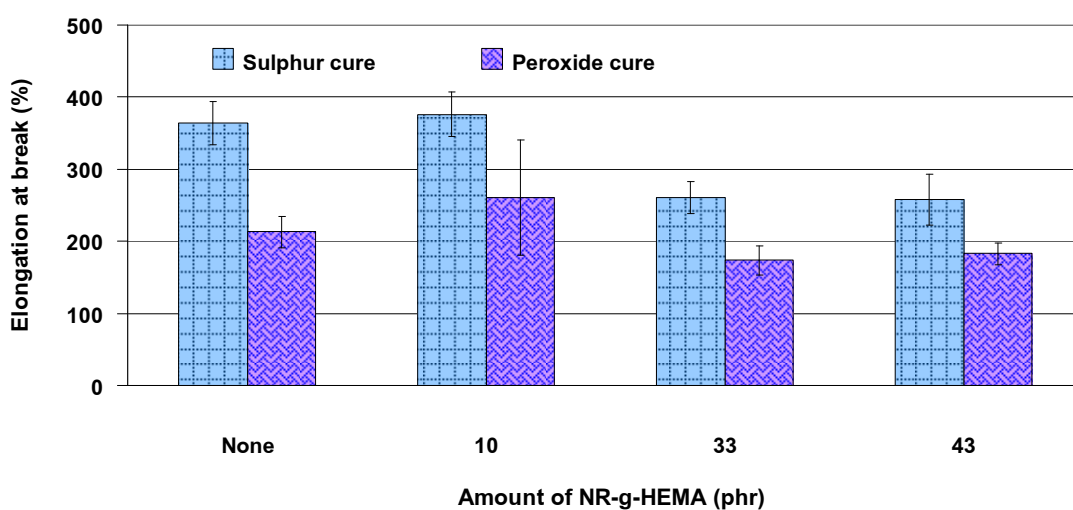
| Cure System | Amount of NR-g-HEMA | 100% Modulus (MPa) | Tensile strength (MPa) | Elongation at break (%) |
|---------------|---------------------------|--------------------|------------------------|-------------------------|
| Sulphur cure | None | 3.24 ± 0.34 | 21.99 ± 1.35 | 363.70 ± 30.17 |
| | NR/HEMA : 90/10 10 phr | 2.82 ± 0.20 | 18.80 ± 2.05 | 376.16 ± 31.18 |
| | NR/HEMA : 90/10 33 phr | 3.73 ± 0.17 | 14.04 ± 1.50 | 260.53 ± 21.97 |
| | NR/HEMA : 85/15 43 phr | 3.97 ± 0.22 | 13.87 ± 2.57 | 258.34 ± 35.37 |
| Peroxide cure | None | 2.15 ± 0.08 | 7.66 ± 0.97 | 212.70 ± 21.29 |
| | NR/HEMA : 90/10 10 phr | 1.97 ± 0.46 | 8.90 ± 1.69 | 289.70 ± 87.07 |
| | NR/HEMA : 90/10 33 phr | 2.55 ± 0.23 | 7.45 ± 0.91 | 173.60 ± 20.34 |
| | NR/HEMA : 85/15 43 phr | 2.56 ± 0.18 | 7.47 ± 1.37 | 182.92 ± 15.11 |



รูปที่ 4.23 โมดูลัสที่ 100% ของยางธรรมชาติกราฟต์โคพอลิเมอร์ NR/HEMA : 90/10 (ปริมาณ 10 phr และ 33 phr) และ 85/15 (ปริมาณ 43 phr)



รูปที่ 4.24 ความทนต่อแรงดึงของยางธรรมชาติกราฟต์โคพอลิเมอร์ NR/HEMA : 90/10 (ปริมาณ 10 phr และ 33 phr) และ 85/15 (ปริมาณ 43 phr)



รูปที่ 4.25 เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางธรรมชาติกราฟต์โคพอลิเมอร์ NR/HEMA : 90/10 (ปริมาณ 10 phr และ 33 phr) และ 85/15 (ปริมาณ 43 phr)

หมายเหตุ

10 หมายถึง มียางแผ่นรมควัน (RSS No.3) ปริมาณ 100 phr และยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ (อัตราส่วน NR/HEMA : 90/10) ปริมาณ 10 phr

33 หมายถึง มียางแผ่นรมควัน (RSS No.3) ปริมาณ 100 phr และยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ (อัตราส่วน NR/HEMA : 90/10) ปริมาณ 33 phr

43 หมายถึง มียางแผ่นรมควัน (RSS No.3) ปริมาณ 100 phr และยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ (อัตราส่วน NR/HEMA : 85/15) ปริมาณ 43 phr

สำหรับสมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์ เมื่อทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.48 และรูปที่ 4.23–4.25 พบว่ายางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันให้ค่าโมดูลัสที่ 100% ความทนต่อแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด สูงกว่ายางที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์ เนื่องจากการวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันเกิดการเชื่อมโยงแบบพอลิซัลไฟดิก ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดีและสูงกว่ายางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ (พรพรรณ, 2528) เมื่อพิจารณาอัตราส่วนโมลของ NR/HEMA และปริมาณของยางธรรมชาติ กราฟต์โคพอลิเมอร์ พบว่าค่าโมดูลัสที่ 100% มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (ยกเว้น ที่อัตราส่วน NR/HEMA : 90/10 ปริมาณ 10 phr พบว่ามีค่าโมดูลัสที่ 100% ต่ำกว่าการไม่ใส่ยางธรรมชาติ กราฟต์โคพอลิเมอร์ ทั้ง 2 ระบบของการวัลคาไนซ์) แต่ค่าความทนต่อแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลง ตามปริมาณของมอนอเมอร์ และปริมาณของยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้น ทั้งในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถันและเปอร์ออกไซด์ เนื่องจากความมีขั้วที่แตกต่างกันของยางธรรมชาติและยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ เมื่อนำมาเตรียมเป็นยางคอมปอนด์ จึงส่งผลให้การกระจายตัวของยางทั้ง 2 ชนิด รวมทั้งสารเคมีที่ใช้ไม่มีความสม่ำเสมอ หรืออาจจะกระจายตัวได้ไม่ดีเท่าที่ควร จึงส่งผลให้ยางผสมที่ได้มีสมบัติต่ำลงจากที่ควรจะเป็น

4.4.2 ความสามารถในการติดประสานระหว่างยางที่ใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (NR-g-HEMA) กับโลหะ

4.4.2.1 ผลของปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ (NR-g-HEMA) ต่อความสามารถในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ

ศึกษาผลของปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ โดยการนำยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ มาเตรียมเป็นยางคอมปอนด์ตามสูตรดังตารางที่ 3.4 และ 3.5 วิธีการเตรียมผิวโลหะทั้ง 3 ชนิด ด้วยวิธีการพ่นทราย และการกัดผิวด้วยกรด ตามหัวข้อ 3.3.1.4 จากนั้นนำยางคอมปอนด์ไปหาเวลาในการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่อง MDR เพื่อนำเวลาไปใช้ในการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางติดโลหะ โดยวางแผ่นโลหะไว้ด้านล่างและวางแผ่นยางที่ยังไม่วัลคาไนซ์ไว้ด้านบน ดังแสดงในรูปที่ 3.2 แล้วทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเบ้าที่อุณหภูมิ 150°C (วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถัน) และอุณหภูมิ 160°C (วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์) ตามเวลาดังแสดงในตารางที่ 4.47 และทดสอบความแข็งแรงในการติดประสาน ตามหัวข้อ 3.3.4.2 ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.49–4.52 และรูปที่ 4.26 เมื่อยึดติดกับโลหะที่เตรียมผิวด้วยวิธีการพ่นทราย และแสดงในตารางที่ 4.53–4.56 และรูปที่ 4.27 เมื่อยึดติดกับโลหะที่เตรียมผิวด้วยวิธีการกัดผิวด้วยกรด ตามลำดับดังนี้

1) การติดประสานระหว่างยางที่ใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์กับโลหะที่เตรียมผิวทางกล (พ่นทราย) โดยมีการใช้และไม่ใช้สารรองพื้น

ตารางที่ 4.49 ปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ใช้ กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะ (พ่นทราย) ที่ปราศจากสารรองพื้น

| Vulcanization system | Amount of NR-g-HEMA | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|---------------------|-------------------------|--------------------|-------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | None | 512.53 ± 40.47 | 472.72 ± 109.43 | 314.65 ± 9.22 | | ✓ |
| | NR/HEMA : | | | | | |
| | 90/10 | 406.77 ± 23.20 | 217.33 ± 42.73 | 215.70 ± 33.44 | | ✓ |
| | 10 phr | | | | | |
| | NR/HEMA : | | | | | |
| | 90/10 | 327.31 ± 49.57 | 255.51 ± 44.18 | 365.00 ± 32.54 | | ✓ |
| Peroxide cure | None | 289.25 ± 21.96 | 284.00 ± 45.41 | 319.08 ± 26.93 | | ✓ |
| | NR/HEMA : | | | | | |
| | 90/10 | 237.51 ± 36.93 | 128.69 ± 60.11 | 226.80 ± 17.24 | | ✓ |
| | 10 phr | | | | | |
| | NR/HEMA : | | | | | |
| | 90/10 | 229.25 ± 15.82 | 217.28 ± 43.88 | 223.17 ± 27.34 | | ✓ |
| 33 phr | | | | | | |

ตารางที่ 4.50 ปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ใช้ กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะ (พ่นทราย) ที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมเพานด์

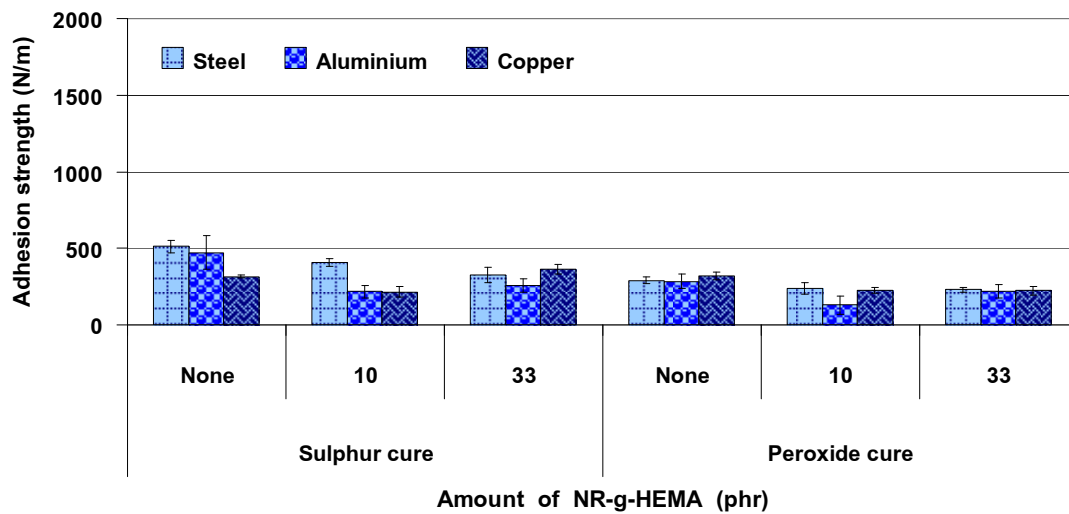
| Vulcanization system | Amount of NR-g-HEMA | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|---------------------|-------------------------|-------------------|--------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | None | 461.80 ± 22.66 | 471.94 ± 19.63 | 399.85 ± 38.92 | | ✓ |
| | NR/HEMA : | | | | | |
| | 90/10 | 430.09 ± 19.80 | 247.84 ± 27.66 | 471.43 ± 69.04 | | ✓ |
| | 10 phr | | | | | |
| | NR/HEMA : | | | | | |
| | 90/10 | 463.49 ± 76.54 | 294.09 ± 22.79 | 539.24 ± 112.54 | | ✓ |
| Peroxide cure | None | 309.55 ± 6.16 | 359.64 ± 43.74 | 368.32 ± 29.31 | | ✓ |
| | NR/HEMA : | | | | | |
| | 90/10 | 198.95 ± 2.76 | 116.54 ± 28.42 | 253.92 ± 11.37 | | ✓ |
| | 10 phr | | | | | |
| | NR/HEMA : | | | | | |
| | 90/10 | 175.63 ± 20.67 | 173.25 ± 9.83 | 241.24 ± 7.53 | | ✓ |
| | 33 phr | | | | | |

ตารางที่ 4.51 ปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะ (พ่นทราย) ที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์

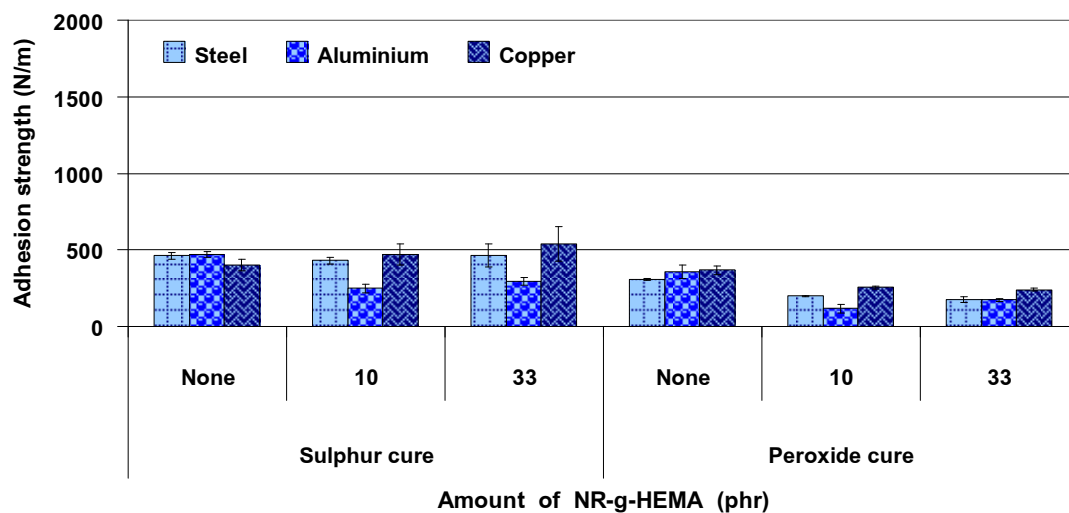
| Vulcanization system | Amount of NR-g-HEMA | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|---------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | None | 482.56 ± 50.24 | 550.28 ± 46.23 | 340.12 ± 22.16 | | ✓ |
| | NR/HEMA : | | | | | |
| | 90/10 | 285.50 ± 53.99 | 331.06 ± 48.55 | 336.75 ± 41.34 | | ✓ |
| | 10 phr | | | | | |
| | NR/HEMA : | | | | | |
| | 90/10 | 420.17 ± 10.82 | 347.31 ± 49.41 | 340.77 ± 10.29 | | ✓ |
| Peroxide cure | None | 284.12 ± 25.64 | 290.12 ± 20.87 | 322.20 ± 32.04 | | ✓ |
| | NR/HEMA : | | | | | |
| | 90/10 | 127.03 ± 10.03 | 114.22 ± 41.62 | 174.34 ± 32.89 | | ✓ |
| | 10 phr | | | | | |
| | NR/HEMA : | | | | | |
| | 90/10 | 226.63 ± 13.64 | 113.75 ± 17.76 | 212.35 ± 45.02 | | ✓ |
| | 33 phr | | | | | |

ตารางที่ 4.52 ปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะ (พ่นทราย) ที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นทางการค้า

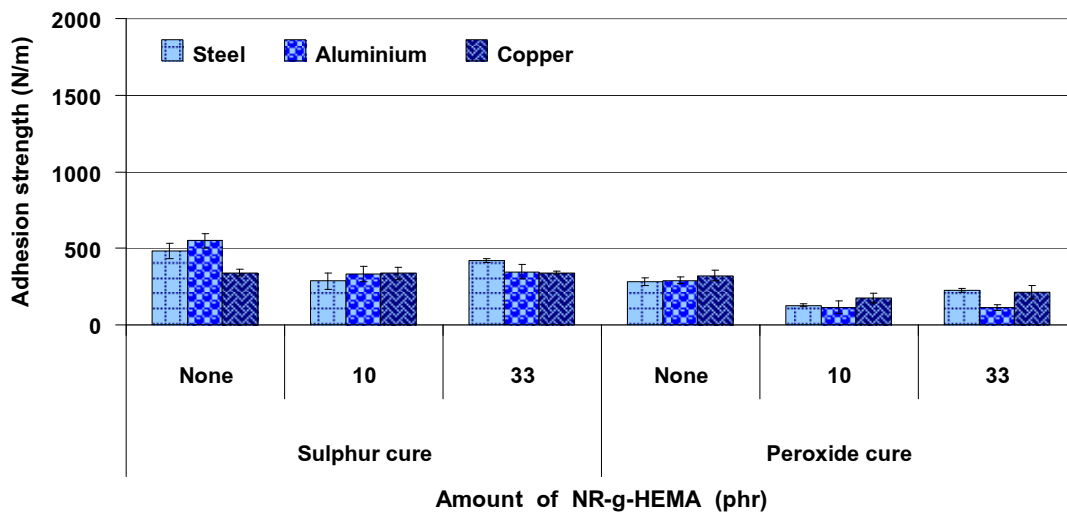
| Vulcanization system | Amount of NR-g-HEMA | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|---------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | None | 848.28 ± 38.57 | 836.11 ± 76.67 | 944.64 ± 54.47 | | ✓ |
| | NR/HEMA : | | | | | |
| | 90/10 | 401.13 ± 12.36 | 500.01 ± 72.10 | 582.13 ± 56.69 | | ✓ |
| | 10 phr | | | | | |
| | NR/HEMA : | | | | | |
| | 90/10 | 348.46 ± 47.87 | 372.82 ± 54.29 | 532.39 ± 55.25 | | ✓ |
| Peroxide cure | None | 852.34 ± 107.46 | 979.41 ± 4.81 | 955.55 ± 39.46 | | ✓ |
| | NR/HEMA : | | | | | |
| | 90/10 | 509.98 ± 39.93 | 586.99 ± 9.32 | 511.56 ± 8.02 | | ✓ |
| | 10 phr | | | | | |
| | NR/HEMA : | | | | | |
| | 90/10 | 485.04 ± 22.96 | 613.23 ± 47.19 | 486.10 ± 10.89 | | ✓ |
| 33 phr | | | | | | |



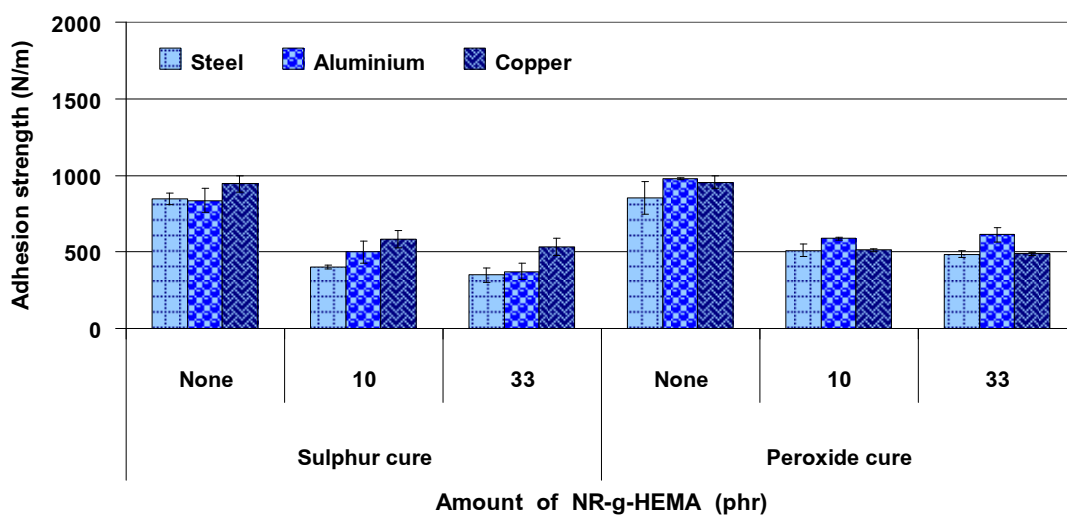
(a) Without primer



(b) With primer compound solution



(c) With primer NR-g-HEMA solution



(d) With primer chemlok205A

รูปที่ 4.26 ปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะ (พ่นทราย)

ความแข็งแรงในการติดประสานของยางที่ใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์กับโลหะที่เตรียมผิวด้วยวิธีการพ่นทราย โดยมีการแปรปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ เพื่อศึกษาความแข็งแรงในการติดประสาน ซึ่งได้ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.49–4.52 และรูปที่ 4.26 พบว่าความล้นเหลวในการติดประสานเป็นแบบแอดฮีซีฟทุกปริมาณของยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ และทุกชนิดของโลหะ เมื่อพิจารณาความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่ปราศจากสารรองพื้น ดังแสดงในรูปที่ 4.26 (a) ในระบบการวัลคาไนซ์แบบกัมมะถัน พบว่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางที่ปราศจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ กับยางที่ใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ปริมาณ 10 phr และ 33 phr พบว่าปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้น มีผลต่อความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะเหล็ก และโลหะอะลูมิเนียม น้อยมาก อาจเนื่องจากความมีขี้ในยางกราฟต์มีปริมาณไม่เพียงพอที่จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงในการยึดติดระหว่างยางกับโลหะได้ อีกทั้งยังส่งผลให้ความแข็งแรงในการติดประสานมีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับยางที่ปราศจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ อาจเนื่องมาจากการใส่โซเดียมลอริลซัลเฟต (SLS) ซึ่งเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ มีผลในการขัดขวางการเกิดการยึดติดระหว่างผิวหน้าของโลหะที่ปราศจากสารรองพื้นกับยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกัมมะถัน หรืออาจเกิดจากการกระจายตัวของสารเคมี และยางมีขี้ (ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์) รวมทั้งยางไม่มีขี้ (ยางธรรมชาติ) ที่อยู่ในยางคอมปานด์ไม่ดีเท่าที่ควร ทำให้การกระจายตัวของยางและสารเคมีไม่สม่ำเสมอ จึงส่งผลให้ความแข็งแรงในการติดประสานมีค่าลดลง สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ปริมาณ 33 phr พบว่าปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ปริมาณนี้ มีผลทำให้ความแข็งแรงในการติดประสานกับโลหะทองแดงเพิ่มสูงขึ้น และยิ่งสูงกว่าการติดประสานของยางที่ปราศจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์อีกด้วย สำหรับการวัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าความแข็งแรงในการติดประสานของโลหะทั้ง 3 ชนิด มีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน โดยความแข็งแรงในการติดประสานของยางที่ปราศจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ มีความแข็งแรงในการติดประสานสูงกว่ายางที่ใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ ทุกชนิดของโลหะ ในขณะที่ความแข็งแรงของการติดประสานระหว่างโลหะกับยางที่ปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ 10 phr และ 33 phr มีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน

สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานกับโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมปานด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.26 (b) พบว่าในระบบการวัลคาไนซ์แบบกัมมะถัน ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างโลหะเหล็กกับยางที่ใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ปริมาณ 33 phr มีค่าความแข็งแรงในการติดประสานใกล้เคียงกับยางที่ปราศจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ อีกทั้งยังมีแนวโน้มในการติดประสานที่สูงกว่ายางที่ใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ปริมาณ 10 phr อีกด้วย ในขณะที่ความแข็งแรงของการติดประสานกับโลหะอะลูมิเนียม มีค่าความแข็งแรงลดลงตามปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่เพิ่มสูงขึ้น มีผลต่อความแข็งแรงในการติดประสานกับโลหะทองแดง โดยทำให้ความแข็งแรงใน

การติดประสานมีค่าสูงสุด เมื่อใช้ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ปริมาณ 33 phr แต่การวัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะทั้ง 3 ชนิด มีแนวโน้มลดลง ตามปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่เพิ่มสูงขึ้น

สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานกับโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.26 (c) พบว่าในระบบการวัลคาไนซ์แบบกัมมะถัน การเพิ่มปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ในยางคอมปอนด์ ไม่ได้ส่งผลต่อความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ เนื่องจากความแข็งแรงในการติดประสานของยางที่ใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ปริมาณ 10 phr และ 33 phr มีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน ในขณะที่ความแข็งแรงในการติดประสานกับโลหะทองแดงกลับพบว่า ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ไม่มีผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงของการติดประสานกับโลหะทองแดง ถึงแม้จะมีการเพิ่มปริมาณยางกราฟต์จาก 10 phr เป็น 33 phr แล้วก็ตาม ความแข็งแรงในการติดประสานของยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าความแข็งแรงในการติดประสานของโลหะ มีแนวโน้มในการติดประสานที่เป็นแนวทางเดียวกัน กล่าวคือ ความแข็งแรงในการติดประสานมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ แต่พบว่ายังคงมีความแข็งแรงในการติดประสานที่ต่ำกว่ายางที่ปราศจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์

สำหรับค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้น Chemlok 205A ดังแสดงในรูปที่ 4.26 (d) พบว่าความแข็งแรงในการติดประสานมีแนวโน้มลดลง ตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ ทั้งในระบบการวัลคาไนซ์แบบกัมมะถัน และเปอร์ออกไซด์ โดยที่โลหะทองแดงมีแนวโน้มในการติดประสานสูงสุด เมื่อใช้ระบบกัมมะถัน ในขณะที่โลหะอะลูมิเนียมมีค่าการติดประสานสูงสุด เมื่อใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์ นอกจากนี้ยังพบว่าการรองพื้นโลหะด้วยสารรองพื้น Chemlok 205A มีผลทำให้ความแข็งแรงในการติดประสานกับยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ มีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะที่ปราศจากสารรองพื้น หรือรองพื้นด้วยสารรองพื้นที่เตรียมขึ้นจากยางคอมปอนด์ และจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์

2) การติดประสานระหว่างคอมเปานด์ยางใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์กับโลหะที่เตรียมผิวทางเคมี (กัดผิวด้วยกรด) โดยมีการใช้และไม่ใช้สารรองพื้น

ตารางที่ 4.53 ปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ใช้ กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะ (กัดผิวด้วยกรด) ที่ปราศจากสารรองพื้น

| Vulcanization system | Amount of NR-g-HEMA | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|---------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | None | 408.90 ± 78.18 | 357.96 ± 3.28 | 343.03 ± 15.80 | | ✓ |
| | NR/HEMA : | | | | | |
| | 90/10 | 475.79 ± 49.39 | 90.76 ± 9.57 | 136.03 ± 9.73 | | ✓ |
| | 10 phr | | | | | |
| | NR/HEMA : | | | | | |
| | 90/10 | 401.99 ± 30.80 | 164.26 ± 37.76 | 116.80 ± 41.68 | | ✓ |
| Peroxide cure | None | 288.19 ± 38.76 | 214.74 ± 27.91 | 175.49 ± 21.82 | | ✓ |
| | NR/HEMA : | | | | | |
| | 90/10 | 200.01 ± 63.51 | 96.75 ± 6.56 | 120.50 ± 33.67 | | ✓ |
| | 10 phr | | | | | |
| | NR/HEMA : | | | | | |
| | 90/10 | 176.56 ± 5.73 | 38.38 ± 3.66 | 89.84 ± 8.68 | | ✓ |
| 33 phr | | | | | | |

ตารางที่ 4.54 ปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะ (กัดผิวด้วยกรด) ที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมเพานด์

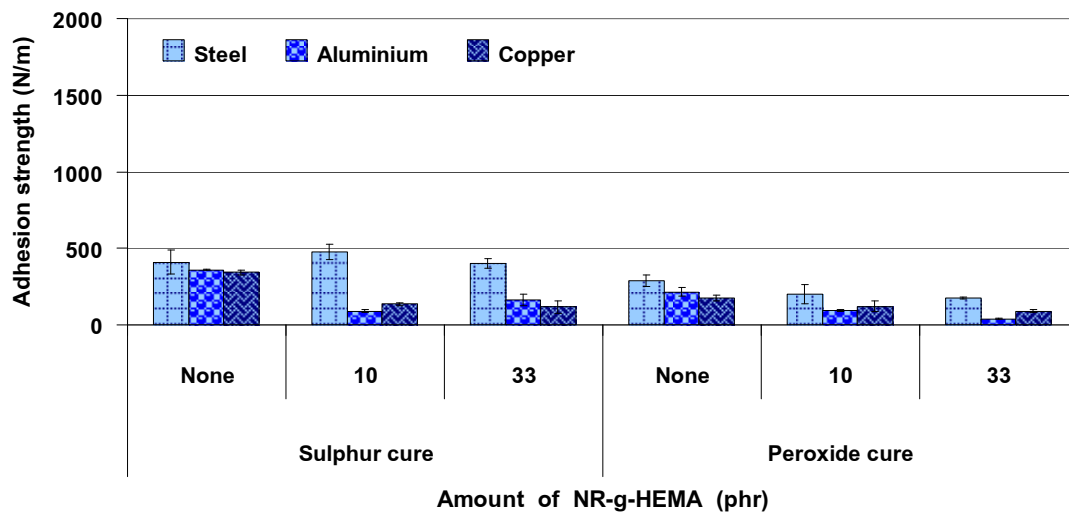
| Vulcanization system | Amount of NR-g-HEMA | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|---------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | None | 714.49 ± 90.91 | 385.53 ± 22.21 | 455.39 ± 92.59 | | ✓ |
| | NR/HEMA : | | | | | |
| | 90/10 | 554.71 ± 80.12 | 78.83 ± 2.55 | 123.37 ± 3.86 | | ✓ |
| | 10 phr | | | | | |
| | NR/HEMA : | | | | | |
| | 90/10 | 448.03 ± 53.55 | 224.83 ± 26.07 | 307.76 ± 25.17 | | ✓ |
| Peroxide cure | None | 277.09 ± 23.06 | 141.71 ± 11.47 | 182.15 ± 44.64 | | ✓ |
| | NR/HEMA : | | | | | |
| | 90/10 | 240.26 ± 52.32 | 95.55 ± 8.44 | 121.78 ± 29.37 | | ✓ |
| | 10 phr | | | | | |
| | NR/HEMA : | | | | | |
| | 90/10 | 369.78 ± 22.80 | 92.87 ± 9.26 | 133.73 ± 18.50 | | ✓ |
| | 33 phr | | | | | |

ตารางที่ 4.55 ปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะ (กัดผิวด้วยกรด) ที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์

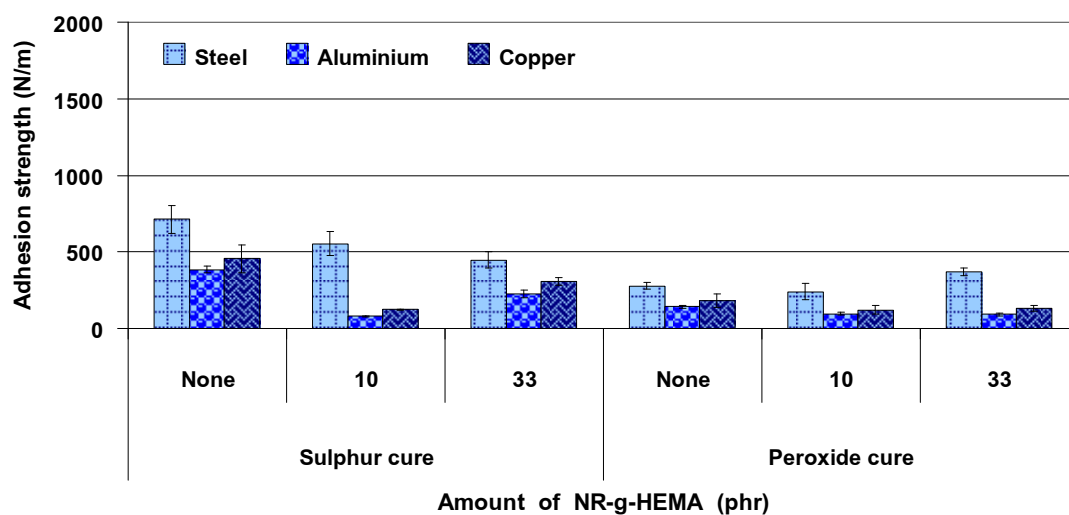
| Vulcanization system | Amount of NR-g-HEMA | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|---------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | None | 524.23 ± 48.20 | 401.46 ± 20.48 | 352.56 ± 36.84 | | ✓ |
| | NR/HEMA : | | | | | |
| | 90/10 | 588.28 ± 40.91 | 87.68 ± 21.98 | 147.05 ± 14.43 | | ✓ |
| | 10 phr | | | | | |
| | NR/HEMA : | | | | | |
| | 90/10 | 551.89 ± 53.30 | 243.81 ± 12.90 | 194.72 ± 16.75 | | ✓ |
| Peroxide cure | None | 364.58 ± 33.12 | 115.37 ± 11.56 | 164.32 ± 42.38 | | ✓ |
| | NR/HEMA : | | | | | |
| | 90/10 | 349.42 ± 79.51 | 101.13 ± 11.16 | 153.79 ± 12.86 | | ✓ |
| | 10 phr | | | | | |
| | NR/HEMA : | | | | | |
| | 90/10 | 356.94 ± 37.29 | 80.83 ± 7.36 | 93.98 ± 14.92 | | ✓ |
| | 33 phr | | | | | |

ตารางที่ 4.56 ปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะ (กัดผิวด้วยกรด) ที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นทางการค้า

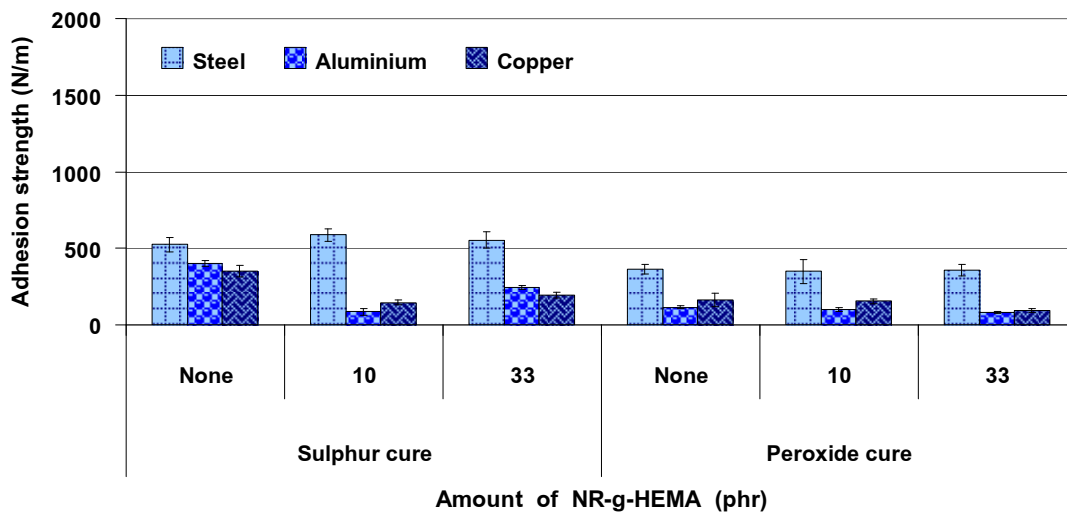
| Vulcanization system | Amount of NR-g-HEMA | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|---------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | None | 515.07 ± 23.13 | 437.99 ± 76.82 | 578.98 ± 53.26 | | ✓ |
| | NR/HEMA : | | | | | |
| | 90/10 | 284.07 ± 60.66 | 416.23 ± 49.03 | 413.48 ± 18.60 | | ✓ |
| | 10 phr | | | | | |
| | NR/HEMA : | | | | | |
| | 90/10 | 308.29 ± 7.66 | 331.09 ± 23.43 | 436.00 ± 40.24 | | ✓ |
| Peroxide cure | None | 1082.09 ± 39.80 | 576.36 ± 38.40 | 952.27 ± 89.21 | | ✓ |
| | NR/HEMA : | | | | | |
| | 90/10 | 472.56 ± 45.88 | 645.66 ± 40.53 | 616.50 ± 32.89 | | ✓ |
| | 10 phr | | | | | |
| | NR/HEMA : | | | | | |
| | 90/10 | 482.44 ± 35.67 | 498.87 ± 35.96 | 503.40 ± 11.66 | | ✓ |
| | 33 phr | | | | | |



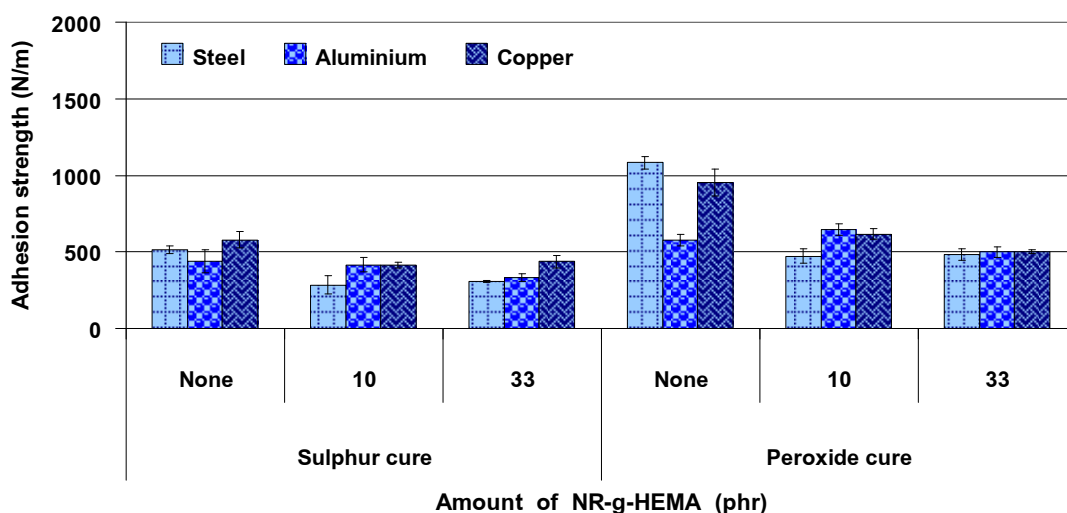
(a) Without primer



(b) With primer compound solution



(c) With primer NR-g-HEMA solution



(d) With primer chemlok205A

รูปที่ 4.27 ปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะ (กััดผิวด้วยกรด)

ความแข็งแรงในการติดประสานของยางที่ใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์กับโลหะที่เตรียมผิวด้วยวิธีการกัดด้วยกรด โดยมีการแปรปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ เพื่อศึกษาความแข็งแรงในการติดประสาน ซึ่งได้ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.53–4.56 และรูปที่ 4.27 พบว่าความล้มเหลวในการติดประสานเป็นแบบแอดฮีซีฟทุกปริมาณของยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ และทุกชนิดของโลหะ เมื่อพิจารณาความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่ปราศจากสารรองพื้น ดังแสดงในรูปที่ 4.27 (a) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในระบบการวัลคาไนซ์แบบ

กัมมันต์ ความแข็งแรงของการติดประสานระหว่างโลหะเหล็กกับยางใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ ปริมาณ 10 phr มีความแข็งแรงในการติดประสานที่สูงที่สุด อีกทั้งยังมีค่าการติดประสานสูงกว่า โลหะอะลูมิเนียมและทองแดง ทุกปริมาณของยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ รวมทั้งยางที่ปราศจาก ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์อีกด้วย ในระบบการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าความแข็งแรง ในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะทั้ง 3 ชนิด มีแนวโน้มลดลง ตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของ ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์

สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานกับโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจาก ยางคอมปานด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.27 (b) พบว่าในระบบการวัลคาไนซ์แบบกัมมันต์ ความ แข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะเหล็กมีค่าลดลง ตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของยาง กราฟต์โคพอลิเมอร์ ในส่วนของการติดประสานกับโลหะอะลูมิเนียมและทองแดง พบว่าความ แข็งแรงในการติดประสานมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น แต่ยังมีค่า ต่ำกว่าการติดประสานของยางที่ปราศจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ แต่สำหรับในระบบการวัลคา- ไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าความแข็งแรงในการติดประสานกับโลหะเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น ตาม ปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้น โดยที่ความแข็งแรงในการติดประสานของยางกราฟต์ โคพอลิเมอร์ที่ปริมาณ 33 phr มีค่าสูงสุดเมื่อยึดติดกับโลหะเหล็ก

สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานกับโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจาก ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.27 (c) พบว่าปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ไม่มีผล ในการเพิ่มความแข็งแรงของการติดประสานระหว่างยางกับโลหะเหล็ก นอกจากนี้ยังพบว่า ความแข็งแรงในการติดประสานของโลหะเหล็กยังมีค่าการติดประสานสูงสุดอีกด้วย เมื่อเปรียบ เทียบกับการติดประสานของโลหะอะลูมิเนียม และทองแดง ทุกปริมาณของยางกราฟต์โคพอลิ เมอร์ ทั้งในระบบการวัลคาไนซ์แบบกัมมันต์ และเปอร์ออกไซด์

สำหรับค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่รองพื้นด้วย สารรองพื้น Chemlok 205A ดังแสดงในรูปที่ 4.27 (d) พบว่าค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะเหล็ก อะลูมิเนียม และทองแดง มีแนวโน้มลดลง ตามปริมาณยางกราฟต์โค พอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้น ทั้งในระบบการวัลคาไนซ์แบบกัมมันต์ และเปอร์ออกไซด์ เช่นเดียวกับการ ติดประสานของโลหะที่เตรียมผิวด้วยวิธีการพ่นทราย ดังแสดงในรูปที่ 4.26 (d)

4.4.2.2 ผลของชนิดโลหะต่อความสามารถในการติดประสานระหว่างคอมปานด์ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์กับโลหะ

ศึกษาความสามารถในการติดประสานของโลหะ 3 ชนิด ได้แก่ เหล็ก (steel) อะลูมิเนียม (aluminium) และทองแดง (copper) โดยนำแผ่นโลหะที่มีความหนา 1.6 ± 0.1 มิลลิเมตร กว้าง 25 ± 0.05 มิลลิเมตร และยาว 60 มิลลิเมตร มาทำการเตรียมผิวด้วยวิธีทางกล และทางเคมี ตามหัวข้อ 3.3.1.4 จากนั้นนำยางคอมปานด์ที่เตรียมได้จากหัวข้อ 3.3.1.1 ซึ่ง

แสดงปริมาณยางและสารเคมีดังตารางที่ 3.4 และ 3.5 มายึดติดกับแผ่นโลหะ โดยขั้นตอนในการเตรียมชิ้นทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.2 แล้วทำการวัลคาไนซ์ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเบ้า ที่อุณหภูมิ 150°C (วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถัน) และอุณหภูมิ 160°C (วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์) หลังจากนั้นทดสอบความสามารถในการติดประสานแบบปอก ด้วยมุม 90 องศา ตามหัวข้อ 3.3.4.2 ซึ่งผลของชนิดโลหะต่อความสามารถในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่ปราศจากสารรองพื้น แสดงดังตารางที่ 4.57–4.58 และรูปที่ 4.28 การติดประสานของโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นที่เตรียมขึ้นจากยางคอมพอนด์ แสดงดังตารางที่ 4.59–4.60 และรูปที่ 4.29 การติดประสานของโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นที่เตรียมขึ้นจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ แสดงดังตารางที่ 4.61–4.62 และรูปที่ 4.30 การติดประสานของโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นทางการค้า (Chemlok 205A) แสดงดังตารางที่ 4.63–4.64 และรูปที่ 4.31 ตามลำดับดังนี้

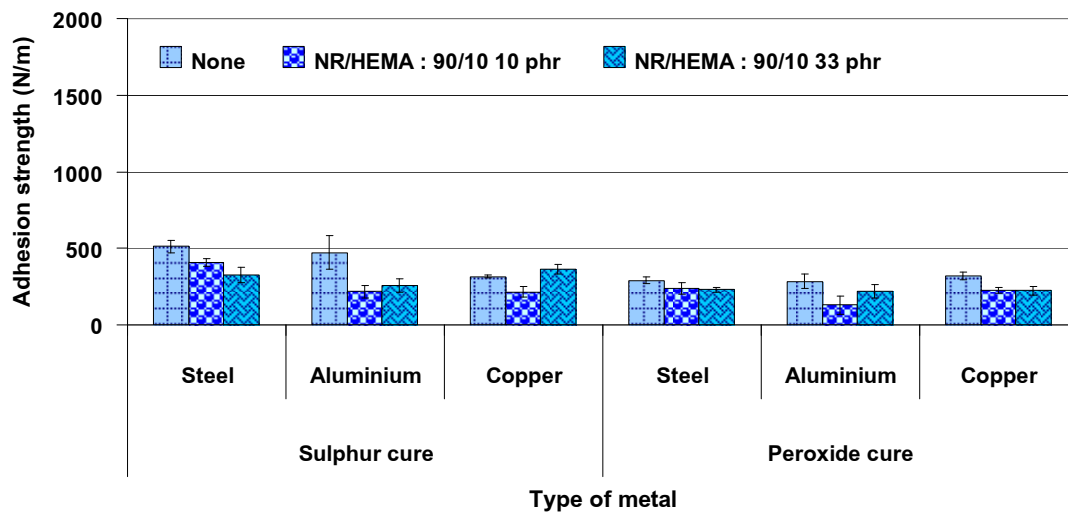
1) การติดประสานระหว่างยางกับโลหะ โดยปราศจากสารรองพื้น (Without primer)

ตารางที่ 4.57 ชนิดของโลหะ กับการใช้ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ปริมาณต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ (พันทราย) ที่ปราศจากสารรองพื้น

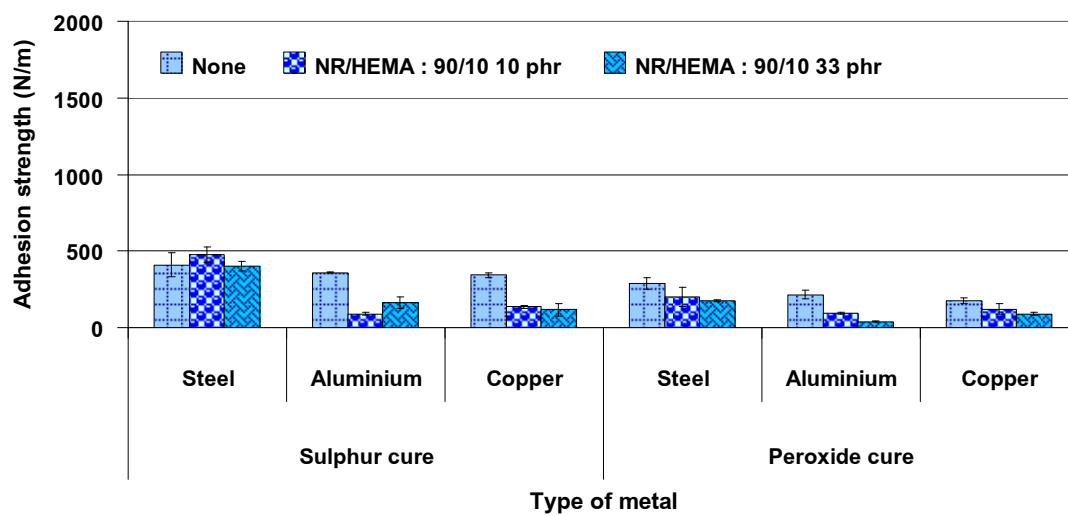
| Vulcanization system | Type of metal | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|---------------|-------------------------|-------------------|-------------------|---------------|---|
| | | None | NR/HEMA : | NR/HEMA : | R* | M |
| | | | 90/10 10 phr | 90/10 33 phr | | |
| Sulphur cure | Steel | 512.53 ± 40.47 | 406.77 ± 23.20 | 327.31 ± 49.57 | | ✓ |
| | Aluminium | 472.72 ± 109.43 | 217.33 ± 42.73 | 255.51 ± 44.18 | | ✓ |
| | Copper | 314.65 ± 9.22 | 215.70 ± 33.44 | 365.00 ± 32.54 | | ✓ |
| Peroxide cure | Steel | 289.25 ± 21.96 | 237.51 ± 36.93 | 229.25 ± 15.82 | | ✓ |
| | Aluminium | 284.00 ± 45.41 | 128.69 ± 60.11 | 217.28 ± 43.88 | | ✓ |
| | Copper | 319.08 ± 26.93 | 226.80 ± 17.24 | 223.17 ± 27.34 | | ✓ |

ตารางที่ 4.58 ชนิดของโลหะ กับการใช้ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ปริมาณต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ (กัดผิวด้วยกรด) ที่ปราศจากสารรองพื้น

| Vulcanization system | Type of metal | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|---------------|-------------------------|-------------------|-------------------|---------------|---|
| | | None | NR/HEMA : | NR/HEMA : | R* | M |
| | | | 90/10 10 phr | 90/10 33 phr | | |
| Sulphur cure | Steel | 408.90 ± 78.18 | 475.79 ± 49.39 | 401.99 ± 30.80 | | ✓ |
| | Aluminium | 357.96 ± 3.28 | 90.76 ± 9.57 | 164.26 ± 37.76 | | ✓ |
| | Copper | 343.03 ± 15.80 | 136.03 ± 9.73 | 116.80 ± 41.68 | | ✓ |
| Peroxide cure | Steel | 288.19 ± 38.76 | 200.01 ± 63.51 | 176.56 ± 5.73 | | ✓ |
| | Aluminium | 214.74 ± 27.91 | 96.75 ± 6.56 | 38.38 ± 3.66 | | ✓ |
| | Copper | 175.49 ± 21.82 | 120.50 ± 33.67 | 89.84 ± 8.68 | | ✓ |



(a) Mechanical treatment (sand blasting)



(b) Chemical treatment (acid etching)

รูปที่ 4.28 ชนิดของโลหะ กับการใช้ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ปริมาณต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะ โดยปราศจากสารรองพื้น

ผลการทดสอบความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ โดยมีการเปรียบเทียบความแข็งแรงในการติดประสานของโลหะ 3 ชนิด ได้แก่โลหะเหล็ก อะลูมิเนียม และทองแดง ที่ปราศจากสารรองพื้น ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.57–4.58 และรูปที่ 4.28 ซึ่งพบว่าความล้มเหลวในการติดประสานเป็นแบบแอตฮีซีฟ ทุกชนิดของโลหะ ทุกวิธีการเตรียมผิว และทุกปริมาณของยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีการพ่นทราย ดังแสดงในรูปที่ 4.28 (a) พบว่าในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน โลหะเหล็กมีแนวโน้มในการเกิดพันธะการยึดติดกับยางได้สูงกว่าโลหะชนิดอื่นๆ ทุกปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ รวมทั้งยางที่ปราศจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์อีกด้วย ในการติดประสานของยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าโลหะทองแดง มีความแข็งแรงในการติดประสานสูงสุด เมื่อยึดติดกับยางที่ปราศจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์

สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีการกัดผิวด้วยกรด ดังแสดงในรูปที่ 4.28 (b) พบว่าในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน โลหะเหล็กมีความสามารถในการเกิดพันธะหรือแรงยึดเหนี่ยวในการยึดติดกับยางได้สูงกว่าโลหะอะลูมิเนียม และทองแดงทุกปริมาณของยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ โดยมีค่าการติดประสานสูงสุด เมื่อใช้ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ ปริมาณ 10 phr สำหรับในระบบการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์ พบว่ามีแนวโน้มในการติดประสานที่เป็นแนวทางเดียวกับการวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถัน กล่าวคือ โลหะเหล็กมีความแข็งแรงในการติดประสานสูงกว่าโลหะชนิดอื่นๆ โดยที่มีค่าการติดประสานสูงสุด เมื่อยึดติดกับยางที่ปราศจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์

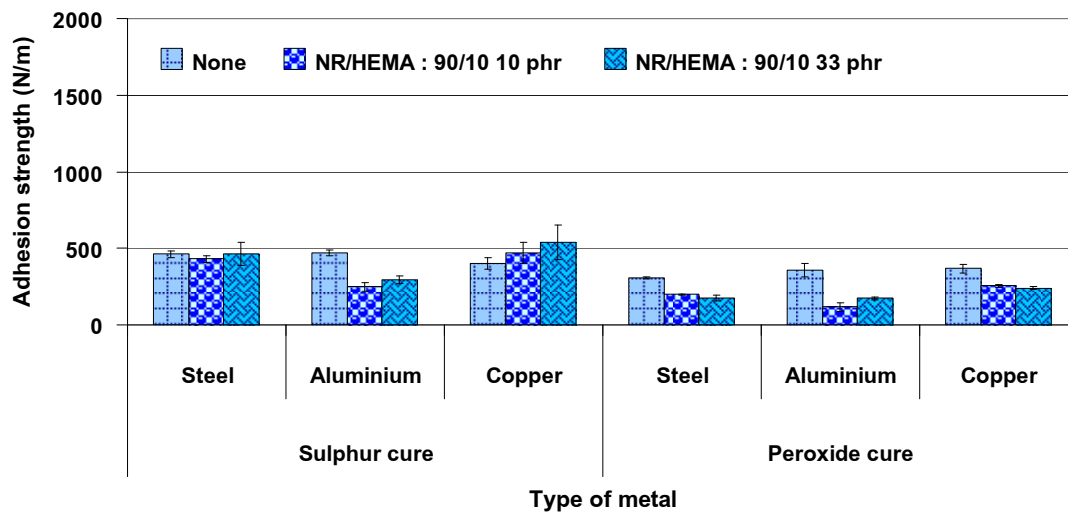
2) การติดประสานระหว่างยางกับโลหะ ที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมพอนด์ (Primer compound solution)

ตารางที่ 4.59 ชนิดของโลหะ กับการใช้ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ปริมาณต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ (พ่นทราย) ที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมพอนด์

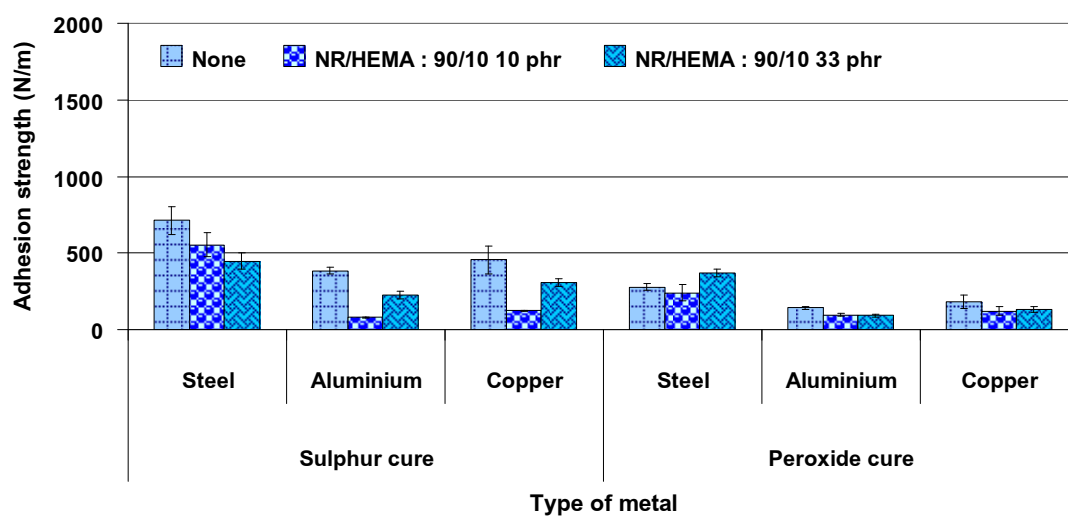
| Vulcanization system | Type of metal | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|---------------|-------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------|---|
| | | None | NR/HEMA : 90/10 10 phr | NR/HEMA : 90/10 33 phr | R* | M |
| Sulphur cure | Steel | 461.80 | 430.09 | 463.49 | | ✓ |
| | | ± 22.66 | ± 19.80 | ± 76.54 | | |
| | Aluminium | 471.94 | 247.84 | 294.09 | | ✓ |
| | | ± 19.63 | ± 27.66 | ± 22.79 | | |
| | Copper | 399.85 | 471.43 | 539.24 | | ✓ |
| | | ± 38.92 | ± 69.04 | ± 112.54 | | |
| Peroxide cure | Steel | 309.55 | 198.95 | 175.63 | | ✓ |
| | | ± 6.16 | ± 2.76 | ± 20.67 | | |
| | Aluminium | 359.64 | 116.54 | 173.25 | | ✓ |
| | | ± 43.74 | ± 28.42 | ± 9.83 | | |
| | Copper | 368.32 | 253.92 | 241.24 | | ✓ |
| | | ± 29.31 | ± 11.37 | ± 7.53 | | |

ตารางที่ 4.60 ชนิดของโลหะ กับการใช้ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ปริมาณต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ (กััดผิวด้วยกรด) ที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมเพานด์

| Vulcanization system | Type of metal | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|---------------|-------------------------|-------------------|-------------------|---------------|---|
| | | None | NR/HEMA : | NR/HEMA : | R* | M |
| | | | 90/10 10 phr | 90/10 33 phr | | |
| Sulphur cure | Steel | 714.49 ± 90.91 | 554.71 ± 80.12 | 448.03 ± 53.55 | | ✓ |
| | Aluminium | 385.53 ± 22.21 | 78.83 ± 2.55 | 224.83 ± 26.07 | | ✓ |
| | Copper | 455.39 ± 92.59 | 123.37 ± 3.86 | 307.76 ± 25.17 | | ✓ |
| Peroxide cure | Steel | 277.09 ± 23.06 | 240.26 ± 52.32 | 369.78 ± 22.80 | | ✓ |
| | Aluminium | 141.71 ± 11.47 | 95.55 ± 8.44 | 92.87 ± 9.26 | | ✓ |
| | Copper | 182.15 ± 44.64 | 121.78 ± 29.37 | 133.73 ± 18.50 | | ✓ |



(a) Mechanical treatment (sand blasting)



(b) Chemical treatment (acid etching)

รูปที่ 4.29 ชนิดของโลหะ กับการใช้ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ปริมาณต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมปานด์

ผลการทดสอบความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ โดยมีการเปรียบเทียบความแข็งแรงในการติดประสานของโลหะ 3 ชนิด ได้แก่โลหะเหล็ก อะลูมิเนียม และทองแดง ที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมพอนด์ ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.59-4.60 และรูปที่ 4.29 ซึ่งพบว่าความล้มเหลวในการติดประสานเป็นแบบแอตฮีซีฟ ทุกชนิดของโลหะ ทุกวิธีการเตรียมผิว และทุกปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีการพ่นทราย ดังแสดงในรูปที่ 4.29 (a) พบว่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะทองแดงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้น โดยยางกราฟต์ที่ปริมาณ 33 phr มีค่าความแข็งแรงในการติดประสานสูงสุด สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานของยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าโลหะทองแดงมีค่าความแข็งแรงในการติดประสานสูงกว่าโลหะชนิดอื่นๆ ทุกปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ โดยที่ความแข็งแรงในการติดประสานมีค่าสูงสุดเมื่อยึดติดกับยางที่ปราศจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ เช่นเดียวกับการติดประสานของโลหะที่ปราศจากสารรองพื้น ดังแสดงในรูปที่ 4.28 (a)

สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีการกัดผิวด้วยกรด ดังแสดงในรูปที่ 4.29 (b) พิจารณาการติดประสานระหว่างยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันกับโลหะทั้ง 3 ชนิด พบว่าโลหะเหล็กมีความสามารถในการเกิดพันธะที่แข็งแรงกว่าโลหะชนิดอื่นๆ ทุกปริมาณของยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ อีกทั้งยังให้ความแข็งแรงในการติดประสานสูงสุดกับยางที่ปราศจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์อีกด้วย ความแข็งแรงในการติดประสานของยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าโลหะเหล็กมีแนวโน้มในการติดประสานที่สูงกว่าการยึดติดกับโลหะอะลูมิเนียม และทองแดง เช่นเดียวกับในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน โดยโลหะเหล็กมีความแข็งแรงในการติดประสานสูงสุดเมื่อยึดติดกับยางที่ใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ปริมาณ 33 phr

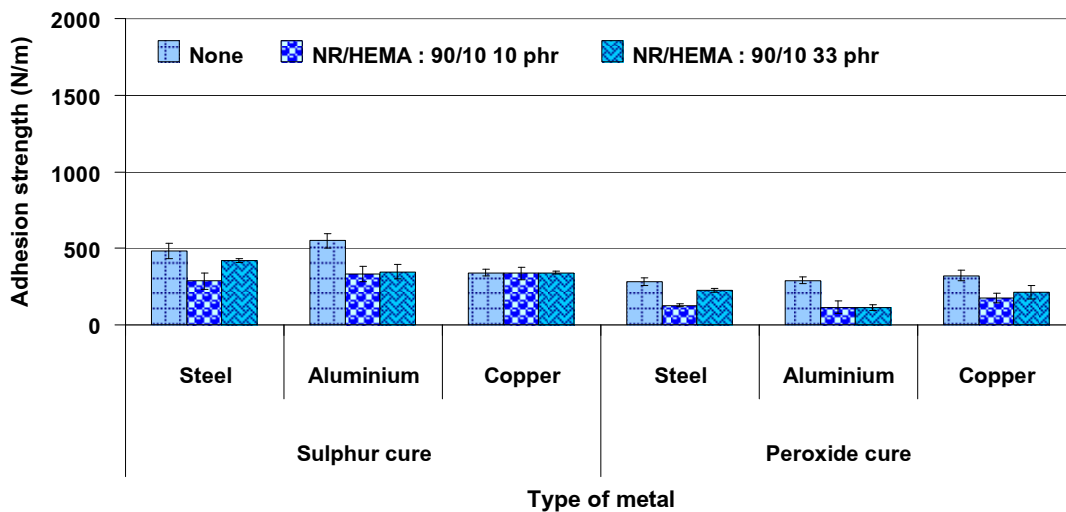
3) การติดประสานระหว่างยางกับโลหะ ที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางกราฟต์ โคพอลิเมอร์ (Primer NR-g-HEMA solution)

ตารางที่ 4.61 ชนิดของโลหะ กับการใช้ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ปริมาณต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ (พ่นทราย) ที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์

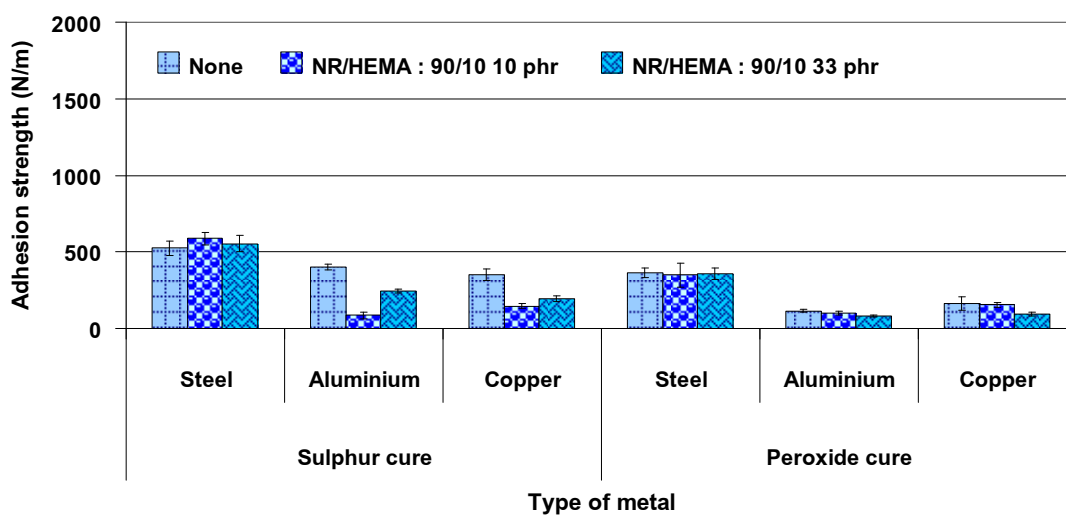
| Vulcanization system | Type of metal | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|---------------|-------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------|---|
| | | None | NR/HEMA : 90/10 10 phr | NR/HEMA : 90/10 33 phr | R* | M |
| Sulphur cure | Steel | 482.56 ± 50.24 | 285.50 ± 53.99 | 420.17 ± 10.82 | | ✓ |
| | Aluminium | 550.28 ± 46.23 | 331.06 ± 48.55 | 347.31 ± 49.41 | | ✓ |
| | Copper | 340.12 ± 22.16 | 336.75 ± 41.34 | 340.77 ± 10.29 | | ✓ |
| Peroxide cure | Steel | 284.12 ± 25.64 | 127.03 ± 10.03 | 226.63 ± 13.64 | | ✓ |
| | Aluminium | 290.12 ± 20.87 | 114.22 ± 41.62 | 113.75 ± 17.76 | | ✓ |
| | Copper | 322.20 ± 32.04 | 174.34 ± 32.89 | 212.35 ± 45.02 | | ✓ |

ตารางที่ 4.62 ชนิดของโลหะ กับการใช้ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ปริมาณต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ (กัดผิวด้วยกรด) ที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์

| Vulcanization system | Type of metal | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|---------------|-------------------------|-------------------|-------------------|---------------|---|
| | | None | NR/HEMA : | NR/HEMA : | R* | M |
| | | | 90/10 10 phr | 90/10 33 phr | | |
| Sulphur cure | Steel | 524.23 ± 48.20 | 588.28 ± 40.91 | 551.89 ± 53.30 | | ✓ |
| | Aluminium | 401.46 ± 20.48 | 87.68 ± 21.98 | 243.81 ± 12.90 | | ✓ |
| | Copper | 352.56 ± 36.84 | 147.05 ± 14.43 | 194.72 ± 16.75 | | ✓ |
| Peroxide cure | Steel | 364.58 ± 33.12 | 349.42 ± 79.51 | 356.94 ± 37.29 | | ✓ |
| | Aluminium | 115.37 ± 11.56 | 101.13 ± 11.16 | 80.83 ± 7.36 | | ✓ |
| | Copper | 164.32 ± 42.38 | 153.79 ± 12.86 | 93.98 ± 14.92 | | ✓ |



(a) Mechanical treatment (sand blasting)



(b) Chemical treatment (acid etching)

รูปที่ 4.30 ชนิดของโลหะ กับการใช้ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ปริมาณต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์

ผลการทดสอบความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ โดยมีการเปรียบเทียบความแข็งแรงในการติดประสานของโลหะ 3 ชนิด ได้แก่โลหะเหล็ก อะลูมิเนียม และทองแดง ที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.61–4.62 และรูปที่ 4.30 จากผลการทดสอบพบว่าความล้มเหลวในการติดประสานเป็นแบบแอดฮีซีฟ ทุกชนิดของโลหะ ทุกวิธีการเตรียมผิว และทุกปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีการพ่นทราย ดังแสดงในรูปที่ 4.30 (a) พบว่าในระบบการวัลคาไนซ์แบบก้ำมะถัน ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะอะลูมิเนียมมีค่าสูงสุด เมื่อยึดติดกับยางที่ปราศจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานของโลหะชนิดอื่นๆ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ในส่วนของการติดประสานของยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าความแข็งแรงในการติดประสานของโลหะทองแดงมีค่าสูงกว่าโลหะเหล็ก และอะลูมิเนียมทุกปริมาณของยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ โดยที่มีค่าความแข็งแรงในการติดประสานสูงสุด เมื่อยึดติดกับยางที่ปราศจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ เช่นเดียวกับการติดประสานของโลหะที่ปราศจากสารรองพื้น และโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมพอนด์

สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีการกัดผิวด้วยกรด ดังแสดงในรูปที่ 4.30 (b) พบว่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบก้ำมะถันและเปอร์ออกไซด์กับโลหะเหล็ก มีแนวโน้มในการติดประสานที่เป็นแนวทางเดียวกัน กล่าวคือ ปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์มีผลต่อความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะเพียงเล็กน้อย เนื่องจากความแข็งแรงในการติดประสานของโลหะเหล็กกับยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ปริมาณต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ความแข็งแรงในการติดประสานมีค่าสูงกว่าการยึดติดกับโลหะอะลูมิเนียม และทองแดง ทั้งในระบบการวัลคาไนซ์ แบบก้ำมะถันและเปอร์ออกไซด์

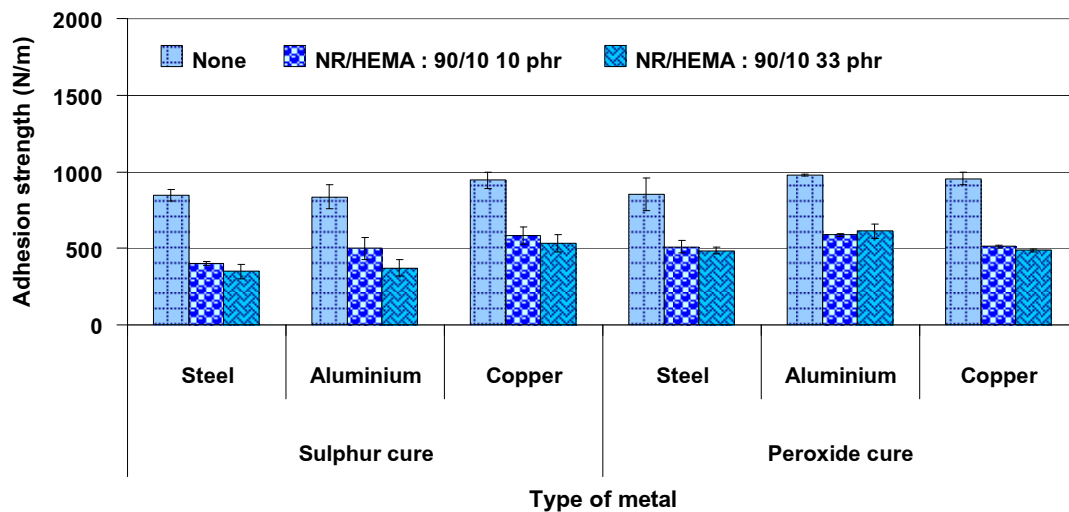
4) การติดประสานระหว่างยางกับโลหะ ที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นทางการค้า
(Primer chemlok205A)

ตารางที่ 4.63 ชนิดของโลหะ กับการใช้ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ปริมาณต่างๆ ต่อค่าความ
แข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ (พินทราย) ที่รองพื้นด้วยสาร
รองพื้นทางการค้า

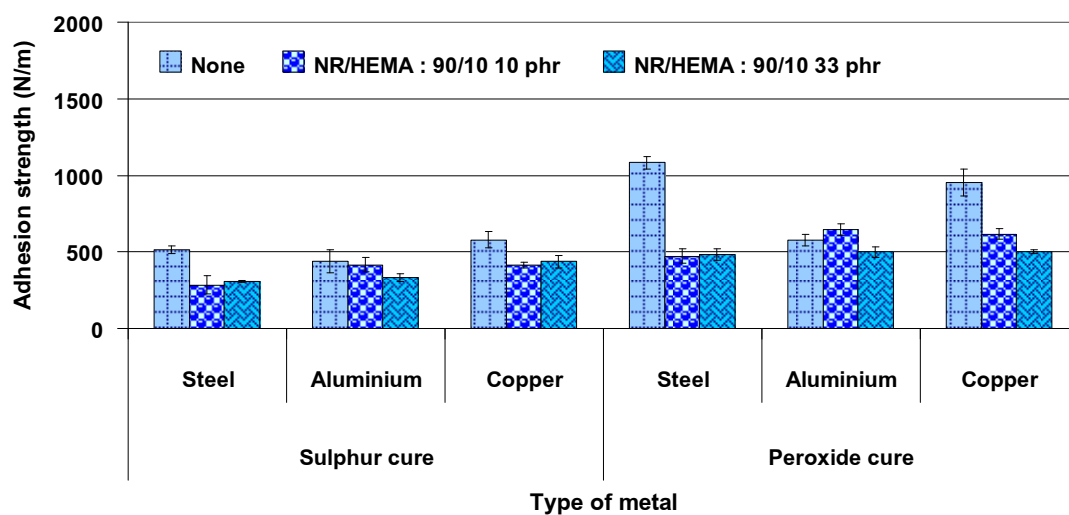
| Vulcanization system | Type of metal | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|---------------|-------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------|---|
| | | None | NR/HEMA : 90/10 10 phr | NR/HEMA : 90/10 33 phr | R* | M |
| Sulphur cure | Steel | 848.28 ± 38.57 | 401.13 ± 12.36 | 348.46 ± 47.87 | | ✓ |
| | Aluminium | 836.11 ± 76.67 | 500.01 ± 72.10 | 372.82 ± 54.29 | | ✓ |
| | Copper | 944.64 ± 54.47 | 582.13 ± 56.69 | 532.39 ± 55.25 | | ✓ |
| Peroxide cure | Steel | 852.34 ± 107.46 | 509.98 ± 39.93 | 485.04 ± 22.96 | | ✓ |
| | Aluminium | 979.41 ± 4.81 | 586.99 ± 9.32 | 613.23 ± 47.19 | | ✓ |
| | Copper | 955.55 ± 39.46 | 511.56 ± 8.02 | 486.10 ± 10.89 | | ✓ |

ตารางที่ 4.64 ชนิดของโลหะ กับการใช้ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ปริมาณต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ (กัดผิวด้วยกรด) ที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นทางการค้า

| Vulcanization system | Type of metal | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|---------------|-------------------------|-------------------|-------------------|---------------|---|
| | | None | NR/HEMA : | NR/HEMA : | R* | M |
| | | | 90/10 10 phr | 90/10 33 phr | | |
| Sulphur cure | Steel | 515.07 ± 23.13 | 284.07 ± 60.66 | 308.29 ± 7.66 | | ✓ |
| | Aluminium | 437.99 ± 76.82 | 416.23 ± 49.03 | 331.09 ± 23.43 | | ✓ |
| | Copper | 578.98 ± 53.26 | 413.48 ± 18.60 | 436.00 ± 40.24 | | ✓ |
| Peroxide cure | Steel | 1082.09 ± 39.80 | 472.56 ± 45.88 | 482.44 ± 35.67 | | ✓ |
| | Aluminium | 576.36 ± 38.40 | 645.66 ± 40.53 | 498.87 ± 35.96 | | ✓ |
| | Copper | 952.27 ± 89.21 | 616.50 ± 32.89 | 503.40 ± 11.66 | | ✓ |



(a) Mechanical treatment (sand blasting)



(b) Chemical treatment (acid etching)

รูปที่ 4.31 ชนิดของโลหะ กับการใช้ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ปริมาณต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นทางการค้า

ผลการทดสอบความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ โดยมีการเปรียบเทียบความแข็งแรงในการติดประสานของโลหะ 3 ชนิด ได้แก่โลหะเหล็ก อะลูมิเนียม และทองแดง ที่รองพื้นด้วยสารรองพื้น Chemlok 205A ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.63–4.64 และรูปที่ 4.31 จากผลการทดสอบพบว่าความล้มเหลวในการติดประสานเป็นแบบแอตอีซีฟ ทุกชนิดของโลหะ ทุกวิธีการเตรียมผิว และทุกปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีการพ่นทราย ดังแสดงในรูปที่ 4.31 (a) พบว่าโลหะทองแดงมีความสามารถในการติดประสานกับยางวัลคาไนซ์ด้วยระบบก้ำมะถันทั้งที่ใส่ และไม่ใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ได้สูงกว่าโลหะอะลูมิเนียม และเหล็ก อีกทั้งยังมีความแข็งแรงในการติดประสานสูงสุดอีกด้วย ในขณะที่การวัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ ส่งผลให้โลหะอะลูมิเนียมมีแนวโน้มในการติดประสานกับยางทั้งที่ใส่ และไม่ใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์สูงกว่าโลหะทองแดง และเหล็ก ตามลำดับ

สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีการกัดผิวด้วยกรด ดังแสดงในตารางที่ 4.64 และรูปที่ 4.31 (b) พบว่าในระบบการวัลคาไนซ์แบบก้ำมะถัน โลหะทองแดงมีแนวโน้มในการติดประสานกับยางทั้งที่ใส่ และไม่ใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ ได้สูงกว่าโลหะอะลูมิเนียม และเหล็ก ในระบบการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าโลหะเหล็ก และทองแดงมีค่าการติดประสานกับยางที่ปราศจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ใกล้เคียงกัน อีกทั้งยังมีความแข็งแรงในการยึดติดสูงกว่าโลหะชนิดอื่นๆ ถึงแม้จะมีการเพิ่มปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ก็ตาม

4.4.2.3 ผลของวิธีการเตรียมผิวโลหะต่อความสามารถในการติดประสาน

ระหว่างคอมปานด์ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์กับโลหะ

ศึกษาผลจากการเตรียมผิวโลหะ โดยในที่นี้ได้ทำการศึกษาการเตรียมผิวโลหะ 2 วิธี ได้แก่ วิธีทางกล คือ การทำความสะอาดผิวด้วยวิธีการพ่นทราย (sand blasting) และการเตรียมผิวด้วยวิธีทางเคมี (กัดผิวด้วยกรด) ซึ่งวิธีการในการเตรียมผิวโลหะนั้น ได้นำโลหะเหล็ก อะลูมิเนียม และทองแดง มาทำความสะอาดผิวตามหัวข้อ 3.3.1.4 (ข้อ 1.2 และข้อ 2) และนำมายึดติดกับยางคอมปานด์ในแต่ละสูตรตามตารางที่ 3.4 และ 3.5 นอกจากนั้นก่อนที่จะนำยางคอมปานด์มายึดติดกับโลหะได้นั้น ต้องมีการรองพื้นผิวโลหะด้วยสารรองพื้น 3 ชนิด ได้แก่ สารรองพื้นที่เตรียมขึ้นจากยางคอมปานด์ (primer compound) สารรองพื้นที่เตรียมขึ้นจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ (primer NR-g-HEMA) และสารรองพื้นที่ทางการค้า (Primer chemlok 205A) ก่อนนำไปยึดติดกับยางคอมปานด์ในขั้นตอนต่อไป เพื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงในการติดประสานกับโลหะที่ปราศจากสารรองพื้น โดยขั้นตอนในการเตรียมขึ้นทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.2 แล้วทำการวัลคาไนซ์ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแก้ว (compression molding) ที่อุณหภูมิ 150°C (วัลคาไนซ์ด้วยระบบก้ำมะถัน) และอุณหภูมิ 160°C (วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์)

จากนั้นทดสอบความสามารถในการติดประสานแบบปก ด้วยมุม 90 องศา ตามหัวข้อ 3.3.4.2 ซึ่งผลของวิธีการเตรียมผิวโลหะต่อความแข็งแรงในการติดประสาน โดยใช้ยางคอมพอนด์ที่ปราศจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์แสดงดังตารางที่ 4.65–4.68 และรูปที่ 4.32 ยางคอมพอนด์ใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนโมล NR-g-HEMA : 90/10 ปริมาณ 10 phr แสดงดังตารางที่ 4.69–4.72 และรูปที่ 4.33 ยางคอมพอนด์ใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนโมล NR-g-HEMA : 90/10 ปริมาณ 33 phr แสดงดังตารางที่ 4.73–4.76 และรูปที่ 4.34 ตามลำดับดังนี้

1) การติดประสานระหว่างยางปราศจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์กับโลหะชนิดต่าง ๆ

ตารางที่ 4.65 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางที่ปราศจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์กับโลหะ (ปราศจากสารรองพื้น)

| Vulcanization system | Surface pre-treatment | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------|-------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | Sand blasting | 512.53 ± 40.47 | 472.72 ± 109.43 | 314.65 ± 9.22 | | ✓ |
| | Acid etching | 408.90 ± 78.18 | 357.96 ± 3.28 | 343.03 ± 15.80 | | ✓ |
| Peroxide cure | Sand blasting | 289.25 ± 21.96 | 284.00 ± 45.41 | 319.08 ± 26.93 | | ✓ |
| | Acid etching | 288.19 ± 38.76 | 214.74 ± 27.91 | 175.49 ± 21.82 | | ✓ |

ตารางที่ 4.66 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางที่ปราศจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์กับโลหะ (รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมปานด์)

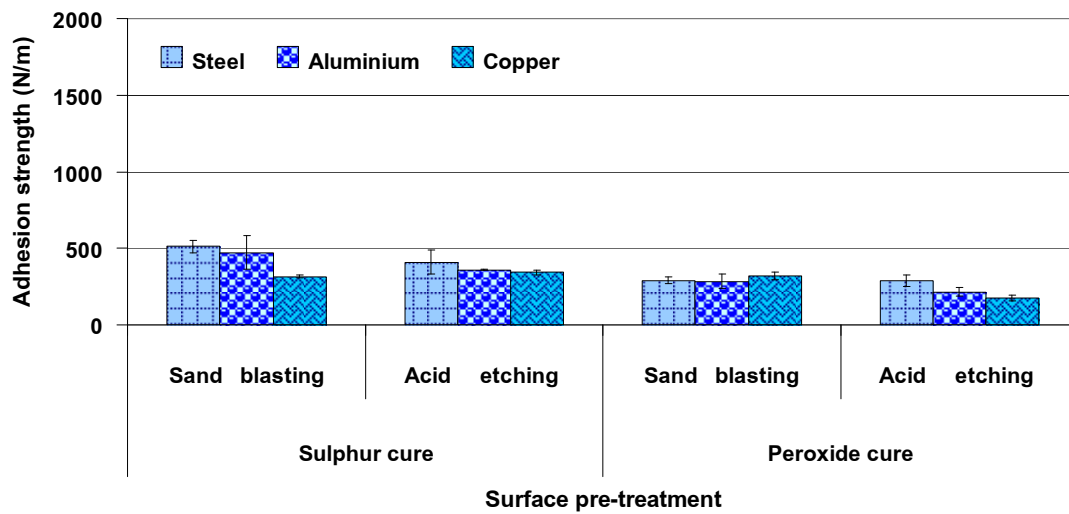
| Vulcanization system | Surface pre-treatment | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | Sand blasting | 461.80 ± 22.66 | 471.94 ± 19.63 | 399.85 ± 38.92 | | ✓ |
| | Acid etching | 714.49 ± 90.91 | 385.53 ± 22.21 | 455.39 ± 92.59 | | ✓ |
| | Sand blasting | 309.55 ± 6.16 | 359.64 ± 43.74 | 368.32 ± 29.31 | | ✓ |
| | Acid etching | 277.09 ± 23.06 | 141.71 ± 11.47 | 182.15 ± 44.64 | | ✓ |

ตารางที่ 4.67 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางที่ปราศจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์กับโลหะ (รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์)

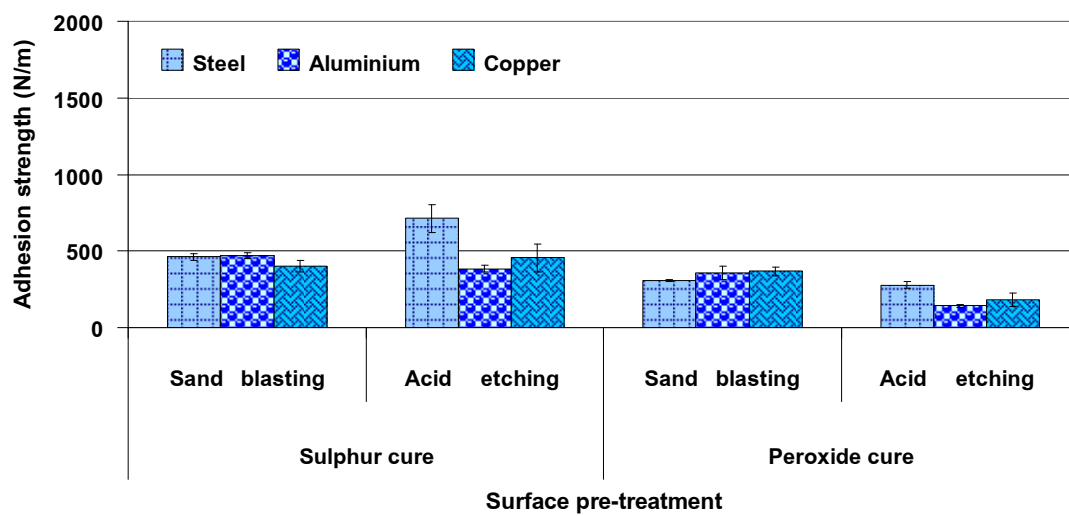
| Vulcanization system | Surface pre-treatment | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | Sand blasting | 482.56 ± 50.24 | 550.28 ± 46.23 | 340.12 ± 22.16 | | ✓ |
| | Acid etching | 524.23 ± 48.20 | 401.46 ± 20.48 | 352.56 ± 36.84 | | ✓ |
| | Sand blasting | 284.12 ± 25.64 | 290.12 ± 20.87 | 322.20 ± 32.04 | | ✓ |
| | Acid etching | 364.58 ± 33.12 | 115.37 ± 11.56 | 164.32 ± 42.38 | | ✓ |

ตารางที่ 4.68 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางที่
ปราศจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์กับโลหะ (รองพื้นด้วยสารรองพื้นทางการค้า)

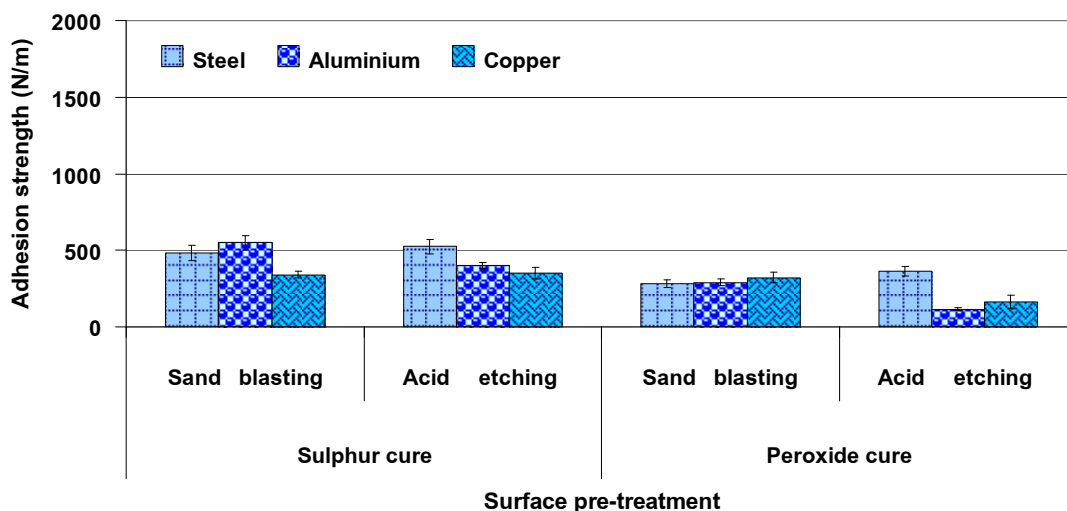
| Vulcanization system | Surface pre- treatment | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|-------------------------|------------------------------|-------------------------|-----------|---------|------------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | Sand | 848.28 | 836.11 | 944.64 | | ✓ |
| | blasting | ± 38.57 | ± 76.67 | ± 54.47 | | |
| | Acid | 515.07 | 437.99 | 578.98 | | ✓ |
| | etching | ± 23.13 | ± 76.82 | ± 53.26 | | |
| Peroxide cure | Sand | 852.34 | 979.41 | 955.55 | | ✓ |
| | blasting | ± 107.46 | ± 4.81 | ± 39.46 | | |
| | Acid | 1082.09 | 576.36 | 952.27 | | ✓ |
| | etching | ± 39.80 | ± 38.40 | ± 89.21 | | |



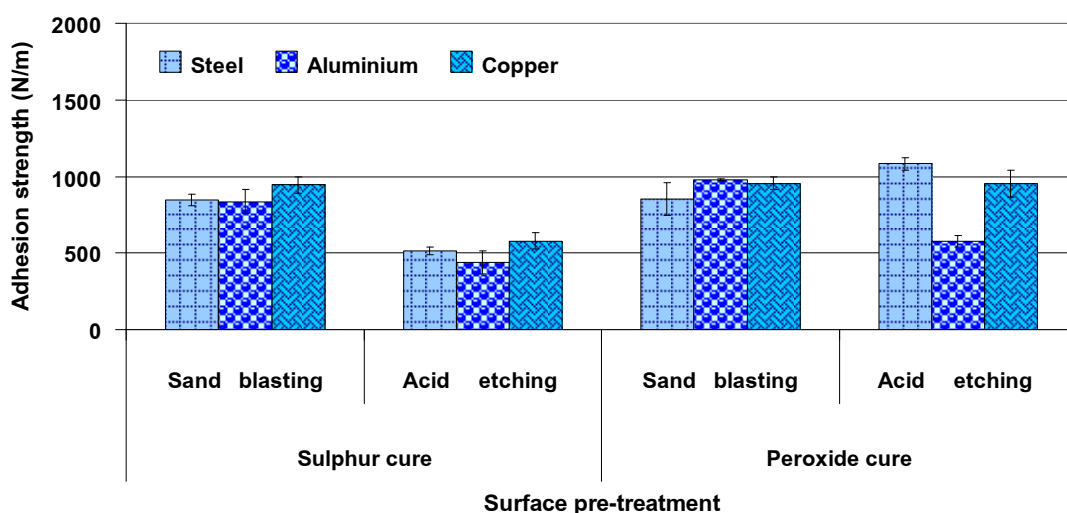
(a) Without primer



(b) With primer compound solution



(c) With primer NR-g-HEMA solution



(d) With primer chemlok205A

รูปที่ 4.32 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางปราศจาก ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ กับโลหะชนิดต่างๆ

ผลการทดสอบความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางที่ปราศจากยาง กราฟต์โคพอลิเมอร์กับโลหะที่เตรียมผิวด้วยวิธีการพ่นทราย และการกัดผิวด้วยกรด นอกจากนี้ ยังมีการรองพื้นโลหะด้วยสารรองพื้นชนิดต่างๆ ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.65–4.68 และรูปที่ 4.32 พบว่าความล้มเหลวในการติดประสานเป็นแบบแอตชีซีฟ ทุกชนิดของโลหะ ทุก วิธีการเตรียมผิว และทุกชนิดของสารรองพื้น สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานระหว่าง

ยางปราศจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์กับโลหะ (ปราศจากสารรองพื้น) ดังแสดงในรูปที่ 4.32 (a) พบว่าการเตรียมผิวโลหะด้วยวิธีการพ่นทราย มีผลต่อความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะทั้ง 3 ชนิด กล่าวคือมีแนวโน้มในการติดประสานที่แข็งแรงกว่าโลหะที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีการกัดผิวด้วยกรด ทั้งในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน และเปอร์ออกไซด์ เนื่องจากการเตรียมผิวโดยการพ่นทราย เป็นวิธีการที่ทำให้ผิวของโลหะมีพื้นผิวในการยึดติดเพิ่มขึ้น ทำให้ยางสามารถไหลเข้าไปในช่องว่างหรือรูบนพื้นผิวโลหะ และยังคงเกิดการล็อกยางติดกับผิวโลหะขณะทำการวัลคาไนซ์ยางได้มากขึ้นด้วย จึงส่งผลให้ความแข็งแรงในการติดประสานมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน โดยในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน โลหะเหล็กมีค่าการติดประสานสูงสุด แต่สำหรับในระบบการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์ กลับพบว่าโลหะที่มีค่าความแข็งแรงในการติดประสานสูงสุดคือ โลหะทองแดง

สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางที่ปราศจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์กับโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมปานด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.32 (b) ในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน พบว่า การเตรียมผิวโลหะเหล็กด้วยวิธีการกัดผิวด้วยกรด ส่งผลให้ความแข็งแรงในการยึดติดระหว่างยางกับโลหะเหล็กมีค่าสูงสุด ในขณะที่ความแข็งแรงของการติดประสานกับยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าความแข็งแรงของการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่เตรียมผิวด้วยวิธีการพ่นทราย มีค่าสูงกว่าการเตรียมผิวโดยการกัดผิวด้วยกรด ทุกชนิดของโลหะ ซึ่งโลหะทองแดงเป็นโลหะที่มีค่าความแข็งแรงในการติดประสานกับยางสูงสุด เมื่อเทียบกับโลหะอะลูมิเนียม และทองแดง ตามลำดับ

สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางที่ปราศจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์กับโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.32 (c) พบว่าการเตรียมผิวโลหะเหล็กด้วยวิธีการกัดผิวด้วยกรด มีผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงในการติดประสานกับยาง ทั้งในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถันและเปอร์ออกไซด์ เมื่อเปรียบเทียบกับ การติดประสานของโลหะเหล็กที่ผ่านการเตรียมผิวโดยการพ่นทราย สำหรับในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน พบว่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะอะลูมิเนียม (พ่นทราย) มีค่าการยึดติดสูงสุด อีกทั้งยังมีค่าใกล้เคียงกับการติดประสานของโลหะเหล็ก (กัดผิวด้วยกรด) ในขณะที่ความแข็งแรงของการติดประสานกับยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะเหล็ก (กัดผิวด้วยกรด) มีค่าการยึดติดสูงสุดอย่างเห็นได้ชัด

สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางที่ปราศจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์กับโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้น Chemlok 205A ดังแสดงในรูปที่ 4.32 (d) พบว่าความแข็งแรงในการติดประสานของโลหะเหล็ก อะลูมิเนียม และทองแดงที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยการพ่นทราย มีแนวโน้มในการติดประสานที่สูงกว่าการเตรียมผิวโดยการกัดผิวด้วยกรด ทั้งในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถันและเปอร์ออกไซด์ เนื่องจากการเตรียมผิวด้วยวิธีการพ่น

ทราย ทำให้ผิวหน้าของโลหะเกิดความขรุขระได้มากกว่าการกัดผิวด้วยกรด ดังนั้นเมื่อนำโลหะเหล่านี้มาเคลือบผิวหน้าด้วยสารรองพื้น Chemlok 205A ทำให้สารรองพื้นสามารถไหลเข้าไปภายในช่องว่างของโลหะได้ดี เมื่อนำยางคอมพอนด์มาติดกับแผ่นโลหะจึงทำให้เกิดการยึดติดทางกลที่ดีขึ้น จึงเป็นเหตุที่ทำให้ความแข็งแรงในการติดประสานของโลหะรองพื้นด้วยสารรองพื้น Chemlok 205A มีความแข็งแรงในการติดประสานที่สูงกว่าการรองพื้นด้วยสารรองพื้นเตรียมขึ้นเองอีกด้วย สำหรับในระบบการวัลคาไนซ์แบบก้ำมะถัน พบว่าความแข็งแรงในการติดประสานของโลหะทองแดง (พนทราย) มีแนวโน้มในการยึดติดกับยางสูงสุด ในขณะที่ความแข็งแรงในการติดประสานของยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าโลหะทั้ง 3 ชนิดมีแนวโน้มในการติดประสานที่ใกล้เคียงกัน

2) การติดประสานระหว่างยางใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนโมล

NR-g-HEMA : 90/10 ปริมาณ 10 phr กับโลหะชนิดต่าง ๆ

ตารางที่ 4.69 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางที่ใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนโมล NR-g-HEMA : 90/10 ปริมาณ 10 phr กับโลหะ (ปราศจากสารรองพื้น)

| Vulcanization system | Surface pre-treatment | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|-----------------------|-------------------------|-----------|---------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | Sand | 406.77 | 217.33 | 215.70 | | ✓ |
| | blasting | ± 23.20 | ± 42.73 | ± 33.44 | | |
| | Acid | 475.79 | 90.76 | 136.03 | | ✓ |
| | etching | ± 49.39 | ± 9.57 | ± 9.73 | | |
| Peroxide cure | Sand | 237.51 | 128.69 | 226.80 | | ✓ |
| | blasting | ± 36.93 | ± 60.11 | ± 17.24 | | |
| | Acid | 200.01 | 96.75 | 120.50 | | ✓ |
| | etching | ± 63.51 | ± 6.56 | ± 33.67 | | |

ตารางที่ 4.70 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางที่
ใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนโมล NR-g-HEMA : 90/10 ปริมาณ
10 phr กับโลหะ (รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมพอนด์)

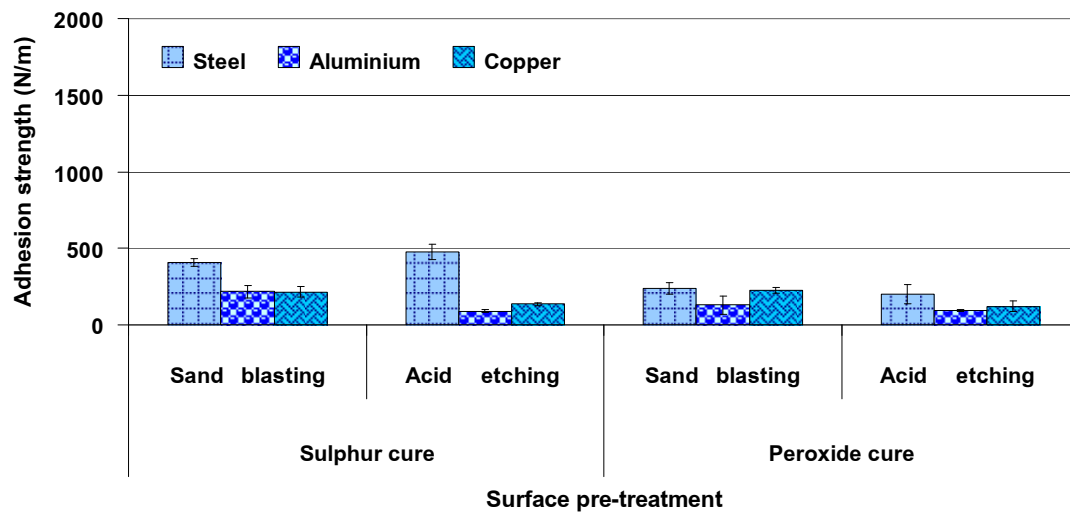
| Vulcanization system | Surface pre-treatment | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | Sand blasting | 430.09 ± 19.80 | 247.84 ± 27.66 | 471.43 ± 69.04 | | ✓ |
| | Acid etching | 554.71 ± 80.12 | 78.83 ± 2.55 | 123.37 ± 3.86 | | ✓ |
| | Sand blasting | 198.95 ± 2.76 | 116.54 ± 28.42 | 253.92 ± 11.37 | | ✓ |
| | Acid etching | 240.26 ± 52.32 | 95.55 ± 8.44 | 121.78 ± 29.37 | | ✓ |

ตารางที่ 4.71 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางที่
ใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนโมล NR-g-HEMA : 90/10 ปริมาณ
10 phr กับโลหะ (รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์)

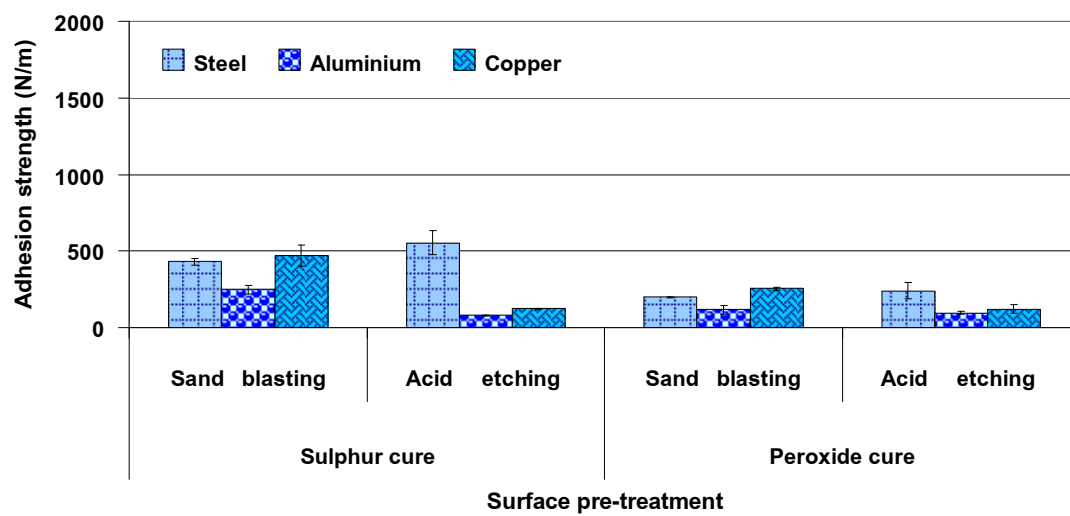
| Vulcanization system | Surface pre-treatment | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | Sand blasting | 285.50 ± 53.99 | 331.06 ± 48.55 | 336.75 ± 41.34 | | ✓ |
| | Acid etching | 588.28 ± 40.91 | 87.68 ± 21.98 | 147.05 ± 14.43 | | ✓ |
| | Sand blasting | 127.03 ± 10.03 | 114.22 ± 41.62 | 174.34 ± 32.89 | | ✓ |
| | Acid etching | 349.42 ± 79.51 | 101.13 ± 11.16 | 153.79 ± 12.86 | | ✓ |

ตารางที่ 4.72 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางที่
ใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนโมล NR-g-HEMA : 90/10 ปริมาณ
10 phr กับโลหะ (รองพื้นด้วยสารรองพื้นทางการค้า)

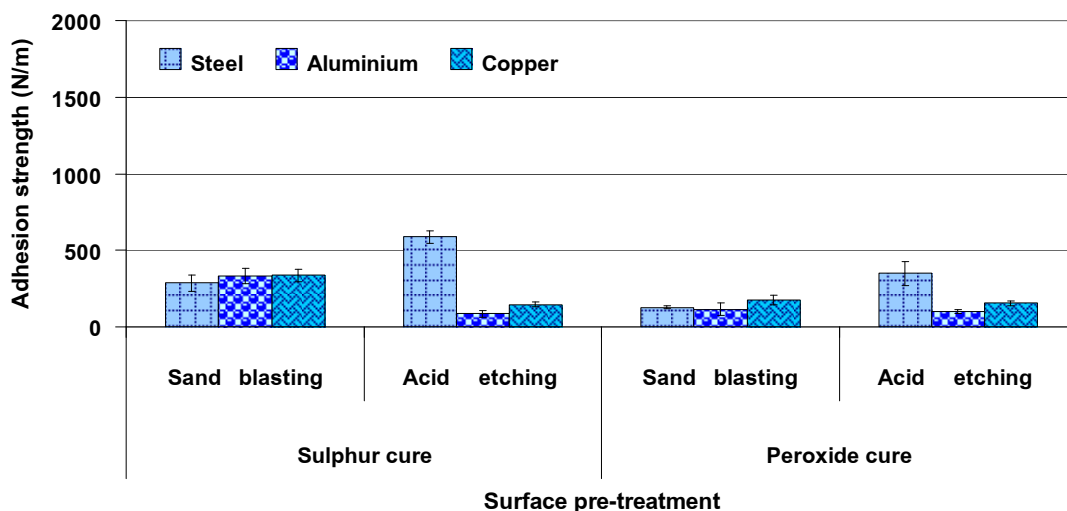
| Vulcanization system | Surface pre- treatment | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|-------------------------|------------------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|------------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | Sand blasting | 401.13 ± 12.36 | 500.01 ± 72.10 | 582.13 ± 56.69 | | ✓ |
| | Acid etching | 284.07 ± 60.66 | 416.23 ± 49.03 | 413.48 ± 18.60 | | ✓ |
| Peroxide cure | Sand blasting | 509.98 ± 39.93 | 586.99 ± 9.32 | 511.56 ± 8.02 | | ✓ |
| | Acid etching | 472.56 ± 45.88 | 645.66 ± 40.53 | 616.50 ± 32.89 | | ✓ |



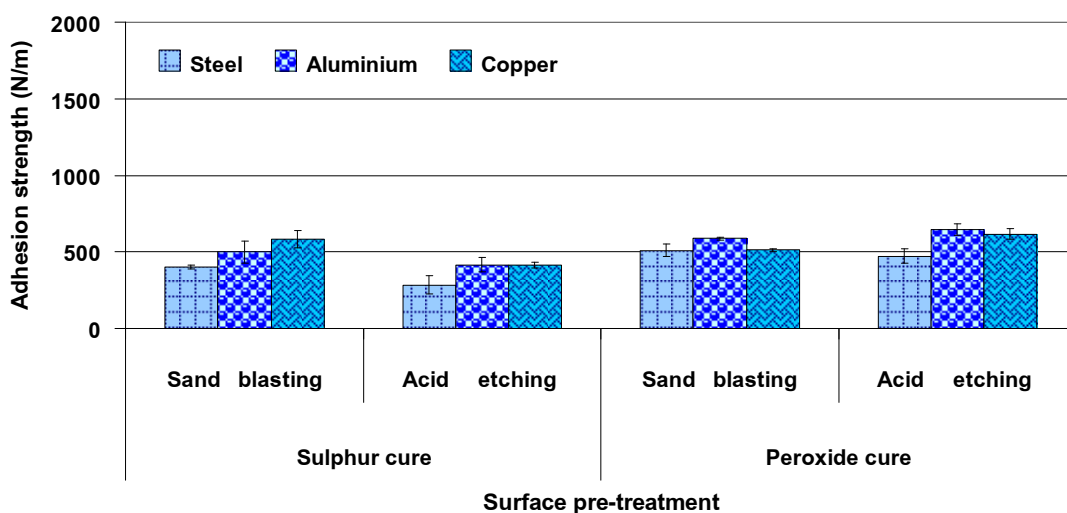
(a) Without primer



(b) With primer compound solution



(c) With primer NR-g-HEMA solution



(d) With primer chemlok205A

รูปที่ 4.33 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนโมล NR-g-HEMA : 90/10 ปริมาณ 10 phr กับโลหะชนิดต่างๆ

ผลการทดสอบความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนโมล NR-g-HEMA : 90/10 ปริมาณ 10 phr กับโลหะที่มีการเตรียมผิวด้วยวิธีการพ่นทราย และการกัดผิวด้วยกรด นอกจากนี้ยังมีการรองพื้นโลหะด้วยสารรองพื้นชนิดต่างๆ ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.69–4.72 และรูปที่ 4.33 พบว่าความล้มเหลวในการติดประสานเป็นแบบแอตชีซีฟ ทุกชนิดของโลหะ ทุกวิธีการเตรียมผิว และทุกชนิดของสาร

รองพื้น สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่ปราศจากสารรองพื้น ดังแสดงในรูปที่ 4.33 (a) พบว่าการเตรียมผิวโลหะด้วยวิธีการพ่นทราย มีผลทำให้ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะทั้ง 3 ชนิด มีแนวโน้มในการติดประสานกับโลหะอะลูมิเนียมและทองแดงที่แข็งแรงกว่าการเตรียมผิวด้วยวิธีการกัดผิวด้วยกรดอย่างชัดเจน ทั้งในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน และเปอร์ออกไซด์ สำหรับในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน พบว่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะเหล็ก มีค่าสูงสุด รองลงมาคือ โลหะอะลูมิเนียม และทองแดงที่มีความแข็งแรงในการติดประสานใกล้เคียงกัน ในขณะที่ความแข็งแรงของการติดประสานกับยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะเหล็ก มีค่าสูงสุดเช่นเดียวกัน รองลงมาคือ โลหะทองแดง และอะลูมิเนียม ตามลำดับ

สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมพอนด์ และรองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.32 (b) และ (c) พบว่ามีแนวโน้มในการติดประสานที่เป็นแนวทางเดียวกัน กล่าวคือ การเตรียมผิวโลหะโดยการกัดผิวด้วยกรด มีผลต่อความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างโลหะเหล็กกับยาง ทั้งในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถันและเปอร์ออกไซด์ แต่สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างโลหะอะลูมิเนียม และทองแดงกับยาง พบว่าการเตรียมผิวโลหะด้วยวิธีการพ่นทราย มีผลทำให้ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันและเปอร์ออกไซด์ มีค่าสูงกว่าการเตรียมผิวโดยการกัดผิวด้วยกรด ทั้งการรองพื้นผิวโลหะด้วยสารรองพื้นที่เตรียมขึ้นจากยางคอมพอนด์ และสารรองพื้นที่เตรียมขึ้นจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานของโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นที่เตรียมขึ้นจากยางคอมพอนด์ พบว่าในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน โลหะเหล็ก (กัดผิวด้วยกรด) มีความแข็งแรงในการติดประสานกับยางได้สูงสุด แต่ในระบบการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์ กลับพบว่าโลหะที่มีความแข็งแรงในการติดประสานสูงที่สุด ได้แก่ โลหะทองแดง (พ่นทราย) และสำหรับความแข็งแรงในการติดประสานของโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นที่เตรียมขึ้นจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ พบว่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างโลหะกับยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันและเปอร์ออกไซด์ มีแนวโน้มในการติดประสานที่เป็นแนวทางเดียวกัน กล่าวคือโลหะเหล็ก (กัดผิวด้วยกรด) มีความแข็งแรงในการติดประสานกับยางได้สูงสุด

สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นทางการค้า ดังแสดงในรูปที่ 4.33 (d) พบว่าความแข็งแรงในการติดประสานของโลหะที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยการพ่นทราย มีแนวโน้มในการติดประสานที่สูงกว่าการเตรียมผิวโดยการกัดผิวด้วยกรดทุกชนิดของโลหะ เมื่อยึดติดกับยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถัน โดยโลหะที่มีความแข็งแรงในการติดประสานสูงที่สุดได้แก่ โลหะทองแดง ในขณะที่ยางวัลคาไนซ์ด้วยระบบ

เปอร์ออกไซด์ มีแนวโน้มในการติดประสานกับโลหะที่เตรียมผิวด้วยวิธีการกัดด้วยกรดทุกชนิดของโลหะ ซึ่งโลหะที่มีแนวโน้มในการติดประสานสูงสุดได้แก่ โลหะอะลูมิเนียม

3) การติดประสานระหว่างยางใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนโมล NR-g-HEMA : 90/10 ปริมาณ 33 phr กับโลหะชนิดต่างๆ

ตารางที่ 4.73 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางที่ใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนโมล NR-g-HEMA : 90/10 ปริมาณ 33 phr กับโลหะ (ปราศจากสารรองพื้น)

| Vulcanization system | Surface pre-treatment | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | Sand blasting | 327.31 ± 49.57 | 255.51 ± 44.18 | 365.00 ± 32.54 | | ✓ |
| | Acid etching | 401.99 ± 30.80 | 164.26 ± 37.76 | 116.80 ± 41.68 | | ✓ |
| Peroxide cure | Sand blasting | 229.25 ± 15.82 | 217.28 ± 43.88 | 223.17 ± 27.34 | | ✓ |
| | Acid etching | 176.56 ± 5.73 | 38.38 ± 3.66 | 89.84 ± 8.68 | | ✓ |

ตารางที่ 4.74 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางที่
ใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนโมล NR-g-HEMA : 90/10 ปริมาณ
33 phr กับโลหะ (รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมพอนด์)

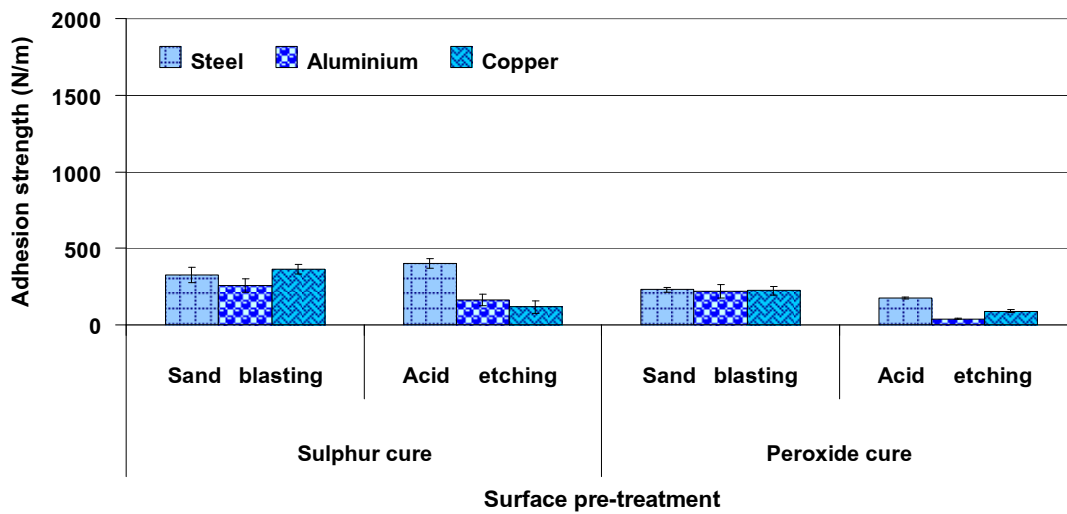
| Vulcanization system | Surface pre-treatment | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------|--------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | Sand blasting | 463.49 ± 76.54 | 294.09 ± 22.79 | 539.24 ± 112.54 | | ✓ |
| | Acid etching | 448.03 ± 53.55 | 224.83 ± 26.07 | 307.76 ± 25.17 | | ✓ |
| | Sand blasting | 175.63 ± 20.67 | 173.25 ± 9.83 | 241.24 ± 7.53 | | ✓ |
| | Acid etching | 369.78 ± 22.80 | 92.87 ± 9.26 | 133.73 ± 18.50 | | ✓ |

ตารางที่ 4.75 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางที่
ใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนโมล NR-g-HEMA : 90/10 ปริมาณ
33 phr กับโลหะ (รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์)

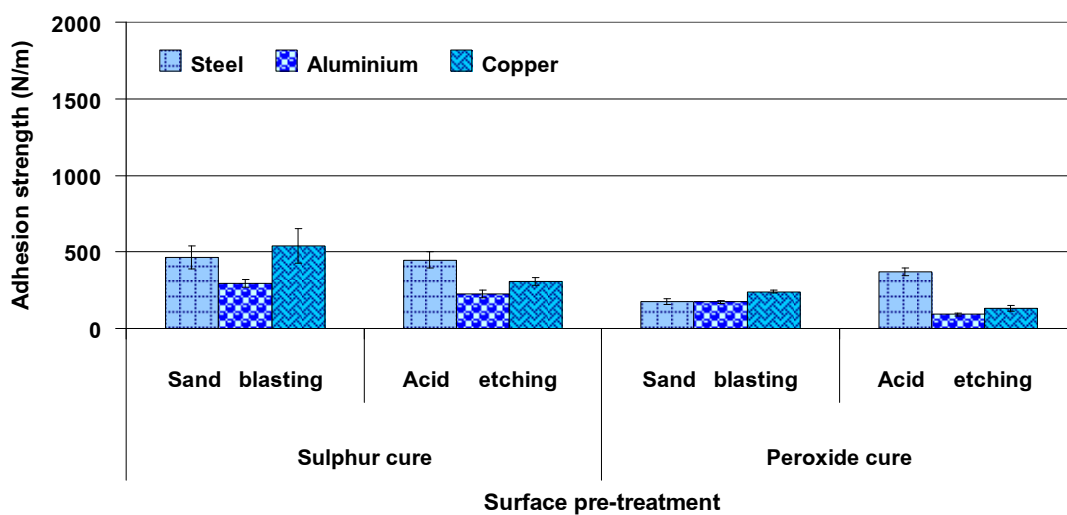
| Vulcanization system | Surface pre-treatment | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | Sand blasting | 420.17 ± 10.82 | 347.31 ± 49.41 | 340.77 ± 10.29 | | ✓ |
| | Acid etching | 551.89 ± 53.30 | 243.81 ± 12.90 | 194.72 ± 16.75 | | ✓ |
| | Sand blasting | 226.63 ± 13.64 | 113.75 ± 17.76 | 212.35 ± 45.02 | | ✓ |
| | Acid etching | 356.94 ± 37.29 | 80.83 ± 7.36 | 93.98 ± 14.92 | | ✓ |

ตารางที่ 4.76 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางที่
ใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนโมล NR-g-HEMA : 90/10 ปริมาณ
33 phr กับโลหะ (รองพื้นด้วยสารรองพื้นทางการค้า)

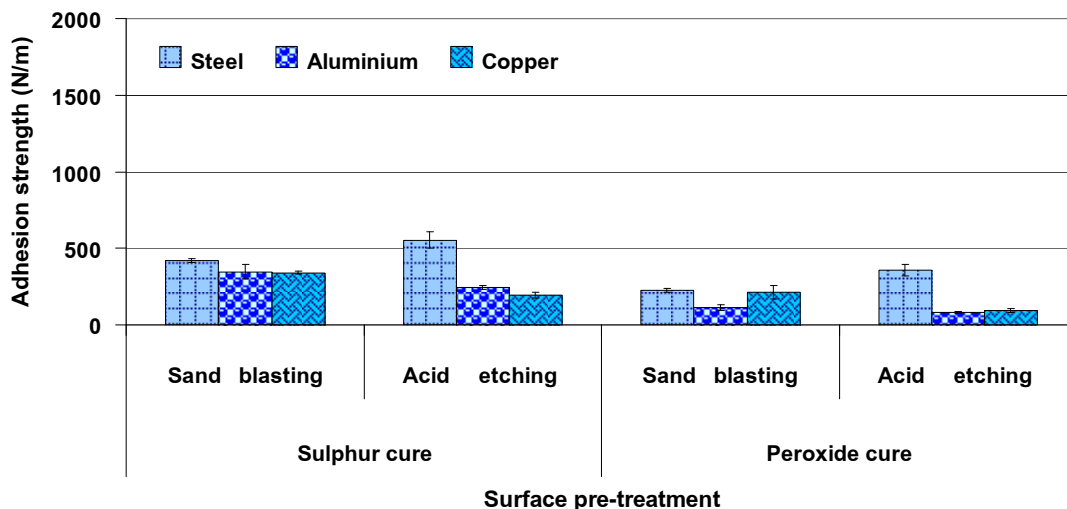
| Vulcanization system | Surface pre- treatment | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|-------------------------|------------------------------|-------------------------|-----------|---------|------------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | Sand | 348.46 | 372.82 | 532.39 | ✓ | |
| | blasting | ± 47.87 | ± 54.29 | ± 55.25 | | |
| | Acid | 308.29 | 331.09 | 436.00 | ✓ | |
| | etching | ± 7.66 | ± 23.43 | ± 40.24 | | |
| Peroxide cure | Sand | 485.04 | 613.23 | 486.10 | ✓ | |
| | blasting | ± 22.96 | ± 47.19 | ± 10.89 | | |
| | Acid | 482.44 | 498.87 | 503.40 | ✓ | |
| | etching | ± 35.67 | ± 35.96 | ± 11.66 | | |



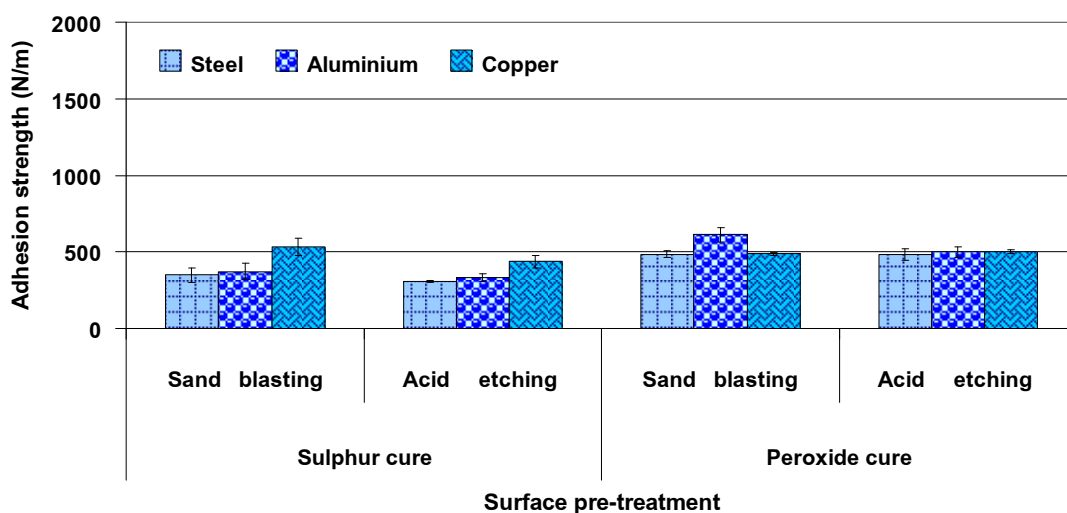
(a) Without primer



(b) With primer compound solution



(c) With primer NR-g-HEMA solution



(d) With primer chemlok205A

รูปที่ 4.34 วิธีการเตรียมผิวโลหะ ต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนโมล NR-g-HEMA : 90/10 ปริมาณ 33 phr กับโลหะชนิดต่างๆ

ผลการทดสอบความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนโมล NR-g-HEMA : 90/10 ปริมาณ 33 phr กับโลหะที่มีการเตรียมผิวด้วยวิธีการพ่นทราย และการกัดผิวด้วยกรด โดยมีการรองพื้นโลหะด้วยสารรองพื้นชนิดต่างๆ ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.73–4.76 และรูปที่ 4.34 จากผลการทดสอบพบว่าความล้มเหลวในการติดประสานเป็นแบบแอตชีซีฟ ทุกชนิดของโลหะ ทุกวิธีการเตรียมผิว และทุก

ชนิดของสารรองพื้น สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่ปราศจากสารรองพื้น ดังแสดงในรูปที่ 4.34 (a) พบว่าการเตรียมผิวโลหะด้วยวิธีการพ่นทราย มีผลทำให้ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะทั้ง 3 ชนิด มีแนวโน้มในการยึดติดที่แข็งแรงกว่าการเตรียมผิวด้วยวิธีการกัดผิวด้วยกรด ทั้งในระบบการวัลคาไนซ์แบบก้ำมะถันและเปอร์ออกไซด์ โดยในระบบวัลคาไนซ์ด้วยแบบก้ำมะถัน พบว่าโลหะทองแดง (พ่นทราย) มีแนวโน้มในการติดประสานสูงสุด ในขณะที่การติดประสานของยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ กลับพบว่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่เตรียมผิวด้วยวิธีการพ่นทราย มีความแข็งแรงในการติดประสานที่ใกล้เคียงกัน อีกทั้งยังมีค่าสูงกว่าการเตรียมผิวด้วยการกัดกรดอย่างเห็นได้ชัด เมื่อใช้โลหะอะลูมิเนียมและทองแดง

สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางคอมเพาเนนด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.34 (b) พบว่าการเตรียมผิวโลหะด้วยวิธีการพ่นทรายส่งผลให้ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างโลหะเหล็ก อะลูมิเนียม และทองแดง กับยางวัลคาไนซ์ด้วยระบบก้ำมะถัน รวมทั้งการติดประสานระหว่างโลหะอะลูมิเนียมและทองแดงกับยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ มีค่าความแข็งแรงในการติดประสานที่สูงกว่าการเตรียมผิวด้วยวิธีการกัดผิวด้วยกรด สำหรับในระบบการวัลคาไนซ์ยางด้วยระบบก้ำมะถัน พบว่าโลหะทองแดง มีความแข็งแรงในการติดประสานสูงสุด รองลงมาคือ โลหะเหล็กและอะลูมิเนียมตามลำดับ ในขณะที่ความแข็งแรงของการติดประสานกับยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ กลับพบว่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะเหล็กมีค่าสูงสุดอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเตรียมผิวโดยการกัดผิวด้วยกรด

สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.34 (c) พบว่าการเตรียมผิวโลหะเหล็กด้วยวิธีการกัดผิวด้วยกรด มีผลในการเพิ่มความแข็งแรงของการติดประสานกับยางทั้งในระบบการวัลคาไนซ์แบบก้ำมะถัน และเปอร์ออกไซด์ ในขณะที่การเตรียมผิวโดยการพ่นทราย มีผลทำให้ความแข็งแรงในการติดประสานของโลหะอะลูมิเนียมและทองแดง มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ทั้ง 2 ระบบของการวัลคาไนซ์ สำหรับในระบบการวัลคาไนซ์แบบก้ำมะถัน พบว่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะเหล็ก (กัดผิวด้วยกรด) มีค่าความแข็งแรงในการติดประสานสูงสุดในขณะที่ความแข็งแรงในการติดประสานของยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะเหล็ก (กัดผิวด้วยกรด) มีค่าสูงสุดเช่นเดียวกัน

สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นทางการค้า ดังแสดงในรูปที่ 4.34 (d) พบว่าความแข็งแรงในการติดประสานของโลหะทั้ง 3 ชนิด ที่เตรียมผิวด้วยการพ่นทราย มีแนวโน้มในการติดประสานที่สูงกว่าการเตรียมผิวโดยการกัดผิวด้วยกรด ทั้งในระบบการวัลคาไนซ์แบบก้ำมะถันและเปอร์ออกไซด์ สำหรับในระบบ

การวัลคาไนซ์ยางด้วยระบบก้ำมะถัน โลหะทองแดงมีค่าความแข็งแรงในการติดประสานสูงสุด ทั้งการเตรียมผิวด้วยการพ่นทรายและการกัดผิวด้วยกรด ในขณะที่ความแข็งแรงในการติดประสานของยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะอะลูมิเนียม (พ่นทราย) มีค่าสูงสุดอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้ยังพบว่าการรองพื้นโลหะด้วย Chemlok 205A มีผลในการเพิ่มความแข็งแรงของการยึดติดในทุกชนิดของโลหะอย่างชัดเจนเมื่อใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์

4.4.2.4 ผลของชนิดสารรองพื้นต่อความสามารถในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ

ศึกษาผลของชนิดสารรองพื้น ในที่นี้ได้ทำการศึกษาชนิดของสารรองพื้น 3 ชนิด ได้แก่ สารรองพื้นที่เตรียมขึ้นจากยางคอมพอนด์ (Primer compound solution) สารรองพื้นที่เตรียมขึ้นจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ (Primer NR-g-HEMA solution) และสารรองพื้นทางการค้า (Primer chemlok 205A) สำหรับโดยนำโลหะที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีทางกล (พ่นทราย) และทางเคมี (กัดผิวด้วยกรด) ตามหัวข้อ 3.3.1.4 มาจุ่มในสารรองพื้นแต่ละชนิด ก่อนนำไปยึดติดกับยางคอมพอนด์ที่เตรียมขึ้นจากสูตรดังแสดงในตารางที่ 3.4 และ 3.5 เพื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงในการติดประสานกับโลหะที่ปราศจากสารรองพื้น ซึ่งขั้นตอนในการเตรียมขึ้นทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.2 แล้วทำการวัลคาไนซ์ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเบ้าที่อุณหภูมิ 150°C (วัลคาไนซ์ด้วยระบบก้ำมะถัน) และอุณหภูมิ 160°C (วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์) จากนั้นทดสอบความสามารถในการติดประสานแบบปอก ด้วยมุม 90 องศา ตามหัวข้อ 3.3.4.2 ซึ่งผลของชนิดสารรองพื้นที่ยึดติดกับโลหะที่เตรียมผิวด้วยวิธีทางกล (พ่นทราย) แสดงดังตารางที่ 4.77–4.79 และรูปที่ 4.35 และเตรียมผิวด้วยวิธีทางเคมี (กัดผิวด้วยกรด) แสดงดังตารางที่ 4.80–4.82 และรูปที่ 4.36 ตามลำดับดังนี้

1) การติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่เตรียมผิวด้วยวิธีทางกล (พ่นทราย) และรองพื้นด้วยสารรองพื้นชนิดต่างๆ

ตารางที่ 4.77 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางคอมเพาเนนด์ปราศจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์กับโลหะ (พ่นทราย)

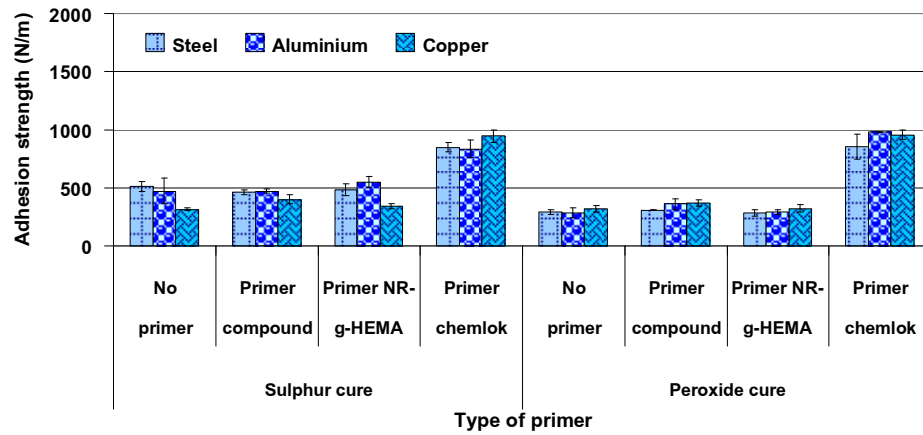
| Vulcanization system | Type of primer | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|------------------|-------------------------|--------------------|-------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | Without primer | 512.53 ± 40.47 | 472.72 ± 109.43 | 314.65 ± 9.22 | | ✓ |
| | Primer compound | 461.80 ± 22.66 | 471.94 ± 19.63 | 399.85 ± 38.92 | | ✓ |
| | Primer NR-g-HEMA | 482.56 ± 50.24 | 550.28 ± 46.23 | 340.12 ± 22.16 | | ✓ |
| | Primer chemlok | 848.28 ± 38.57 | 836.11 ± 76.67 | 944.64 ± 54.47 | | ✓ |
| | Without primer | 289.25 ± 21.96 | 284.00 ± 45.41 | 319.08 ± 26.93 | | ✓ |
| | Primer compound | 309.55 ± 6.16 | 359.64 ± 43.74 | 368.32 ± 29.31 | | ✓ |
| Peroxide cure | Primer NR-g-HEMA | 284.12 ± 25.64 | 290.12 ± 20.87 | 322.20 ± 32.04 | | ✓ |
| | Primer chemlok | 852.34 ± 107.46 | 979.41 ± 4.81 | 955.55 ± 39.46 | | ✓ |

ตารางที่ 4.78 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสาน
ระหว่างยางใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนโมล NR-g-HEMA : 90/10
ปริมาณ 10 phr กับโลหะ (พ่นทราย)

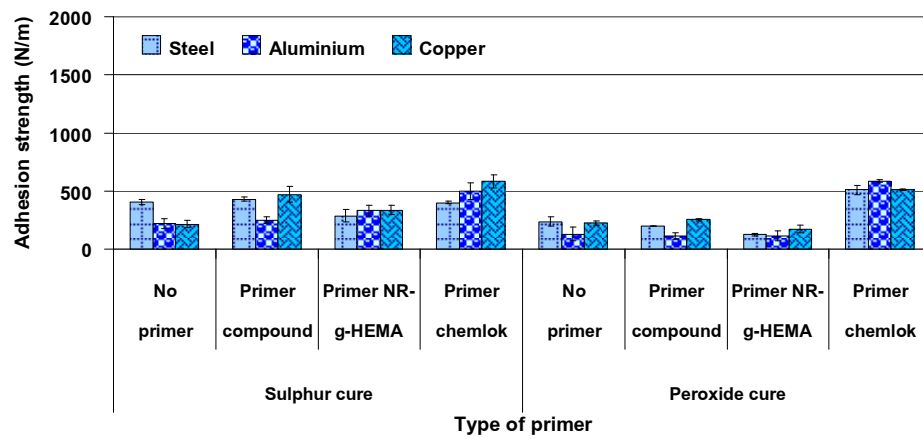
| Vulcanization system | Type of primer | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | Without primer | 406.77 ± 23.20 | 217.33 ± 42.73 | 215.70 ± 33.44 | | ✓ |
| | Primer compound | 430.09 ± 19.80 | 247.84 ± 27.66 | 471.43 ± 69.04 | | ✓ |
| | Primer NR-g-HEMA | 285.50 ± 53.99 | 331.06 ± 48.55 | 336.75 ± 41.34 | | ✓ |
| | Primer chemlok | 401.13 ± 12.36 | 500.01 ± 72.10 | 582.13 ± 56.69 | | ✓ |
| | Without primer | 237.51 ± 36.93 | 128.69 ± 60.11 | 226.80 ± 17.24 | | ✓ |
| | Primer compound | 198.95 ± 2.76 | 116.54 ± 28.42 | 253.92 ± 11.37 | | ✓ |
| Peroxide cure | Primer NR-g-HEMA | 127.03 ± 10.03 | 114.22 ± 41.62 | 174.34 ± 32.89 | | ✓ |
| | Primer chemlok | 509.98 ± 39.93 | 586.99 ± 9.32 | 511.56 ± 8.02 | | ✓ |

ตารางที่ 4.79 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนโมล NR-g-HEMA : 90/10 ปริมาณ 33 phr กับโลหะ (พ่นทราย)

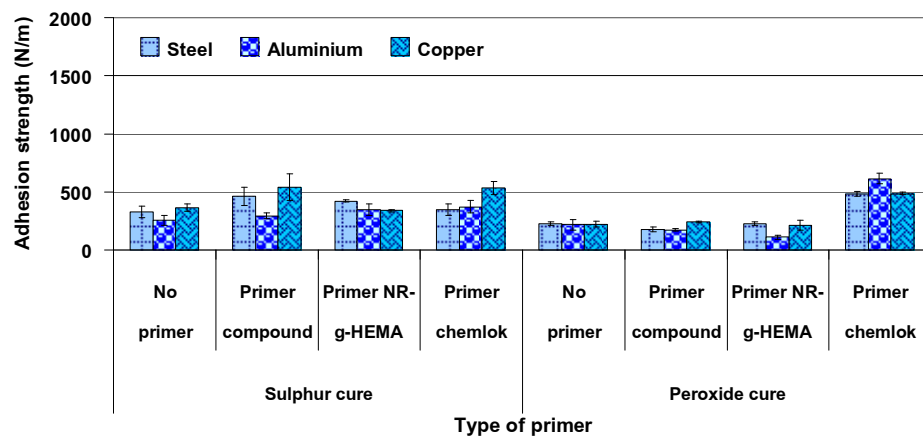
| Vulcanization system | Type of primer | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|------------------|-------------------------|-------------------|--------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | Without primer | 327.31 ± 49.57 | 255.51 ± 44.18 | 365.00 ± 32.54 | | ✓ |
| | Primer compound | 463.49 ± 76.54 | 294.09 ± 22.79 | 539.24 ± 112.54 | | ✓ |
| | Primer NR-g-HEMA | 420.17 ± 10.82 | 347.31 ± 49.41 | 340.77 ± 10.29 | | ✓ |
| | Primer chemlok | 348.46 ± 47.87 | 372.82 ± 54.29 | 532.39 ± 55.25 | | ✓ |
| | Without primer | 229.25 ± 15.82 | 217.28 ± 43.88 | 223.17 ± 27.34 | | ✓ |
| | Primer compound | 175.63 ± 20.67 | 173.25 ± 9.83 | 241.24 ± 7.53 | | ✓ |
| Peroxide cure | Primer NR-g-HEMA | 226.63 ± 13.64 | 113.75 ± 17.76 | 212.35 ± 45.02 | | ✓ |
| | Primer chemlok | 485.04 ± 22.96 | 613.23 ± 47.19 | 486.10 ± 10.89 | | ✓ |



(a) Without adhesion promoter



(b) NR-g-HEMA : 10 phr



(c) NR-g-HEMA : 33 phr

รูปที่ 4.35 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ (พันทราย)

ผลการทดสอบความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างโลหะที่เตรียมผิวด้วยวิธีทางกล (ฟันทราย) และมีการรองพื้นด้วยสารรองพื้นชนิดต่างๆ กับยางทั้งที่ใส่และไม่ใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ แสดงดังตารางที่ 4.77–4.79 และรูปที่ 4.35 พบว่าความล้มเหลวของการติดประสานระหว่างยางกับโลหะมีลักษณะเป็นแบบแอดฮีซีฟทุกชนิดของสารรองพื้น ทุกชนิดของโลหะ และทุกปริมาณของยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ เมื่อพิจารณาความแข็งแรงของการติดประสานระหว่างคอมเปานด์ยางปราศจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์กับโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 4.35 (a) พบว่าสารรองพื้นทางการค้ามีผลในการเพิ่มความแข็งแรงของการติดประสานระหว่างยางที่ปราศจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์กับโลหะทั้ง 3 ชนิด อย่างชัดเจน ทั้งในระบบการวัลคาไนซ์แบบกัมมะถัน และเปอร์ออกไซด์ โดยโลหะที่มีความแข็งแรงในการติดประสานกับยางวัลคาไนซ์ด้วยระบบกัมมะถันสูงสุด ได้แก่ โลหะทองแดง รองลงมาคือ โลหะเหล็กและอะลูมิเนียม ที่มีความแข็งแรงในการติดประสานใกล้เคียงกัน ในขณะที่การติดประสานของยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ มีค่าความแข็งแรงในการติดประสานกับโลหะเหล็ก อะลูมิเนียม และทองแดงที่ใกล้เคียงกัน

สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางที่ใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ปริมาณ 10 phr กับโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 4.35 (b) พบว่าสารรองพื้นทางการค้ามีผลในการเพิ่มความแข็งแรงของการติดประสานระหว่างยางกับโลหะทุกชนิด ทั้งในระบบการวัลคาไนซ์แบบกัมมะถันและเปอร์ออกไซด์ โดยที่โลหะทองแดงมีค่าการติดประสานสูงสุดเมื่อยึดติดกับยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกัมมะถัน ในขณะที่โลหะอะลูมิเนียมมีค่าการติดประสานสูงสุด เมื่อนำมายึดติดกับยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์

ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางที่ใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ปริมาณ 33 phr กับโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 4.35 (c) ในระบบการวัลคาไนซ์แบบกัมมะถัน พบว่าการรองพื้นโลหะด้วยสารรองพื้นที่เตรียมขึ้นจากยางคอมเปานด์ มีแนวโน้มในการทำให้โลหะเหล็ก และทองแดงสามารถเกิดการยึดติดกับยางได้สูงกว่าการใช้สารรองพื้นชนิดอื่นๆ โดยเฉพาะการติดประสานของโลหะทองแดงที่มีค่าการติดประสานสูงสุด สำหรับในระบบการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าสารรองพื้นทางการค้า (Chemlok 205A) มีผลในการเพิ่มความแข็งแรงของการยึดติด ระหว่างยางกับโลหะทุกชนิดอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งโลหะที่มีความแข็งแรงในการติดประสานสูงสุด ได้แก่โลหะอะลูมิเนียม เช่นเดียวกับการติดประสานของยางที่ปราศจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ และยางที่ใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ปริมาณ 10 phr ข้างต้น

2) การติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่เตรียมผิวด้วยวิธีทางเคมี (กัดผิวด้วยกรด) และรองพื้นด้วยสารรองพื้นชนิดต่างๆ

ตารางที่ 4.80 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางคอมเพาเนนด์ปราศจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์กับโลหะ (กัดผิวด้วยกรด)

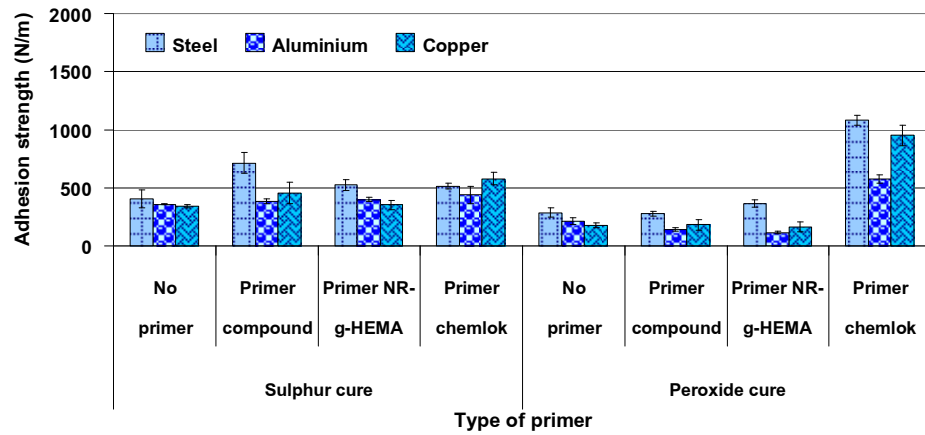
| Vulcanization system | Type of primer | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | Without primer | 408.90 ± 78.18 | 357.96 ± 3.28 | 343.03 ± 15.80 | | ✓ |
| | Primer compound | 714.49 ± 90.91 | 385.53 ± 22.21 | 455.39 ± 92.59 | | ✓ |
| | Primer NR-g-HEMA | 524.23 ± 48.20 | 401.46 ± 20.48 | 352.56 ± 36.84 | | ✓ |
| | Primer chemlok | 515.07 ± 23.13 | 437.99 ± 76.82 | 578.98 ± 53.26 | | ✓ |
| | Without primer | 288.19 ± 38.76 | 214.74 ± 27.91 | 175.49 ± 21.82 | | ✓ |
| | Primer compound | 277.09 ± 23.06 | 141.71 ± 11.47 | 182.15 ± 44.64 | | ✓ |
| Peroxide cure | Primer NR-g-HEMA | 364.58 ± 33.12 | 115.37 ± 11.56 | 164.32 ± 42.38 | | ✓ |
| | Primer chemlok | 1082.09 ± 39.80 | 576.36 ± 38.40 | 952.27 ± 89.21 | | ✓ |

ตารางที่ 4.81 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนโมล NR-g-HEMA : 90/10 ปริมาณ 10 phr กับโลหะ (กัดผิวด้วยกรด)

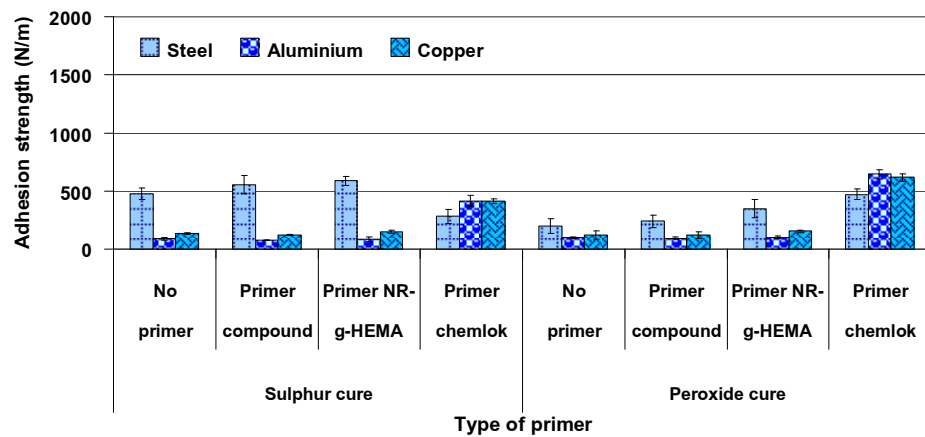
| Vulcanization system | Type of primer | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | Without primer | 475.79 ± 49.39 | 90.76 ± 9.57 | 136.03 ± 9.73 | | ✓ |
| | Primer compound | 554.71 ± 80.12 | 78.83 ± 2.55 | 123.37 ± 3.86 | | ✓ |
| | Primer NR-g-HEMA | 588.28 ± 40.91 | 87.68 ± 21.98 | 147.05 ± 14.43 | | ✓ |
| | Primer chemlok | 284.07 ± 60.66 | 416.23 ± 49.03 | 413.48 ± 18.60 | | ✓ |
| | Without primer | 200.01 ± 63.51 | 96.75 ± 6.56 | 120.50 ± 33.67 | | ✓ |
| | Primer compound | 240.26 ± 52.32 | 95.55 ± 8.44 | 121.78 ± 29.37 | | ✓ |
| Peroxide cure | Primer NR-g-HEMA | 349.42 ± 79.51 | 101.13 ± 11.16 | 153.79 ± 12.86 | | ✓ |
| | Primer chemlok | 472.56 ± 45.88 | 645.66 ± 40.53 | 616.50 ± 32.89 | | ✓ |

ตารางที่ 4.82 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนโมล NR-g-HEMA : 90/10 ปริมาณ 33 phr กับโลหะ (กัดผิวด้วยกรด)

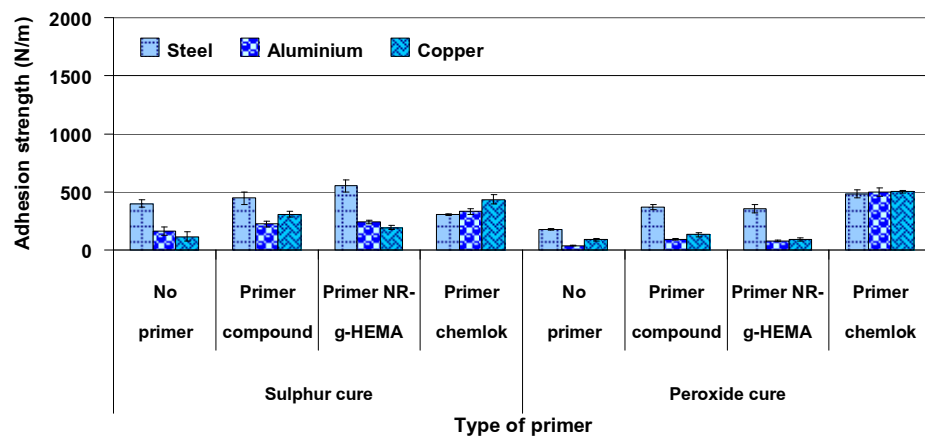
| Vulcanization system | Type of primer | Adhesion strength (N/m) | | | Type of break | |
|----------------------|------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|---------------|---|
| | | Steel | Aluminium | Copper | R* | M |
| Sulphur cure | Without primer | 401.99 ± 30.80 | 164.26 ± 37.76 | 116.80 ± 41.68 | | ✓ |
| | Primer compound | 448.03 ± 53.55 | 224.83 ± 26.07 | 307.76 ± 25.17 | | ✓ |
| | Primer NR-g-HEMA | 551.89 ± 53.30 | 243.81 ± 12.90 | 194.72 ± 16.75 | | ✓ |
| | Primer chemlok | 308.29 ± 7.66 | 331.09 ± 23.43 | 436.00 ± 40.24 | | ✓ |
| | Without primer | 176.56 ± 5.73 | 38.38 ± 3.66 | 89.84 ± 8.68 | | ✓ |
| | Primer compound | 369.78 ± 22.80 | 92.87 ± 9.26 | 133.73 ± 18.50 | | ✓ |
| Peroxide cure | Primer NR-g-HEMA | 356.94 ± 37.29 | 80.83 ± 7.36 | 93.98 ± 14.92 | | ✓ |
| | Primer chemlok | 482.44 ± 35.67 | 498.87 ± 35.96 | 503.40 ± 11.66 | | ✓ |



(a) Without adhesion promoter



(b) NR-g-HEMA : 10 phr



(c) NR-g-HEMA : 33 phr

รูปที่ 4.36 ชนิดของสารรองพื้น ที่ใช้กับโลหะชนิดต่างๆ ต่อความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะ (กััดผิวด้วยกรด)

ผลการทดสอบความแข็งแรงในการติดประสาน ระหว่างโลหะที่เตรียมผิวด้วยวิธีทางเคมี (กัดผิวด้วยกรด) และมีการรองพื้นโลหะด้วยสารรองพื้นชนิดต่างๆ กับยางคอมเพาเนตทั้งที่ใส่ และไม่ใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ ดังแสดงในตารางที่ 4.80–4.82 และรูปที่ 4.36 พบว่าความล้มเหลวของการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ มีลักษณะเป็นแบบแอดฮีซีฟทุกชนิดของสารรองพื้น ทุกชนิดของโลหะ และทุกปริมาณของยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ เมื่อพิจารณาความแข็งแรงของการติดประสานระหว่างคอมเพาเนตยางปราศจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์กับโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 4.36 (a) พบว่าสารรองพื้นที่เตรียมขึ้นจากยางคอมเพาเนตมีผลในการเพิ่มความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบก้ำมะถันกับโลหะเหล็ก อีกทั้งยังมีค่าในการยึดติดสูงสุดอีกด้วย เมื่อเปรียบเทียบกับ การติดประสานของโลหะชนิดอื่นๆ ทั้งที่ใช้และไม่ใช้สารรองพื้น สำหรับในระบบการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าสารรองพื้นทางการค้ามีผลในการเพิ่มความแข็งแรงในการยึดติดกับโลหะทุกชนิด โดยเฉพาะการติดประสานกับโลหะเหล็ก และทองแดงที่มีค่าสูงสุดอย่างเห็นได้ชัด

สำหรับความแข็งแรงในการติดประสานของยางที่ใส่ยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ ปริมาณ 10 phr และ 33 phr ดังแสดงในรูปที่ 4.36 (b) และ (c) พบว่าความแข็งแรงในการติดประสานของยางทั้ง 2 ปริมาณ มีแนวโน้มในการติดประสานที่เหมือนกัน กล่าวคือ ในระบบการวัลคาไนซ์แบบก้ำมะถัน สารรองพื้นที่เตรียมขึ้นจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ มีผลในการทำให้ความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างยางกับโลหะเหล็กมีค่าการติดประสานสูงสุด ในขณะที่สารรองพื้น Chemlok 205A มีผลในการเพิ่มความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างโลหะเหล็ก อะลูมิเนียม และทองแดง กับยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์อย่างชัดเจน

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ลักษณะของพื้นผิวโลหะก่อนและหลังการเตรียมผิวด้วยวิธีทางกล และทางเคมี เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Optical microscope) ที่กำลังขยาย 100 เท่า พบว่าลักษณะพื้นผิวของโลหะเหล็ก อะลูมิเนียม และทองแดงที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีทางกล ทั้งการขัดด้วยกระดาษทราย และการพ่นทราย มีความขรุขระมากกว่าโลหะที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีทางเคมี (การกัดผิวด้วยกรด) และโลหะที่ไม่ได้ผ่านการเตรียมผิว ตามลำดับ โดยพื้นผิวของโลหะที่ผ่านการขัดด้วยกระดาษทราย มีรอยขรุขระแบบเส้นเป็นร่องยาวขนานกับความยาวของแผ่นโลหะ สำหรับโลหะที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีการพ่นทราย พบว่าความขรุขระมีลักษณะเป็นหลุมเล็กๆ เกิดขึ้นทั่วบริเวณผิวหน้าของโลหะ ในส่วนของพื้นผิวโลหะที่ผ่านการกัดด้วยกรด มีความขรุขระสม่ำเสมอ เป็นหลุมละเอียดและมีขนาดเล็กกว่าการเตรียมผิวด้วยวิธีการพ่นทราย

5.1.2 การศึกษาสเปกตรัมของยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ ที่อัตราส่วนโมลของยางธรรมชาติต่อ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (NR/HEMA) เท่ากับ 95/5, 90/10 และ 85/15 (SLS ปริมาณ 1 กรัม) ด้วยเทคนิค FT-IR เพื่อเปรียบเทียบกับ IR สเปกตรัมของยางธรรมชาติ พบว่าสเปกตรัมของยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ได้ปรากฏยอดแหลม (peak) เพิ่มขึ้นที่ตำแหน่ง 1724 cm^{-1} , 1718 cm^{-1} และ 1716 cm^{-1} ตามลำดับ ซึ่งได้แสดงถึงการมีหมู่ฟังก์ชัน C=O ในโมเลกุลของยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ และเป็นการยืนยันได้ว่าโมเลกุลของ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตได้กราฟต์อยู่บนโมเลกุลของยางธรรมชาติ

5.1.3 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางใส่สารเสริมการยึดติด

5.1.3.1 ยางใส่สารเสริมการยึดติดทางการค้า

การใส่สารเสริมการยึดติดทางการค้า มีผลทำให้เวลาของการวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบกัมมะถัน สำหรับการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์ พบว่าการใส่สารเสริมการยึดติดซิงค์ไดอะคริเลต (ZDA) และซิงค์ไดเมทาคริเลต (ZDMA) ไม่มีผลต่อเวลาในการวัลคาไนซ์ยาง ส่วนการใส่สารเสริมการยึดติดโคบอลต์สเตียเรต พบว่ามีผลทำให้เวลาของการวัลคาไนซ์ลดลง

5.1.3.2 ยางใส่สารเสริมการยึดติดที่สังเคราะห์จากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (NR-g-HEMA)

การเพิ่มปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ ไม่มีผลต่อเวลาในการวัลคาไนซ์ยาง ทั้งในระบบการวัลคาไนซ์แบบก้ำมะถัน และเปอร์ออกไซด์ นอกจากนี้ยังพบว่าการวัลคาไนซ์ด้วยระบบก้ำมะถันใช้เวลาในการวัลคาไนซ์เร็วกว่าระบบเปอร์ออกไซด์อย่างชัดเจน

5.1.4 สมบัติเชิงกลของยางก่อนนำไปยึดติดกับโลหะ

5.1.4.1 สมบัติเชิงกลของยางใส่สารเสริมการยึดติดทางการค้า

ในระบบการวัลคาไนซ์แบบก้ำมะถัน พบว่ายางใส่สารเสริมการยึดติดซิงค์ไดเมทาคริเลต มีค่าโมดูลัสที่ 100% ใกล้เคียงกับยางที่ปราศจากสารเสริมการยึดติด อีกทั้งยังมีค่าสูงกว่ายางที่ใส่สารเสริมการยึดติดโคบอลต์สเตียเรต และซิงค์ไดอะคริเลต ตามลำดับ สำหรับความทนต่อแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มีค่าสูงสุดเมื่อใส่สารเสริมการยึดติดโคบอลต์สเตียเรต รองลงมาคือ สารเสริมการยึดติดซิงค์ไดอะคริเลต ซิงค์ไดเมทาคริเลตและยางที่ปราศจากสารเสริมการยึดติด ตามลำดับ สำหรับในระบบการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์ พบว่ายางใส่สารเสริมการยึดติดซิงค์ไดอะคริเลตมีค่าโมดูลัสที่ 100% สูงกว่ายางใส่สารเสริมการยึดติดซิงค์ไดเมทาคริเลต ยางที่ปราศจากสารเสริมการยึดติด และยางใส่สารเสริมการยึดติดโคบอลต์สเตียเรต ตามลำดับ ในขณะที่ความทนต่อแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มีค่าสูงสุด เมื่อใช้ยางที่ใส่สารเสริมการยึดติดโคบอลต์สเตียเรต รองลงมาคือ ยางใส่สารเสริมการยึดติดซิงค์ไดเมทาคริเลต ยางที่ปราศจากสารเสริมการยึดติด และยางใส่ซิงค์ไดอะคริเลต ตามลำดับ

5.1.4.2 สมบัติเชิงกลของยางใส่สารเสริมการยึดติดที่ได้จากการสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต

เมื่อใส่ยางธรรมชาติดัดแปรโมเลกุลที่อัตราส่วนโมลของยางธรรมชาติต่อ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (NR/HEMA) เท่ากับ 90/10 ปริมาณ 10 phr และ 33 phr ที่อัตราส่วนโมลของยางธรรมชาติต่อ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต เท่ากับ 85/15 ปริมาณ 43 phr (แทนการใส่สารเสริมการยึดติด) พบว่าอัตราส่วนโมลของมอนอเมอร์ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต และปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ (NR-g-HEMA) ที่มากขึ้น มีผลทำให้โมดูลัสที่ 100% มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่ค่าความทนต่อแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง ตามปริมาณมอนอเมอร์และปริมาณยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้น ทั้งในระบบการวัลคาไนซ์แบบก้ำมะถันและเปอร์ออกไซด์ (ยกเว้น ในอัตราส่วนโมลของยางธรรมชาติต่อ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต เท่ากับ 90/10 ที่ปริมาณ 10 phr พบว่ามีค่าโมดูลัสที่ 100% ต่ำกว่ายางปราศจากยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ทั้งในระบบการวัลคาไนซ์แบบก้ำมะถันและเปอร์ออกไซด์)

5.1.5 การติดประสานระหว่างยางกับโลหะ โดยใช้สารเสริมการยึดติดทางการค้า

5.1.5.1 ความล้มเหลวของการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ มีลักษณะเป็นแบบ แอดฮีซีฟ (adhesive failure) ทุกชนิดของโลหะ ทุกวิธีของการเตรียมผิวโลหะ ทุกชนิดของสารรองพื้น และทุกชนิดของสารเสริมการยึดติด ทั้งในระบบการวัลคาไนซ์แบบก้ำมะถันและเปอร์ออกไซด์ ยกเว้นการติดประสานระหว่างยางใส่สารเสริมการยึดติดชนิดซิงค์ไดอะคริเลต (ZDA) ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์กับโลหะทองแดง ที่เกิดความล้มเหลวของการติดประสานแบบโคฮีซีฟ (cohesive failure) ทั้งที่ใช้และไม่ใช้สารรองพื้น

5.1.5.2 ความแข็งแรงในการติดประสานของโลหะที่เตรียมผิวโดยการขัดด้วยกระดาษทราย

ในระบบการวัลคาไนซ์แบบก้ำมะถัน สารเสริมการยึดติดโคบอลต์สเตียเรต ให้ความแข็งแรงในการติดประสานสูงสุดกับโลหะเหล็ก ทั้งที่ใช้และไม่ใช้สารรองพื้น ในขณะที่สารเสริมการยึดติดซิงค์ไดอะคริเลตให้ค่าความแข็งแรงในการติดประสานสูงสุด เมื่อยึดติดกับโลหะอะลูมิเนียมและทองแดงที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นทางการค้า

ในระบบการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์ สารเสริมการยึดติดซิงค์ไดอะคริเลต มีผลทำให้ความแข็งแรงในการติดประสานมีค่าสูงสุดกับทุกชนิดของโลหะที่ปราศจากสารรองพื้น และยังทำให้การติดประสานระหว่างยางกับโลหะทองแดง เกิดความล้มเหลวในการติดประสานแบบโคฮีซีฟ ทั้งที่ใช้และไม่ใช้สารรองพื้น

5.1.5.3 ความแข็งแรงในการติดประสานของโลหะที่เตรียมผิวโดยการพ่นทราย

ในระบบการวัลคาไนซ์แบบก้ำมะถัน สารเสริมการยึดติดโคบอลต์สเตียเรต ให้ความแข็งแรงในการติดประสานสูงสุดกับโลหะเหล็กและอะลูมิเนียม ทั้งที่ใช้และไม่ใช้สารรองพื้น นอกจากนี้สารเสริมการยึดติดซิงค์ไดอะคริเลตยังให้ค่าความแข็งแรงในการติดประสานสูงสุด เมื่อยึดติดกับโลหะทองแดงทั้งที่ใช้และไม่ใช้สารรองพื้น

ในระบบการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์ สารเสริมการยึดติดซิงค์ไดอะคริเลต มีผลทำให้ความแข็งแรงในการติดประสานมีค่าสูงสุดกับโลหะเหล็กที่ปราศจากสารรองพื้น และโลหะอะลูมิเนียมที่รองพื้นด้วยสารรองพื้นทางการค้า อีกทั้งยังทำให้การติดประสานระหว่างยางกับโลหะทองแดง เกิดความล้มเหลวในการติดประสานแบบโคฮีซีฟ ทั้งที่ใช้และไม่ใช้สารรองพื้น

5.1.5.4 ความแข็งแรงในการติดประสานของโลหะที่เตรียมผิวโดยการกัดด้วยกรด

ในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน สารเสริมการยึดติดซิงค์ไดอะคริเลต ให้ค่าความแข็งแรงในการติดประสานสูงสุดกับโลหะเหล็กที่ปราศจากสารรองพื้น สำหรับสารเสริมการยึดติดซิงค์ไดอะคริเลตให้ความแข็งแรงในการติดประสานสูงสุดกับโลหะอะลูมิเนียมที่รองพื้นโลหะด้วยสารรองพื้นทางการค้า และสำหรับสารเสริมการยึดติดโคบอลต์สเตียเรตให้ค่าความแข็งแรงในการยึดติดสูงสุดกับโลหะทองแดงที่รองพื้นโลหะด้วยสารรองพื้นทางการค้าเช่นเดียวกัน

ในระบบการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์ สารเสริมการยึดติดซิงค์ไดอะคริเลต ให้ความแข็งแรงในการยึดติดสูงสุดกับทุกโลหะที่ปราศจากสารรองพื้น อีกทั้งยังทำให้การติดประสานระหว่างยางกับโลหะทองแดง เกิดความล้มเหลวในการติดประสานแบบโคฮีซีฟ ทั้งที่ใช้และไม่ใช้สารรองพื้น

5.1.6 การติดประสานระหว่างยางกับโลหะ โดยใช้สารเสริมการยึดติดที่ได้จากการสังเคราะห์ กราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต

5.1.6.1 ความล้มเหลวของการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ มีลักษณะเป็นแบบ แอดฮีซีฟ (adhesive failure) ทุกชนิดของโลหะ ทุกวิธีการเตรียมผิวโลหะ ทุกชนิดของสารรองพื้น และทุกปริมาณของยางกราฟต์โคพอลิเมอร์ ทั้งในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถันและเปอร์ออกไซด์

5.1.6.2 ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ

การใช้สารรองพื้นทางการค้า (Chemlok 205A) ส่งผลให้ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์กับโลหะทุกชนิด มีแนวโน้มที่ให้ความแข็งแรงในการติดประสานสูงกว่ายางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถัน ทั้งการเตรียมผิวด้วยวิธีการพ่นทราย และการเตรียมผิวด้วยวิธีการกัดด้วยกรด นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้สารรองพื้นทางการค้า ส่งผลให้ความแข็งแรงของยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถัน มีค่าการยึดติดกับโลหะที่เตรียมผิวด้วยวิธีการพ่นทรายสูงกว่าการเตรียมผิวด้วยวิธีการกัดด้วยกรด ในทุกชนิดของโลหะ และทุกปริมาณของยางกราฟต์โคพอลิเมอร์

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรนำยางสังเคราะห์ที่มีความเป็นขั้วต่างกัน เช่น ยางเอสบีอาร์ (SBR), ยางอีพีดีเอ็ม (EPDM), ยางคลอโรพรีน (Chloroprene, CR) และยางเอ็นบีอาร์ (NBR) มาศึกษาความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ เพื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ

5.2.2 ควรเพิ่มชนิดของโลหะให้มีความหลากหลายมากขึ้น เช่น ทองเหลือง (brass), สังกะสี (zinc) และนิกเกิล (nickel) เป็นต้น

5.2.3 ควรศึกษาการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ ด้วยการระบบ 2 ชั้น ประกอบด้วยชั้นรองพื้น (primer) และชั้นทาทับ (cover) ซึ่งการระบบ 2 ชั้นในทางการค้าที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ ChemlokTM และ MegumTM เนื่องจากการติดประสานด้วยระบบนี้มีผลทำให้ความแข็งแรงในการติดประสานมีค่าเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าการใช้สารรองพื้นเพียงชั้นเดียว

5.2.4 การวิจัยในขั้นต่อไปควรพัฒนาสูตรยางและกาวติดโลหะ ที่มียางธรรมชาติเป็นองค์ประกอบหลัก เพื่อให้มีความแข็งแรงในการติดประสานเทียบเท่า หรือดีกว่ากาวทางการค้า

บรรณานุกรม

- กรรณิการ์ สหกะโร. 2546. การศึกษาทางธรรมชาติมาลีเอตเพื่อเป็นแนวทางในการใช้ทำยางติดโลหะ. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ : ปัตตานี
- เจริญ นาคะสรรค์, จิราภรณ์ เยี่ยมชลคำ และอาชีชัน แกสมาน. 2549. กาวติดยางกับโลหะจากกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับมาลิกแอนไฮไดรด์. ใน วิจัยยางพาราเพื่ออนาคตที่ยั่งยืน: กรุงเทพฯ หน้า 59–65.
- จรัญ พุ่มนก. 2547. การกราฟต์โคพอลิเมอร์ไซโซชันของอะครีโลไนไตรล์บนยางธรรมชาติ โดยกระบวนการอิมัลชัน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา.
- ชัชพล มีเพ็ชรทาน. 2544. การศึกษากระบวนการอิมัลชันโคพอลิเมอร์ไซโซชันของสไตรีนและยางธรรมชาติ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ชนาวดี ลีจากภัย. 2546. เกร็ดน่ารู้ของกาว. อัพเดท. 18, 192(กันยายน): 89–92
- บุญธรรม นิธิอุทัย และ ชลดา เลวิส. 2544. ยางติดโลหะและการเตรียมผิวโลหะ. วารสารยางและพอลิเมอร์. 5, 1(มกราคม–มีนาคม): 1–5.
- ปวีณา ฆารไสว. 2548. กราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต. วารสารวิจัย มข. 10, 2(เมษายน–มิถุนายน): 141–150.
- พงษ์ธร แซ่ฮุย. 2548. สารเคมียาง. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค): กทม.
- พรพรรณ นิธิอุทัย. 2528. สารเคมีสำหรับยาง. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. หน้า 14–31 : ปัตตานี

- พรพรรณ นิธิอุทัย. 2540. ยาง: เทคนิคการออกสูตร. ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ : ปัตตานี
- วราภรณ์ ขจรไชยกูล. 2549. ยางธรรมชาติ : การผลิตและการใช้งาน. พิมพ์ครั้งที่ 1. ห้างหุ้นส่วนจำกัด ซีโน ดีไซน์: กรุงเทพฯ
- สิทธิพงษ์ อำนวยพานิชย์. 2547. กราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีน. วารสารวิจัย มข. 9, 2(กรกฎาคม-ธันวาคม): 82-96.
- สิทธิพงษ์ อำนวยพานิชย์, ศราณี นารีจันทร์ และสมพิศ ยอดรัก. 2548. การสังเคราะห์อนุภาคเชิงประกอบของยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีน โดยวิธีอิมัลชันพอลิเมอไรเซชัน. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.).
- สิริธร แก้วกล้า. 2549. กาวผสมของน้ำยางธรรมชาติกับกาวพอลิยูรีเทนเพื่อใช้ติดยางวัลคาไนซ์กับหนังสังเคราะห์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา.
- หน่วยเทคโนโลยียาง. 2550. ชนิดของยางและการใช้งาน. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <http://rubber.sc.mahidol.ac.th/rubbertech/NR.htm>. (วันที่สืบค้น 9 เมษายน 2550)
- อรรพรรณ ทองเนื่องาม และนุชนารถ กังพิศดาร. 2550. ศักยภาพการผลิตยางของไทย. วารสารยางพารา. 28, 1(มกราคม-เมษายน): 42-52
- อิทธิพล แจ่มชัด. 2544. พอลิเมอร์คอมโพสิต. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง: กรุงเทพมหานคร
- Adhesives Design Toolkit. 2007. Adhesive bonding - a guide to best practice. <http://www.adhesivestoolkit.com/DocuData/SurfacePreTreatment.xtp>. (accessed 30/04/07)
- Ansarifar, M.A., Chong, L.K., Zhang, J., Bell, A. and Ellis, R.J. 2003. Effect of bifunctional organosilane on the joint strength of some natural rubber compounds to nylon 6,6. J. Adhesion & Adhesives. 23: 177-188.

- Ansarifar, M.A., Zhang, J., Baker, J., Bell, A. and Ellis, R.J. 2001. Bonding properties of rubber to steel, aluminium and nylon 6,6. *J. Adhesion & Adhesives*. 21: 369–380.
- Ansarifar, M.A., Zhang, J., Bell, A. and Ellis, R.J. 2002. Role of primer in rubber to nylon 6,6. *J. Adhesion & Adhesives*. 22: 245–255.
- Bimax Chemicals Ltd. 2006. 2-Hydroxyethyl methacrylate. <http://www.bimax.com/hema.htm>. (accessed 19/04/08)
- Cook, J.W., Edge, S. and Packham, D.E. 1997. The adhesion of natural rubber to steel and the use of the peel test to study its nature. *J. Adhesion & Adhesives*. 17: 333–337.
- Costin, R. and Nagel, W. 1990. Metallic coagents for rubber-to-metal adhesion. Sartomer Company, Inc. Pennsylvania, USA : 5530 05/05
- chemBlink. 2009. Cobalt stearate. <http://www.chemblink.com/products/13586-84-0.htm>. (accessed 13/01/09)
- Dobias, B. and Heckmann K. 1981. Method to directly bond rubber to metal. US Patent 4, 297, 159, October 27.
- Dunlap, D., Parekhji, J. and Your, A.J. 2002. Interfacial adhesion. Master of Chemical and Materials Engineering report, San Jose State university, California, USA.
- Garbassi, F., Morra, M. and Occhiello, E. 1994. *Polymer Surfaces from Physics to Technology*. John Wiley and Sons Ltd.,: England
- Hilton, J.M., Hawkins, I.M. and Wilson, J.C. 2002. Rubber adhesion promoters. US Patent 6, 353, 047, March 5.

- Ikeda, Y., Nawafune, H., Mizumoto, S., Sasaki, M., Nagatani, A., Nishimori, A., Yamaguchi, K., Uchida, E. and Okada, T. 2003. Physico–chemical analysis on chemical bonding at adhesion interface between rubber and Pd alloy. *J. Adhesion & Adhesives*. 23: 231–234.
- Imori, T. and Iida, K. 2004. Adhesion accelerator for bonding rubber to metal and rubber composition. US Patent 6, 809, 138 B2, October 26.
- Kent, H.D. 2005. Rubber to metal bonding method. US Patent 6, 843, 876 B1, January 18.
- Lu, Y., Liu, L., Tian, M., Geng, H. and Zhang, L. 2005. Study on mechanical properties of elastomers reinforced by zinc dimethacrylate. *European Polymer Journal* 41: 589–598.
- Mowdood, S.K. 1986. Rubber–metal adhesion promoters. US Patent 4, 605, 693, August 12.
- Mowrey, D.H. 2003. Adhesives for bonding peroxide–cured elastomers. US Patent 6, 512, 039 B1, January 28.
- Nakamura, H. 1976. Bonding of rubber to metal. US Patent 3, 998, 992, December 21.
- Ontario Die International Inc. 2009. Tensile Test. <http://www.superdumbbell.com/techinfo-tenstest.htm>. (accessed 23/02/09)
- Promdum, Y., Klinpituksa, P. and Ruamjarern, J. 2008. Grafting of natural rubber with 2–hydroxyethyl methacrylate for plywood adhesion improvement. *Proceeding of the 10th National Graduate Research Conference*. Sukhothai Thammathirat Open University, September 12–13, 2008. pp. 1–11

Quadrat, O., Horsky, J. and Snuparek, J. 2004. Effect of styrene units in lattices of acrylate copolymers with structured particles on the thickening with associative thickeners. *Prog. Org. Coat.* 50: 166–171

Sohnemann, R. 1985. Rubber mixture for direct bonding to metal surfaces. US Patent 4, 511, 697, April 16.

SpecialChem Adhesives & Sealants. 2007a. Adhesion theory–Chemisorption.

<http://www.specialchem4adhesives.com/resources/adhesionguide/index.aspx?id=theory3>. (accessed 15/02/07)

SpecialChem Adhesives & Sealants. 2007b. Adhesion theory–Mechanical Interlocking.

<http://www.specialchem4adhesives.com/resources/adhesionguide/index.aspx?id=theory4>. (accessed 15/02/07)

SpecialChem Adhesives & Sealants. 2007c. Adhesion theory–Diffusion.

<http://www.specialchem4adhesives.com/resources/adhesionguide/index.aspx?id=theory5>. (accessed 15/02/07)

SpecialChem Adhesives & Sealants. 2007d. Adhesion theory–Electrostatic.

<http://www.specialchem4adhesives.com/resources/adhesionguide/index.aspx?id=theory6>. (accessed 15/02/07)

Su, Y.-Y. and Shemanski, R.M. 2000. The role of oxide structure on copper wire to the rubber adhesion. *Applied Surface Science* 161: 355–364.

The Adhesive and Sealant Council, Inc. 2008. Types of Stress. <http://www.adhesives.org/StructuralDesign/TypesofStress.aspx>. (accessed 19/08/08)

Uchino, O., Nakane, S., Fujiki, K., Imori, T. and Iida, K. 1999. Adhesion promoter composition and adherent rubber composition containing the same. US Patent 5, 994, 434, November 30.

Vetteworks. 2008. Adhesives. <http://vetteworks.tripod.com/adhesive.htm>. (accessed 09/05/08)

Wikimedia Commons. 2007. Cobalt naphthenate. http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cobalt_naphthenate.png. (accessed 13/01/09)

Wake, W.C. 1982. Adhesion and the formulation of adhesives. 2nd Ed. Applied science: New York.

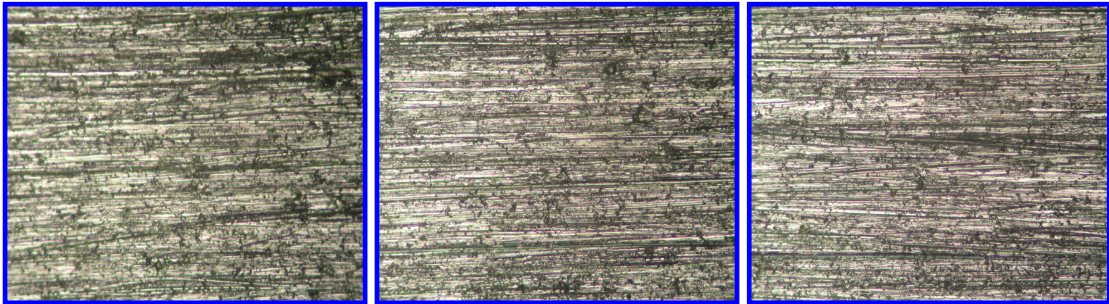
Yue-E, F., Jun, J. and Chaoxiong, M. 1999. Study of radiation–induced grafting of 2–hydroxyethyl methacrylate to chloroprene rubber membrane. Radiation Physics and Chemistry. 54: 159–163.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ก.1 ลักษณะพื้นผิวโลหะหลังผ่านการเตรียมผิวโดยการขัดด้วยกระดาษทราย
(Sandpaper blasting)

(1) โลหะเหล็ก

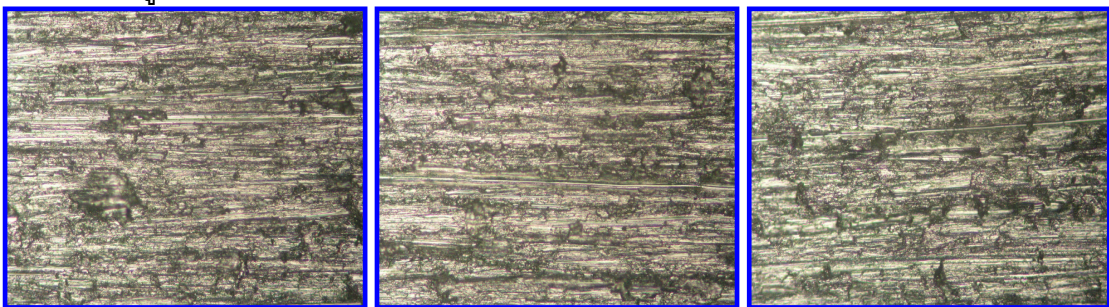


ชั้นที่ 1

ชั้นที่ 2

ชั้นที่ 3

(2) โลหะอะลูมิเนียม

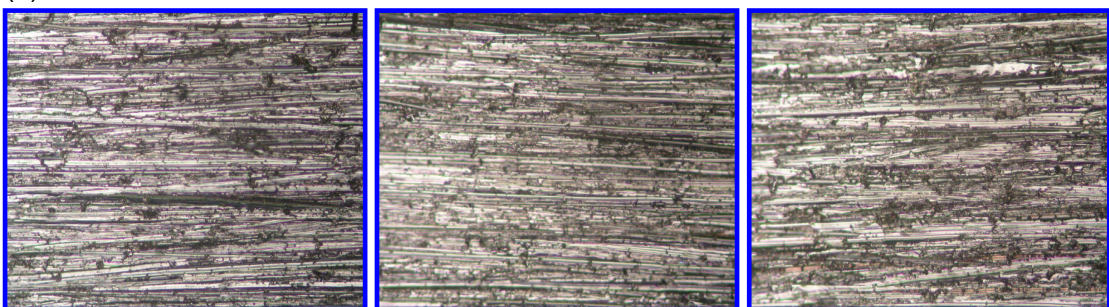


ชั้นที่ 1

ชั้นที่ 2

ชั้นที่ 3

(3) โลหะทองแดง



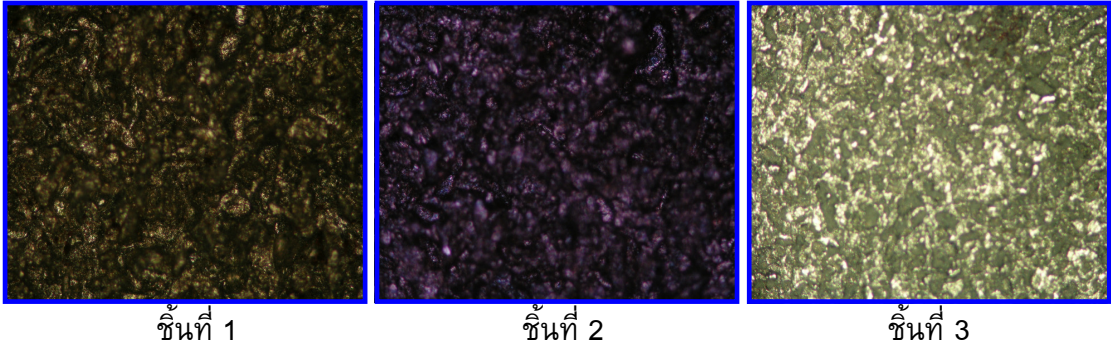
ชั้นที่ 1

ชั้นที่ 2

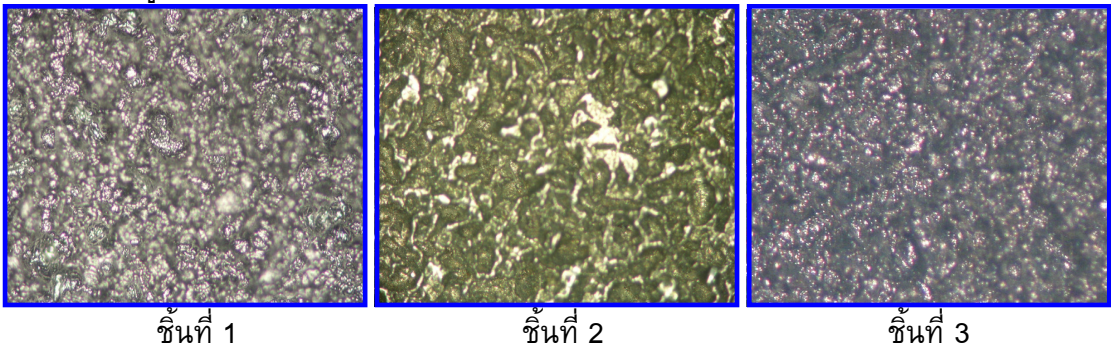
ชั้นที่ 3

ก.2 ลักษณะพื้นผิวโลหะหลังผ่านการเตรียมผิวโดยการพ่นทราย (Sand blasting)

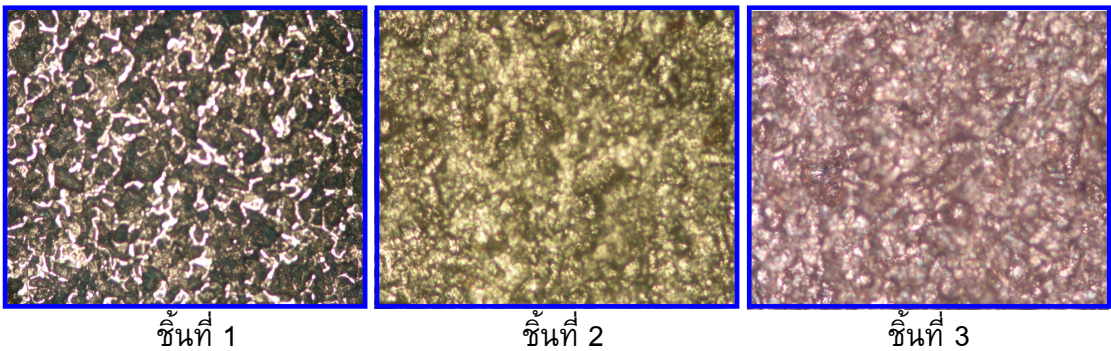
(1) โลหะเหล็ก



(2) โลหะอะลูมิเนียม

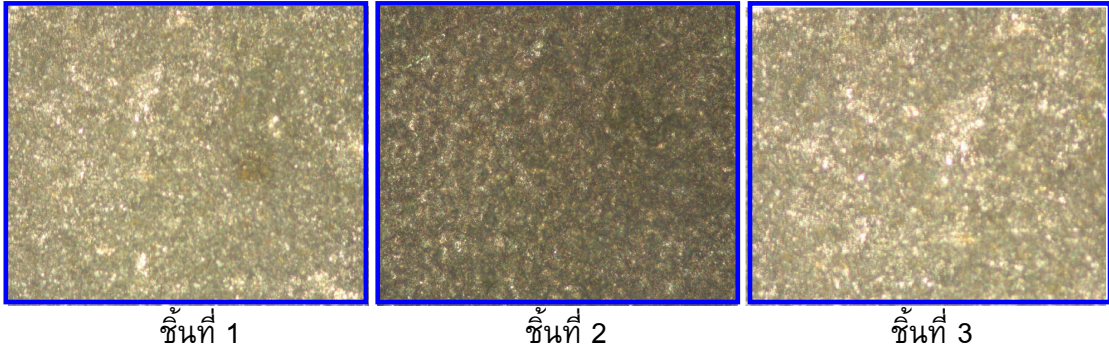


(3) โลหะทองแดง

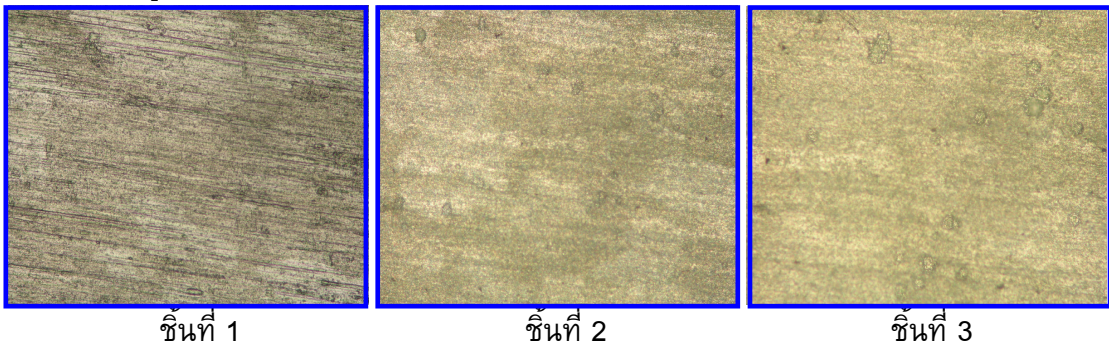


ก.3 ลักษณะพื้นผิวโลหะหลังผ่านการเตรียมผิวโดยการกัดด้วยกรด (Acid etching)

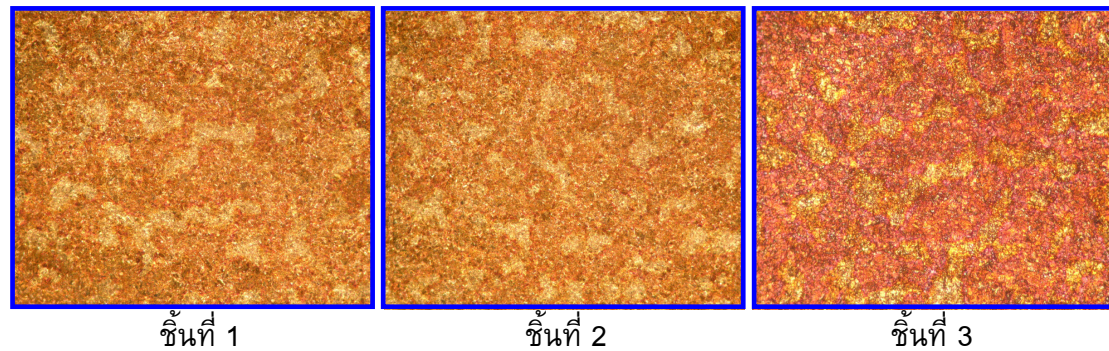
(1) โลหะเหล็ก



(2) โลหะอะลูมิเนียม



(3) โลหะทองแดง



ภาคผนวก ข

ข.1 ตัวอย่างวิธีการคำนวณปริมาณน้ำยางและสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์ในอัตราส่วนโมลของยางธรรมชาติต่อ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (NR/HEMA) เท่ากับ 95/5

กรณี ใช้น้ำยางธรรมชาติ (35 %DRC) ปริมาณ 100 กรัม

- (1) คำนวณน้ำยางธรรมชาติ 100 กรัม เท่ากับกี่โมล
 น้ำยางธรรมชาติ 100 กรัม มีเนื้อยางปริมาณ 35 กรัม
 เนื่องจากยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 68 กรัม/โมล
 ดังนั้น ยางธรรมชาติ 35 กรัม เท่ากับ 0.5147 โมล

- (2) คำนวณ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (HEMA) 5% เท่ากับกี่โมล
 จากอัตราส่วนโมลของ NR/HEMA เท่ากับ 95/5 ดังนั้นจึงเปรียบเทียบการใช้ยางธรรมชาติ เท่ากับ 95% และใช้ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต เท่ากับ 5%
 ยางธรรมชาติ 95% เท่ากับ 0.5147 โมล
 HEMA 5% เท่ากับ 0.0271 โมล

- (3) คำนวณ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (HEMA) 0.0271 โมล เท่ากับกี่กรัม
 เนื่องจาก 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต มีน้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 130.14 กรัม/โมล
 ดังนั้น 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต 0.0271 โมล เท่ากับ 3.5268 กรัม

- (4) คำนวณปริมาณการใช้ $K_2S_2O_8$ 0.05% โมล (คิดเทียบกับโมลของยางธรรมชาติ)
 ยางธรรมชาติ 100 โมล ใช้ $K_2S_2O_8$ เท่ากับ 0.05 โมล
 ยางธรรมชาติ 0.5147 โมล ใช้ $K_2S_2O_8$ เท่ากับ 2.5735×10^{-4} โมล
 เนื่องจาก $K_2S_2O_8$ มีน้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 270 กรัม/โมล
 ดังนั้น $K_2S_2O_8$ ปริมาณ 2.5735×10^{-4} โมล เท่ากับ 0.0695 กรัม

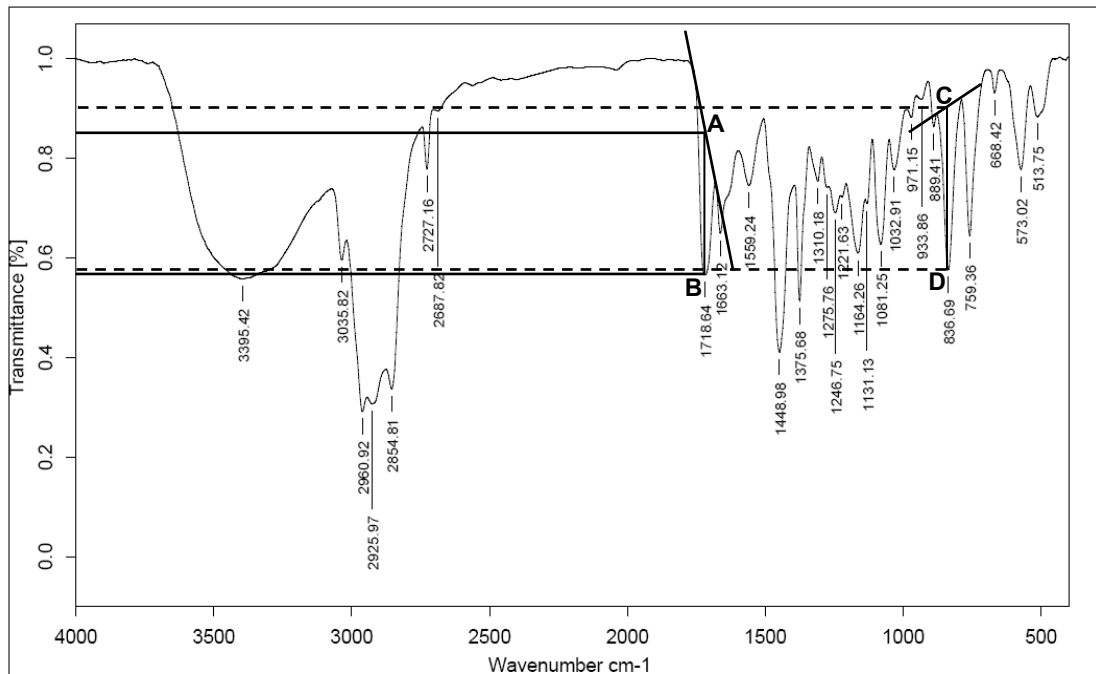
ข.2 ผลการละลายของกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (NR-g-HEMA)

ทำการทดสอบการละลายของกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต เพื่อเปรียบเทียบกับ การละลายของยางธรรมชาติ และพอลิ(2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต) บริสุทธิ์ ในตัวทำละลายชนิดต่างๆ ได้แก่ ไดคลอโรมีเทน (CH_2Cl_2), คลอโรเบนซีน ($\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$), ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (DMSO), โทลูอีน และอะซีโตน โดยการตัดชิ้นส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ ตัวอย่างละ 50 มิลลิกรัม ในตัวทำละลาย 10 มิลลิลิตร และวางทิ้งไว้เป็นเวลา 2 วัน ได้ผลการทดลองดังแสดงในตาราง ข.1

ตาราง ข.1 การละลายของกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (NR-g-HEMA) เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ และพอลิ(2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต)

| Solvent | NR | PHEMA | NR-g-HEMA |
|---------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Dichloromethane | Non-dissolve | Non-dissolve | Non-dissolve |
| Chlorobenzene | Swell | Swell | Swell |
| Dimethyl sulfoxide (DMSO) | Non-dissolve | Non-dissolve | Non-dissolve |
| Toluene | dissolve | Non-dissolve | Swell |
| Acetone | Non-dissolve | Non-dissolve | Non-dissolve |

ข.3 ตัวอย่างการคำนวณ Transmittance ratio ของกราฟดีโคพอลิเมอร์



$$\begin{aligned}
 \text{Transmittance ratio} &= \frac{\log (A/B)}{\log (C/D)} \\
 &= \frac{\log (0.8538/0.5692)}{\log (0.9000/0.5769)} \\
 &= \frac{\log (1.50)}{\log (1.56)} \\
 &= \frac{0.1761}{0.1931} \\
 &= 0.9120
 \end{aligned}$$

ภาคผนวก ค
เอกสารการตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานทางวิชาการ

ประวัติผู้เขียน

| | | |
|------------------------------------|--------------------------|---------------------|
| ชื่อ สกุล | นางสาววิไลพร คงศรีรอด | |
| รหัสประจำตัวนักศึกษา | 4822070 | |
| วุฒิการศึกษา | | |
| วุฒิ | ชื่อสถาบัน | ปีที่สำเร็จการศึกษา |
| วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วัสดุศาสตร์) | มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ | 2548 |

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สัญญาเลขที่ MRG495S033

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

วิไลพร คงศรีรอด และ อรสา ภัทรไพบูลย์ชัย. 2551. สมบัติการติดประสานระหว่างยางธรรมชาติกับโลหะที่เตรียมผิวด้วยวิธีทางกลและทางเคมี. การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 10. มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช

Patarapaiboolchai, O. and Kongsrirod, W. 2007. "Effect of promoters on natural rubber to metal bonding" (oral). Proceedings of 11th International Seminar on Elastomers (ISE 2007), 23–27 September 2007. Konzerthaus Freiburg, Konrad-Adenauer-Platz 1: 79098 Freiburg, Germany pp.125–126

Orasa Patarapaiboolchai^{1*} and Wilaiporn Kongsrirod²

¹Natural Rubber Products Technology Transfer Centre, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla, Thailand, 90112- orasa.p@psu.ac.th; ² Polymer Science Program, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla, Thailand, 90112-kongsrirod_sci@hotmail.com

Three types of promoters used for being studied to be rubber to metal (steel, copper and aluminium) bonding in this research. It was found that zinc diacrylate provided higher adhesion strength on aluminium than other promoters did, especially with using peroxide cure even no primer is applied. When chemlok 205A was used as a primer, zinc dimethacrylate show higher adhesion strength than other promoters in both sulphur and peroxide cure, however peroxide cure give higher adhesion strength than sulphur cure. In addition, cobalt naphthenate shows high adhesion strength with sulphur cure even without primer; however it has less adhesion strength than zinc diacrylate.

Introduction

Adhesives are extensively used in human being life for a long time not only in various industries also in the domestic life. Therefore, a market value of adhesive is very important, significant new markets will be generated in the future especially in the area of structural adhesives for the automobile and aerospace industries. Convention metal reinforced rubber products require both an adhesive to bond the metal to the rubber and a separate curing system to increase the mechanical properties of the rubber [1]. Therefore, it is a need for new fundamental science studies to insure reliability and long term durability. Generally, natural rubber is a non polar material then it is hard to bond to polar substrate like metal compare to Metallic monomer which can be used to create strong adhesive bond to metal surface so, attempt to increase the adhesion ability by using adhesion promoter [2]. is very challenge for this research by determination the amount and type of promoter to create rubber to metal adhesion without the use of external adhesive. The bonding properties of rubber to metal are significant importance to users and were assessed by means of peel test [3]. The properties of the rubber compound with promoters were also characterized by mechanical propertied

Experimentals

2.1 Material

Natural rubber (NR) was purchased from local area, Songkla (Thailand). The promoters are cobalt. Naphthenate from Sigma-Aldrich, zinc diacrylate (ZDA) and zinc dimethylacrylate(ZDMA) from Innovation Polymer. Peroxide (DCP) agent is from chemical/TSC polymer. Other ingredients were purchased from Polymer Innovation Co.Ltd. Thailand.

2.2 Compounding

The preparation of rubber compound was done in both sulphur and peroxide system by mixing rubber (RSS-3) with adding ingredients as described in table 1, on a laboratory size (160x380 mm) two roll mill model Y-160-M2-8 with friction ratio 1:1.22 in according to the method described by ASTM D3184-80 [4]

2.3 Testing

The various rubber compounds were compression mould at 150 °C according to their respective t₉₀ as shown in table 1. The dumb-bell test pieces are prepared for physical testing tested following ASTM D412-68[5]. Standard test specimens are prepared following ASTM D 429-03[6]. Adhesion strength of rubber to metal was determined in newtons per millimeter of width with applying a steady load at the rate of 50 mm/min.

Table X – Formulation of natural rubber compound with cure time in both vulcanization system

| Ingredients | control | 1 | 2 | 3 |
|--|---------|-------|-------|-------|
| RSS-3 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| ZnO | 5 | 5 | 5 | 5 |
| HAF N330 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| Aromatic oil | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Stearic acid | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Wingstay L | 1 | 1 | 1 | 1 |
| sulphur | 5 | 5 | 5 | 5 |
| MBT | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |
| TMTD | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Cobalt naphthenate | - | 10 | | |
| Zinc diacrylate | | | 10 | |
| Zinc dimethylacrylate | | | | 10 |
| Cure time at 150 °C (min; sec) in S cure | 5;48 | 7;16 | 6;36 | 6;24 |
| Cure time at 150 °C (min; sec) in peroxide* cure | 14;35 | 13;33 | 13;36 | 15;39 |

*DCP 5 phr

Results and Discussion

The effect of adhesion promoter on tensile strength is summarized in Figs.1. It can be seen that tensile strength decreases with increasing promoter in every adhesion promoters used for both sulphur and peroxide cure and sequential order is ZDA>cobalt naphthenate >ZDMA for sulphur cure but ZDA shows lower tensile strength than cobalt naphthenate and ZDMA, respectively with peroxide cure. In addition, vulcanization time of each adhesion promoters is not differing in significant as shown in Table 1. Selectivity of promoter for rubber to metal was shown in Figs 2 (sulphur in the left and peroxide in the right hand side). For sulphur curing system to obtain high adhesion strength, it is necessary to apply primer on the metal surface. In addition, cobalt naphthenate provided highest adhesion strength with iron and aluminium metal but a slightly less than ZDMA with copper metal. Moreover, it gave higher adhesion strength with aluminium than copper and iron. Furthermore, high adhesion strength is obtained from cobalt naphthenate with rubber compound solution as a primer while ZDMA and ZDA are recommended to apply with chemlok 205A as a primer. For peroxide curing system to obtain high adhesion strength, it is necessary to apply primer on the metal surface except using ZDA on copper metal. In addition, ZDA provided highest adhesion strength with copper and aluminium metal while ZDMA gave highest adhesion strength with aluminium and iron metal. Moreover, cobalt naphthenate is not recommend to used with peroxide cure since it provide lowest adhesion strength while ZDA and ZDMA are prefer to cure with peroxide. Furthermore, high adhesion strength is obtained from ZDMA with chemlok as a primer in every metal while ZDA is recommended to apply with rubber compound solution as a primer in iron and aluminium but without primer with copper metal.

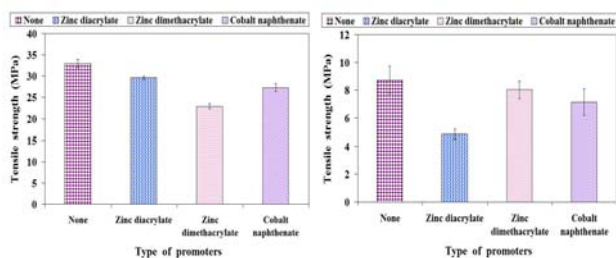


Figure 1 – The tensile properties of natural rubber compound using different adhesion promoter types 10 phr in sulphur cure system (left) and peroxide cure system (right)

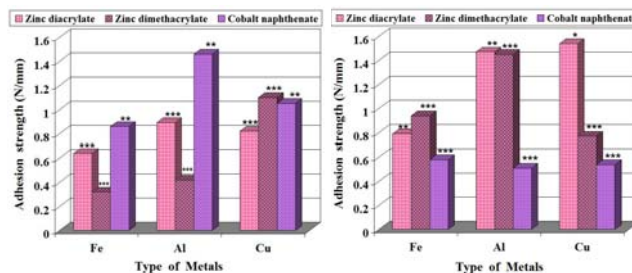


Figure 2 – The adhesion strength of natural rubber compound with type of metal at various adhesion promoters 10 phr (* without primer, **apply with rubber compound as primer, ***apply with chemlok 205A as primer)

Conclusions

All three types of promoter reduce the tensile strength. It is necessary to apply primer on the metal surface in every promoter used with sulfur cure except using ZDA on copper with peroxide cure. Each adhesion promoter works different with different metals. All three types of promoter show lower adhesion strength in iron than copper and aluminium respectively. To bond rubber to aluminium metal, cobalt naphthenate is recommended as a promoter and used rubber compound solution as a primer for sulphur cure and ZDA and ZDMA are more favorable with rubber compound solution and/or chemlok 205A as a primer for peroxide cure. To bond rubber with Copper, ZDMA with chemlok as a primer is recommended for sulphur cure while cobalt naphthenate without primer is prefer for peroxide cure. To bond rubber with iron, cobalt naphthenate with rubber compound solution is recommended for sulphur cure while, ZDMA with chemlok as a primer is prefer for peroxide cure.

Acknowledgements

The authors wish to thank The Thailand Research Fund (TRF) and Prince of Songkla University for the financial support to this research also would like to sincere thanks to Miss Wilaiporn Srikongrod for her hard working to get all the presented data.

References

1. SARTOMER Application Bulletin: 4550/12/04
2. United States Patent 6884832, Adhesion promoter for cord-reinforced rubber and metal or polymer substrate/rubber composites, 04/26/2005
3. D.E. Packham, Handbook of Adhesion, Longman Science & Technical, England, 1992. P.400 - 401
4. American Society for Testing and Material (ASTM) D3184-80
5. American Society for Testing and Material (ASTM) D412-68
6. American Society for Testing and Material (ASTM) D 429-03, Method B- 90° Stripping Test

P-PS 032

ADHESION PROPERTIES OF NATURAL RUBBER TO METAL BONDING USING PHYSICAL AND CHEMICAL TREATMENT

Wilaiporn Kongsrirod, Orasa Patarapaiboolchai

Polymer Science Program, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla

E-mail : orasa.p@psu.ac.th, Tel. 0-7428-8199

This work was studied the effect of surface treatment (physical and chemical treatment) on adhesion strength of natural rubber to metal bonding. The rubber compound was prepared by mixing adhesion promoters (zinc diacrylate, zinc dimethacrylate and cobalt stearate) and other chemicals in the sulphur cure system. Adhesion strength between natural rubber and metals (peel test) was tested under constant load at angle of 90°. It was found that rubber to metal bonding is adhesive failure between primer and metal. The rubber compound with cobalt stearate as adhesion promoter provided higher adhesion strength than other promoters in every three metals, especially copper metals. When rubber compound was used as a primer on steel metals and chemlok 205A were used as a primer on aluminium and copper metals, the highest adhesion strength will be obtained.

Keywords:

Natural rubber, Promoter, Adhesion and peel test

สมบัติการติดประสานระหว่างยางธรรมชาติกับโลหะที่เตรียมผิวด้วยวิธีทางกลและทางเคมี

ADHESION PROPERTIES OF NATURAL RUBBER TO METAL BONDING USING PHYSICAL AND CHEMICAL TREATMENT

Wilaiporn Kongsrirod and Orasa Patarapaiboolchai*

Polymer Science Program, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla.

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของการเตรียมผิวโลหะ (เหล็ก อะลูมิเนียม และทองแดง) ต่อสมบัติการติดประสานระหว่างยางธรรมชาติกับโลหะที่เตรียมผิวด้วยวิธีทางกลและทางเคมี โดยใช้ยางคอมปอนด์ที่ วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถัน และใช้สารช่วยในการยึดติด (promoter) 3 ชนิด ได้แก่ zinc diacrylate, zinc dimethacrylate และ cobalt stearate เป็นต้น แล้วทดสอบสมบัติการติดประสานระหว่างยางกับโลหะแบบปอก (peel test) ด้วยมุม 90 องศา ภายใต้แรงดึงคงที่ พบว่า ความล้มเหลวของการทดสอบมีลักษณะแบบแอดฮีซีฟ (adhesive failure) ระหว่าง primer กับโลหะทุกชนิด สำหรับยางที่ใส่สารช่วยในการยึดติดชนิด cobalt stearate ให้ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะทุกชนิด โดยเฉพาะกับโลหะทองแดง และมีค่าสูงกว่าการใช้สารช่วยในการยึดติดชนิดอื่นๆ โดยที่ค่าในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อรองพื้นโลหะด้วย primer จากยางคอมปอนด์ และการติดประสานระหว่างยางกับโลหะอะลูมิเนียมและทองแดงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อรองพื้นโลหะด้วย primer ทางการค้า (chemlok 205A)

คำสำคัญ:

ยางธรรมชาติ สารช่วยในการยึดติด การติดประสาน และ การทดสอบแบบปอก

บทนำ

ในปัจจุบันได้มีการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่ใช้งานในทางด้านวิศวกรรม ซึ่งผลิตภัณฑ์โดยส่วนใหญ่จะไม่ได้ทำขึ้นจากยางเพียงอย่างเดียว เนื่องจากได้มีการเสริมความแข็งแรงให้กับโครงสร้างผลิตภัณฑ์ดังกล่าวด้วยโลหะ ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ยางติดกับโลหะ ได้แก่ ยางตีนตะขาบรถถัง ลูกกลิ้งยาง ยางล้อ รถยกและยางล้อตัน เป็นต้น (บุญธรรมและชลดา, 2544) นอกจากนี้ยังมีผลิตภัณฑ์ในบางประเภทที่มีการนำโลหะไปยึดติดกับยางเพื่อให้ความสะดวกในการติดตั้ง เช่น ยางกันสะเทือน ในอดีตการยึดติดระหว่างยางกับโลหะนิยมใช้เทคนิคที่เรียกว่าการชุบทองเหลือง ซึ่งในวิธีนี้จะเคลือบพื้นผิวโลหะที่สะอาดด้วยแผ่นฟิล์มทองเหลืองบางๆ โดยใช้วิธีการชุบด้วยไฟฟ้า ก่อนที่จะนำโลหะดังกล่าวไปยึดติดกับยาง (พงษ์ธร, 2548) การยึดติดด้วยวิธีดังกล่าวมีวิธีการที่ยุ่งยากและใช้ต้นทุนสูง ปัจจุบันจึงได้มีการคิดค้นก้าวขึ้นมาใช้แทนวิธีการเดิมในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางติดโลหะ และยังคงนิยมใช้เทคนิคนี้ในการทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะของยางกับโลหะ คือการใช้ชั้นกาวกับยางธรรมชาติ โดยกาวที่ใช้เป็นกาวสำหรับติดโลหะโดยเฉพาะ ซึ่งมีอยู่มากมายหลายชนิดและหลายบริษัท เพื่อให้ผู้ใช้สามารถเลือกใช้ได้เหมาะสมกับชนิดของยางและโลหะ ตัวอย่างกาวที่ใช้ในการยึดติดของยางกับโลหะโดยเฉพาะ เช่น กาวที่มีชื่อในทางการค้าว่า Chemlok ของบริษัท Hughson Chemical , Inc. จากประเทศสหรัฐอเมริกา การเชื่อมติดระหว่างยางกับโลหะโดยการใช้กาวนี้มีวิธีการที่ไม่สลับซับซ้อน สามารถทำได้สะดวกและรวดเร็ว และยังให้ความแข็งแรงสูง เหมาะกับการใช้งานเกือบทุกประเภทแต่เนื่องจากกาวที่ใช้สำหรับติดโลหะโดยเฉพาะนั้นเป็นกาวประเภท isocyanates เช่น triphenylmethane triisocyanate ซึ่งมีหมู่ isocyanates อยู่ในโครงสร้างจึงมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาสูง ทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงที่ไม่ต้องการได้ง่ายและยังมีความว่องไวต่อความชื้นและไอน้ำ และยังมีราคาแพงอีกด้วย

ปัจจุบันยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญของประเทศ และประเทศไทยยังเป็นผู้ผลิตยางธรรมชาติมากที่สุดในโลก (นุชนารถและอรวรรณ, 2550) นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังมีสมบัติที่หลากหลาย เช่น มีความทนทานต่อการขัดถูสูง (abrasion resistance) มีความเหนียว (tack) และมีความสามารถในการยึดติดกับวัสดุอื่นได้ แต่ในขณะเดียวกันยางธรรมชาติก็ยังมีข้อด้อยคือที่ไม่สามารถยึดติดกับโลหะได้โดยตรง เนื่องจากความไม่มีขั้วของยาง จึงทำให้ไม่สามารถนำยางธรรมชาติไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์บางชนิดได้ ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาวิจัยเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติดังกล่าวเพื่อให้ยางติดประสานกับโลหะได้เอง โดยปราศจากการใช้ชั้นกาว ด้วยการใส่สารช่วยในการติดประสาน (Promoter) ลงในยางคอมพอนด์ และมีการรองพื้นโลหะด้วย primers เนื่องจาก primers เป็นสิ่งที่ถูกนำมาใช้ในงานติดโลหะ เพื่อป้องกันชั้นงานเกิดการกัดกร่อนขณะใช้งาน (M.A. Ansarifar และคณะ, 2002) และยังเป็นการเพิ่มความแข็งแรงระหว่างยางและโลหะ ก่อนนำไปยึดติดกับโลหะที่ต้องการ

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางธรรมชาติกับโลหะที่เตรียมผิวด้วยวิธีทางกลและทางเคมี

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุและสารเคมี

ยางแผ่นรมควันชั้น 3 จัดจำหน่ายโดยตลาดกลางยางพารา อ. หาดใหญ่ จ. สงขลา สารช่วยในการยึดติด (promoter) ที่นำมาศึกษาในครั้งนี้ มี 3 ชนิด ได้แก่ Zinc diacrylate (ZDA) มีชื่อทางการค้าว่า Saret® 633 และ Zinc dimethacrylate (ZDMA) มีชื่อทางการค้าว่า Saret® 634 จัดจำหน่ายโดย บริษัท เคมีอินโนเวชั่น จำกัด และ Cobalt stearate จัดจำหน่ายโดย บริษัท พีไอ อินดัสทรี จำกัด Primer ทางการค้า (chemlok 205A) จัดจำหน่ายโดย บริษัท พีริซีสชั่น เอนยีเนียริง จำกัด โทลูอีน ใช้ในการเตรียม primer จากยางคอมพอนด์ จัดจำหน่ายโดย ห้างหุ้นส่วนจำกัด เจ พี เคมีภัณฑ์ กำมะถัน (Sulphur)

และสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมยางคอมพอนด์อื่นๆ จัดจำหน่ายโดยห้างหุ้นส่วน กิจไพบูลย์เคมี จำกัด สำหรับสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมผิวทางเคมี ได้แก่ โซเดียมไดโครเมต กรดซัลฟูริกเข้มข้น กรดไนตริกเข้มข้น กรดออร์โทฟอสฟอริก และเมทิลแอลกอฮอล์ จัดจำหน่ายโดย ห้างหุ้นส่วนจำกัด เจ พี เคมีภัณฑ์

2. การเตรียมยางคอมพอนด์

ทำการผสมยางธรรมชาติกับสารตัวเติม สารเคมีต่างๆ (ยกเว้น กำมะถัน) และสารช่วยในการยึดติดตั้งสูตร ตามตารางที่ 1 ด้วยเครื่องผสมแบบปิด (Kneader) ซึ่งมีปริมาตรของห้องผสมเท่ากับ 3 ลิตร มี fill factor ในการผสมเท่ากับ 0.85 และอุณหภูมิของห้องผสมไม่เกิน 75 °C ตั้งทิ้งไว้ 1 คืน ก่อนนำไปผสมกับกำมะถันด้วยเครื่องบดผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง (Two roll mill) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11.8 นิ้ว Friction ratio เท่ากับ 1:1.27

ตารางที่ 1 สูตรต่างๆ ของยางคอมพอนด์ โดยใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน (Sulphur cure)

| Ingredients | None | Zinc | Zinc | Cobalt |
|-----------------------------------|-------------|---------------------|-------------------------|-------------------|
| | (phr) | diacrylate (phr) | dimethacrylate (phr) | stearate (phr) |
| RSS no.3 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| ZnO | 5 | 5 | 5 | 5 |
| HAF N330 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| Spindle oil | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Stearic acid | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Wingstay L | 1 | 1 | 1 | 1 |
| TMTD | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 |
| CBS | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Coumarone resin | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Sulphur | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Promoters | - | 10 | 10 | 10 |
| Cure time at 150°C (Min : Sec) | 2:30 ± 0.04 | 11:15 ± 0.70 | 13:53 ± 0.69 | 10:33 ± 0.08 |

3. การเตรียมชิ้นตัวอย่างเพื่อนำไปทดสอบสมบัติการติดประสาน (Adhesion properties)

3.1 การเตรียมผิวโลหะ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการยึดติดระหว่างยางกับโลหะ และกำจัดสิ่งสกปรกที่ติดอยู่บนพื้นผิว ได้แก่ น้ำมัน คราบไขมัน ฟูน และสนิมเป็นต้น เนื่องจากสิ่งสกปรกเหล่านี้เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ความแข็งแรงของพันธะระหว่างยางกับโลหะลดลง ในที่นี้ทำการเตรียมผิวของโลหะ 2 แบบ คือ

3.1.1 เตรียมผิวโลหะด้วยวิธีทางกล (Physical treatment) โดยใช้เครื่องพ่นทราย พ่นขัดผิวด้วยทราย (sand blasting) ลงบนแผ่นโลหะ ซึ่งโลหะแต่ละชนิดใช้เวลาในการพ่นที่แตกต่างกัน โดยโลหะเหล็กใช้เวลา 5 นาที/ชิ้น ขณะที่โลหะอะลูมิเนียมและโลหะทองแดงใช้เวลา 2 นาที/ชิ้น หลังจากนั้นกำจัดสิ่งตกค้างบริเวณผิวหน้าชิ้นโลหะด้วยโทลูอีนอีกครั้ง เพื่อล้างคราบไขมันและกำจัดเศษผงเหล็กออกจากผิวโลหะ ทำให้แห้งด้วยลมร้อน นำชิ้นงานเก็บไว้ในถุงซิปล็อคและความชื้น ก่อนนำไปใช้งาน

3.1.2 เตรียมผิวโลหะด้วยวิธีทางเคมี (Chemical treatment) ใช้สารละลายเคมีในการทำทำความสะอาดพื้นผิวโลหะ ซึ่งสารละลายเคมีที่ใช้ในการทำทำความสะอาดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ ตัวอย่างเช่น โลหะเหล็ก ใช้สารละลายเมทิลแอลกอฮอล์และกรดออร์โทฟอสฟอริก โลหะอะลูมิเนียมใช้โซเดียม-ไดโครเมต กรดซัลฟูริกเข้มข้น และน้ำปราศจากไอออน และโลหะทองแดงใช้กรดไนตริกเข้มข้น และน้ำปราศจากไอออน หลังจากทำความสะอาดผิวโลหะด้วยสารละลายเคมีแล้ว ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนอีกครั้ง เพื่อกำจัดสารละลายเคมีที่ตกค้างอยู่บนผิวโลหะก่อนที่จะทำให้แห้งด้วยลมร้อน นำชิ้นงานเก็บไว้ในถุงซิปล็อคและตู้ดูดความชื้น ก่อนนำไปใช้งาน

(<http://www.adhesivestoolkit.com/DocuData/SurfacePreTreatment.xtp>, 2550)

3.2 การเตรียมชิ้นทดสอบสมบัติการติดประสาน (Peel test) ตามมาตรฐาน ASTM D429-03 Method B

นำยางคอมพอนด์ที่เตรียมได้จากตารางที่ 1 มาอุ่นยางด้วยเครื่องผสมยางสองลูกกลิ้ง (two roll mill) และชั่งยางให้มีน้ำหนักเท่ากับ 25 กรัม โดยวางแผ่นโลหะที่มีความหนา 1.6 ± 0.1 มิลลิเมตร กว้าง 25 ± 0.05 มิลลิเมตร ยาว 125 มิลลิเมตร และยางคอมพอนด์ลงในโมลที่มีขนาด 15.2×20.3 เซนติเมตร โดยวางแผ่นโลหะไว้ด้านล่างและวางยางคอมพอนด์ไว้ด้านบนแผ่นโลหะ ทำการวัลคาไนซ์ยางติดโลหะภายใต้อุณหภูมิ $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ และเวลาในการวัลคาไนซ์ยางแต่ละสูตรหาได้จากเครื่อง MDR 2000 หลังจากวัลคาไนซ์ยางติดโลหะแล้ว ควรเก็บชิ้นทดสอบไว้ในที่อุณหภูมิห้อง อย่างน้อย 48 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบการติดประสาน

4. การทดสอบการติดประสาน (Peel test) ระหว่างยางกับโลหะ แต่ละชนิด ตามมาตรฐาน ASTM D429-03

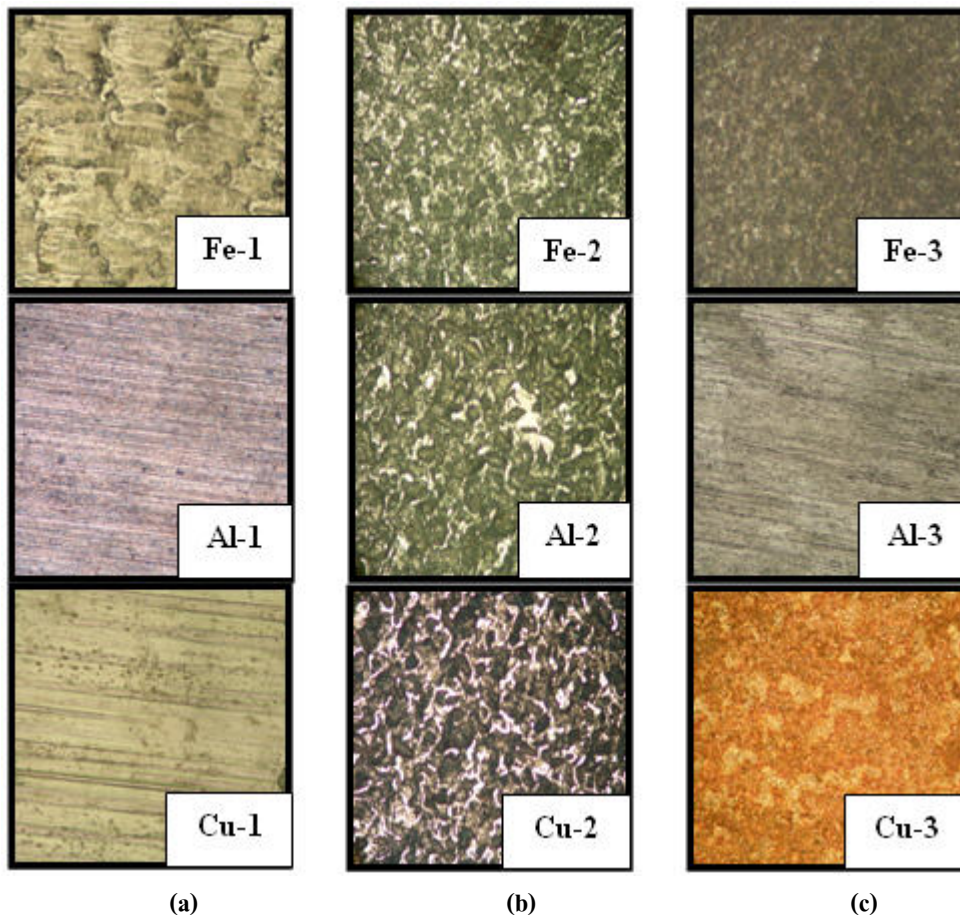
Method B

การทดสอบการติดประสานเป็นการวัดแรงที่ใช้ดึงแผ่นยางให้แยกออกจากแผ่นโลหะ กำหนดเป็นมุม 90 องศา ด้วยอัตราความเร็วคงที่ 50 ± 5 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยติดตั้งชิ้นทดสอบเข้ากับที่จับและใช้คัตเตอร์กรีดให้ยางขาดออกจากโลหะลึกประมาณ 2 มิลลิเมตร ตลอดความยาวหน้ารอยต่อก่อนเดินเครื่อง เพื่อดึงแผ่นยางออกจากแผ่นโลหะ และบันทึกแรงดึงสูงสุดที่ใช้ถึงยางเป็นระยะ 25 มิลลิเมตร เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

1. การวิเคราะห์ผิวหน้าของโลหะด้วยเครื่อง Optical microscope

ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพผิวหน้าโลหะ ด้วยเครื่อง Optical microscope หลังจากทำการเตรียมผิวโลหะด้วยวิธีการทางกล (พ่นทราย) และทางเคมี (จุ่มสารเคมี) แล้วนำไปดูพื้นผิวหลังจากทำการเตรียมผิวด้วยกล้อง Optical microscope ได้ผลการทดลอง แสดงได้ดังรูปที่ 1



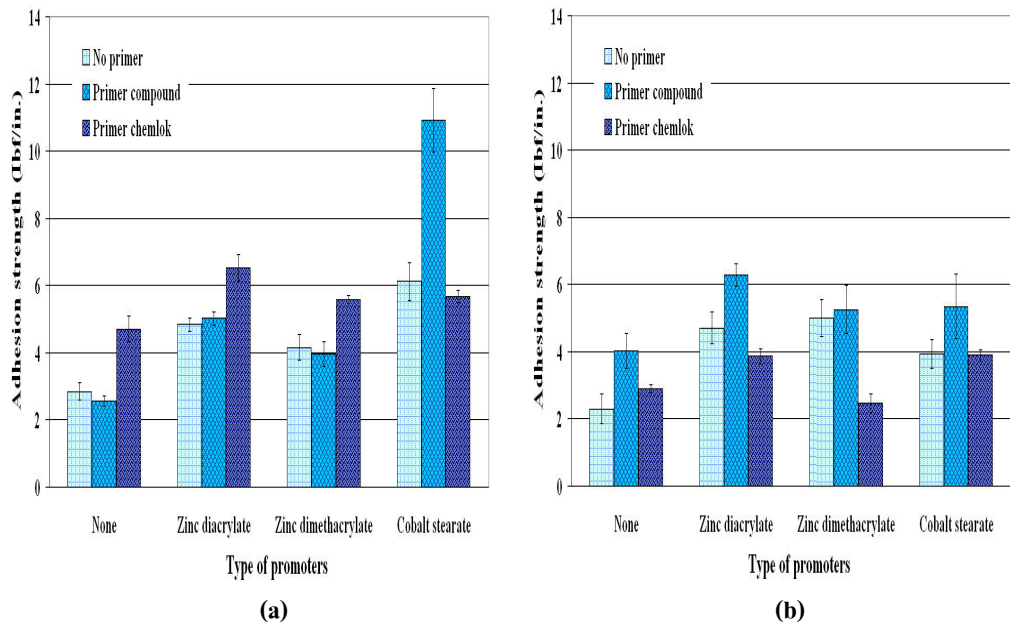
รูปที่ 1 ลักษณะพื้นผิวของโลหะ (a) ก่อนเตรียมผิว (b) หลังจากเตรียมผิวด้วยวิธีทางกล (c) หลังจากเตรียมผิวด้วยวิธีทางเคมี ส่องด้วยกล้อง Optical microscope ที่กำลังขยาย 100 เท่า

จากรูปที่ 1 พบว่าพื้นผิวของโลหะทั้ง 3 ชนิด ที่เตรียมผิวด้วยวิธีทางกลนั้นมีลักษณะผิวที่ขรุขระมากกว่าการเตรียมผิวทางเคมี จึงทำให้มีพื้นที่ในการยึดติดระหว่างยางกับโลหะเพิ่มมากขึ้น จากลักษณะพื้นผิวของแผ่นโลหะทั้ง 3 ชนิด ที่เตรียมผิวด้วยวิธีทางกล พบว่าแผ่นโลหะที่มีความขรุขระมากที่สุด คือ ทองแดง รองลงมา คือ อะลูมิเนียม และ เหล็ก ตามลำดับ สำหรับการเตรียมผิวด้วยวิธีทางเคมีนั้น พบว่าแผ่นโลหะที่มีความขรุขระมากที่สุด คือ ทองแดง เช่นเดียวกับการเตรียมผิวด้วยวิธีทางกล แต่การเตรียมผิวด้วยวิธีทางเคมีนั้น โลหะเหล็กเกิดการกัดกร่อนได้มากกว่าโลหะอะลูมิเนียม จึงทำให้โลหะเหล็กมีความขรุขระมากกว่าอะลูมิเนียม แต่ก็ยังมีความขรุขระน้อยกว่าโลหะทองแดง

2. การเตรียมผิวโลหะด้วยวิธีทางกลและทางเคมี ต่อค่าการติดประสาน (Adhesion strength) ระหว่างยางกับโลหะ ตามมาตรฐาน ASTM D429-03 Method B

ศึกษาการเตรียมผิวด้วยวิธีทางกล (ฟันทราย) และทางเคมี (จุ่มสารเคมี) ต่อค่าการติดประสาน ระหว่างยางกับโลหะ โดยใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถันในการเตรียมยางคอมพอนด์ ที่แปรชนิดสารช่วยในการยึดติด (promoters) 3 ชนิด ได้แก่ Zinc diacrylate, Zinc dimethacrylate (Richard and Walter, 1990) และ Cobalt Stearate เป็นต้น ในปริมาณ 10 phr เท่ากัน ซึ่งมีการเปรียบเทียบการใช้ primer และไม่ใช่ primer ในการรองพื้นผิวโลหะแต่ละชนิด ได้ผลดังต่อไปนี้

2.1 ผลของการติดประสานระหว่างยางกับโลหะเหล็กที่แปรชนิดสารช่วยในการยึดติด ในปริมาณ 10 phr แสดงได้ดังรูปที่ 2

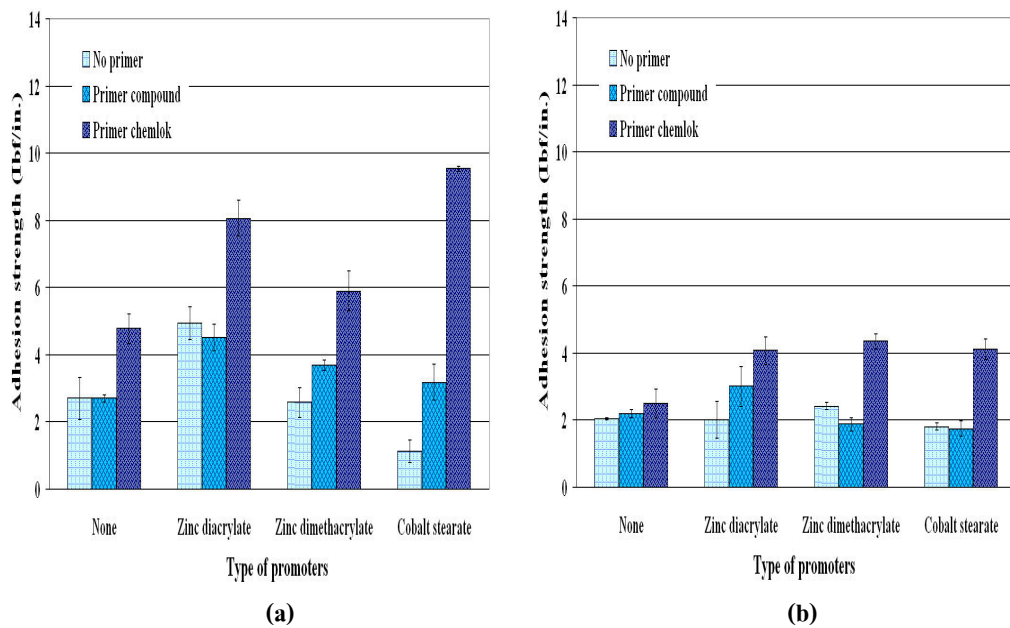


รูปที่ 2 การเตรียมผิว และชนิดของสารช่วยในการยึดติดต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะเหล็กที่ใช้และไม่ใช้ primer (a) วิธีทางกล และ (b) วิธีทางเคมี

จากรูปที่ 2 (a) ค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะเหล็กที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีทางกล มีลักษณะของความล้มเหลวแบบแอดฮีซีฟ (Adhesive failure) ระหว่าง primer กับโลหะ และพบว่า การใส่สารช่วยในการยึดติดลงในยางคอมปอนด์นั้นส่งผลให้ความแข็งแรงในการติดประสานมีค่าเพิ่มขึ้นทุกชนิดของสารช่วยในการยึดติด ทั้งที่ใช้และไม่ใช้การรองพื้นด้วย primer เมื่อพิจารณาค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางคอมปอนด์ที่ใช้สารช่วยในการยึดติดแต่ละชนิดกับโลหะเหล็ก พบว่ายางที่ไม่ใส่สารช่วยในการยึดติดมีค่าการยึดติดที่ดีเมื่อมีการรองพื้นโลหะด้วย primer ทางการค้า ในส่วนของยางที่ใส่สารช่วยในการยึดติดนั้น ความแข็งแรงในการติดประสานขึ้นอยู่กับชนิดของ primer กล่าวคือ ยางที่ใส่สารช่วยในการยึดติดชนิด Zinc diacrylate และ Zinc dimethacrylate มีค่าการยึดติดที่ดีเมื่อมีการรองพื้นโลหะด้วย primer ทางการค้า ส่วนยางที่ใส่สารช่วยในการยึดติดชนิด Cobalt stearate มีค่าการยึดติดที่ดีและมีค่าสูงกว่าการใส่สารช่วยในการยึดติดชนิดอื่นๆ เมื่อรองพื้นผิวโลหะด้วย primer จากยางคอมปอนด์ และจากรูปที่ 2 (b) ค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะเหล็กที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีทางเคมี มีลักษณะของความล้มเหลวแบบแอดฮีซีฟ (Adhesive failure) ระหว่าง primer กับโลหะ เช่นกันและพบว่า การใส่สารช่วยในการยึดติดลงในยางคอมปอนด์นั้น ส่งผลให้ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยโลหะที่รองพื้นด้วย primer จากยางคอมปอนด์ และไม่มีการรองพื้นด้วย primer มีค่าเพิ่มขึ้นทุกชนิดของสารช่วยในการยึดติดอย่างเห็นได้ชัด ในการเตรียมผิวด้วยวิธีทางเคมีนี้ มีผลทำให้ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางคอมปอนด์ที่ใส่สารช่วยในการยึดติด ชนิด Zinc diacrylate และ Cobalt stearate กับโลหะเหล็กที่รองพื้นด้วย primer ทางการค้าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะเหล็กที่เตรียมผิวทั้ง 2 วิธี พบว่า การเตรียมผิวด้วยวิธีทางกล นั้น มีแนวโน้มให้ค่าความแข็งแรงในการติดประสานที่สูงกว่าการเตรียมผิวทางเคมีทุกชนิดของสารช่วยในการยึดติด เมื่อมีการรองพื้นผิวด้วย primer ทางการค้า ยกเว้น ยางที่ใส่สารช่วยในการยึดติดชนิด Cobalt stearate ที่มีความแข็งแรงในการติดประสานสูง เมื่อมีการรองพื้นโลหะด้วย primer จากยางคอมปอนด์ เนื่องจากโลหะเหล็กที่เตรียมผิวด้วยวิธีทางกลนั้น มีพื้นที่ผิวมากกว่าการเตรียมผิวทางเคมี จึงทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับยางและ primer ทางการค้า มากกว่า

2.2 ผลของการติดประสานระหว่างยางกับโลหะอะลูมิเนียมที่แปรชนิดสารช่วยในการยึดติด ในปริมาณ 10 phr แสดงได้ดังรูปที่ 3



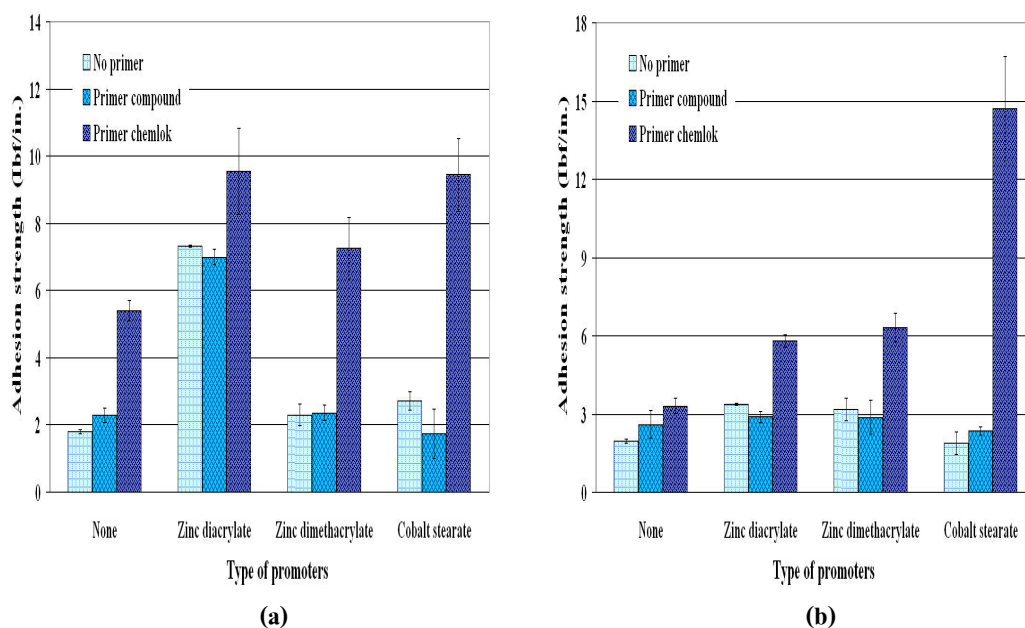
รูปที่ 3 การเตรียมผิวและชนิดของสารช่วยในการยึดติดต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะอะลูมิเนียมที่ใช้และไม่ใช้ primer (a) วิธีทางกล และ (b) วิธีทางเคมี

จากรูปที่ 3 (a) ค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะอะลูมิเนียมที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีทางกล มีลักษณะของความล้มเหลวแบบแอดฮีซีฟ (Adhesive failure) ระหว่าง primer กับโลหะ และพบว่า การใส่สารช่วยในการยึดติดลงในยางคอมปอนด์นั้นส่งผลให้ความแข็งแรงในการติดประสานมีค่าเพิ่มขึ้นทุกชนิดของสารช่วยในการยึดติดเมื่อมีการรองพื้นโลหะด้วย primer จากยางคอมปอนด์ และ primer ทางการค้า ความแข็งแรงในการติดประสานสูงที่สุดเมื่อใส่สารช่วยในการยึดติดชนิด Cobalt stearate และรองพื้นโลหะด้วย primer ทางการค้า รองลงมา คือ การใส่สารช่วยในการยึดติดชนิด Zinc diacrylate และ Zinc dimethacrylate ที่มีการรองพื้นโลหะด้วย primer ทางการค้า ด้วยเช่นกัน ในทางกลับกันเมื่อพิจารณาเฉพาะการไม่ใช้ primer รองพื้นโลหะนั้น พบว่า การใส่สารช่วยในการยึดติดชนิด Cobalt stearate ให้ค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่ต่ำ ส่วนการใส่สารช่วยในการยึดติดชนิด Zinc diacrylate พบว่าให้ค่าความแข็งแรงในการติดประสานดีกว่าการใส่สารช่วยในการยึดติดชนิด Cobalt stearate อย่างเห็นได้ชัด และจากรูปที่ 3 (b) ค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ อะลูมิเนียมที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีทางเคมี มีลักษณะของความล้มเหลวแบบแอดฮีซีฟ (Adhesive failure) ระหว่าง primer กับโลหะ เช่นกัน และพบว่า ความแข็งแรงในการติดประสานมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อมีการรองพื้นโลหะด้วย primer ทางการค้า ทุกชนิดของสารช่วยในการยึดติด และรองพื้นโลหะด้วย primer จากยางคอมปอนด์ เมื่อใส่สารช่วยในการยึดติดชนิด Zinc diacrylate

ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะอะลูมิเนียมที่เตรียมผิวทั้ง 2 วิธี พบว่า มีแนวโน้มให้ค่าความแข็งแรงในการติดประสานที่เหมือนกัน กล่าวคือ ความแข็งแรงในการติดประสานเพิ่มขึ้นเมื่อรองพื้นโลหะด้วย primer ทางการค้าทุกชนิดของสารช่วยในการยึดติด แต่ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่เตรียมผิวด้วยวิธีทางกลนั้นให้ค่าความแข็งแรงในการติดประสานสูงกว่าการเตรียมผิวด้วยวิธีทางเคมีอย่างเห็นได้ชัด ยกเว้น ยางที่ใส่สารช่วยในการยึดติดชนิด Cobalt stearate ยึดติดกับโลหะที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีทางกล โดยปราศจากการใช้ primer

2.3 ผลของการติดประสานระหว่างยางกับโลหะทองแดงที่แปรชนิดสารช่วยในการยึดติด ในปริมาณ 10 phr แสดงได้ดังรูปที่ 4

จากรูปที่ 4 (a) ค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะทองแดงที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีทางกล มีลักษณะของความล้มเหลวแบบแอดฮีซีฟ (Adhesive failure) ระหว่าง primer กับ โลหะ และพบว่า การใส่สารช่วยในการยึดติดลงในยางคอมปอนด์นั้นส่งผลให้ความแข็งแรงในการติดประสานมีค่าเพิ่มขึ้นทุกชนิดของสารช่วยในการยึดติด เมื่อรองพื้นโลหะด้วย primer ทางการค้า ยกเว้น การใส่สารช่วยในการยึดติด ชนิด Zinc diacrylate ให้ค่าความแข็งแรงในการติดประสานดีทุกชนิดของ primer และไม่มี primer ก็ตาม และจากรูปที่ 4 (b) ค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ ทองแดงที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีทางเคมี มีลักษณะของความล้มเหลวแบบแอดฮีซีฟ (Adhesive failure) ระหว่าง primer กับ โลหะเช่นกัน และพบว่า การใส่สารช่วยในการยึดติดลงในยางคอมปอนด์นั้นส่งผลให้ความแข็งแรงในการติดประสานมีค่าเพิ่มขึ้นทุกชนิดของสารช่วยในการยึดติด เมื่อรองพื้นโลหะด้วย primer ทางการค้า โดยเฉพาะยางที่มีการใส่สารช่วยในการยึดติดชนิด Cobalt stearate



รูปที่ 4 การเตรียมผิว และชนิดของสารช่วยในการยึดติดต่อค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะทองแดงที่ใช้และไม่ใช้ primer (a) วิธีทางกล และ (b) วิธีทางเคมี

ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะทองแดงที่เตรียมผิวทั้ง 2 วิธี พบว่า มีแนวโน้มให้ความแข็งแรงในการติดประสานที่เหมือนกัน กล่าวคือ ความแข็งแรงในการติดประสานเพิ่มขึ้น เมื่อรองพื้นโลหะด้วย primer ทางการค้า ทุกชนิดของสารช่วยในการยึดติด แต่ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่เตรียมผิวด้วยวิธีทางกล นั้นให้ค่าความแข็งแรงในการติดประสานสูงกว่าโลหะที่เตรียมผิวด้วยวิธีทางเคมี ยกเว้น การติดประสานระหว่างยางที่ใส่สารช่วยในการยึดติด Cobalt stearate กับโลหะที่เตรียมด้วยวิธีทางเคมีให้ค่าความแข็งแรงในการติดประสานสูงที่สุด

สรุปผลการวิจัย

1. ความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างโลหะที่เตรียมผิวด้วยวิธีทางกลและทางเคมี นั้น มีลักษณะของความล้มเหลวแบบแอดฮีซีฟ (adhesive failure) ระหว่าง primer กับโลหะ และโลหะที่เตรียมด้วยวิธีทางกลนั้นมีแนวโน้มให้ค่าความแข็งแรงในการติดประสานระหว่างยางกับโลหะที่สูงกว่าโลหะที่เตรียมด้วยวิธีทางเคมีอย่างชัดเจน

2. การใช้สารช่วยในการยึดติด ชนิด Zinc diacrylate และ Zinc dimethacrylate นั้น เหมาะสำหรับการติดประสานระหว่างยางกับโลหะ ทองแดงที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธีทางกลมากที่สุด และมีค่าความแข็งแรงในการติดประสานเพิ่มมากขึ้น เมื่อมีการรองพื้นผิวด้วย primer ทางการค้า เช่นเดียวกัน

3. การใช้สารช่วยในการยึดติด ชนิด Cobalt stearate นั้น เหมาะสำหรับการติดประสานระหว่างยางกับโลหะทุกชนิด แต่เหมาะสำหรับการติดประสานระหว่างยางกับโลหะอะลูมิเนียมและโลหะทองแดง เมื่อมีการรองพื้นโลหะด้วย primer ทางการค้า และเหมาะสำหรับการติดประสานระหว่างยางกับโลหะเหล็กเมื่อมีการรองพื้นโลหะด้วย primer จากยางคอมพอนด์

กิตติกรรมประกาศ

ผลงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับคำปรึกษาจากงานวิจัย ตรวจสอบและแก้ไขการเขียนผลงานวิจัยฉบับนี้จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรสา ภัทรไพฑูรย์ชัย นอกจากนี้ขอขอบพระคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้การสนับสนุนทุนในการวิจัยครั้งนี้ ขอขอบพระคุณสาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ที่อำนวยความสะดวกในการบริการวัสดุ อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยเป็นอย่างดี

บรรณานุกรม

นุชนารถ กังพิศดาร และ อรวรรณ ทองเนียม. (2550). สักยภาพการผลิตยางของไทย. *วารสารยางพารา*, ปีที่ 28 ฉบับที่ 1, หน้า 42-52

บุญธรรม นิธิอุทัย และ ชลดา เถวิส. (2544). ยางติดโลหะและการเตรียมผิวโลหะ. *วารสารยางและพอลิเมอร์*, ปีที่ 5 ฉบับที่ 1, หน้า 1-5

พงษ์ธร แซ่อูย. (2548). *สารเคมียาง* ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค).

American Society for Testing and Material (ASTM) D429-03, Method B-90⁰ Stripping Test

M.A. Ansarifar, J. Zhang, A. Bell and R.J. Ellis. 2002. Role of primer in rubber to nylon 6,6. *Journal of Adhesion & Adhesive*, 22, 245-255.

Richard Costin and Walter Nagel. (1990). Metallic coagents for rubber-to-metal adhesion. Sartomer Company, Inc. Pennsylvania, USA :5530 05/05

www.adhesivestoolkit.com/DocuData/SurfacePreTreatment.xtp

ประวัติผู้เขียน

| | | |
|------------------------------------|--------------------------|---------------------|
| ชื่อ สกุล | นางสาววิไลพร คงศรีรอด | |
| รหัสประจำตัวนักศึกษา | 4822070 | |
| วุฒิการศึกษา | | |
| วุฒิ | ชื่อสถาบัน | ปีที่สำเร็จการศึกษา |
| วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วัสดุศาสตร์) | มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ | 2548 |

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการการศึกษา)

ทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สัญญาเลขที่ MRG495S033

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานทางวิชาการ

วิไลพร คงศรีรอด และ อรสา ภัทรไพบุญชัย. 2551. สมบัติการติดประสานระหว่างยางธรรมชาติกับโลหะที่เตรียมผิวด้วยวิธีทางกลและทางเคมี. การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 10. มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช

Patarapaiboolchai, O. and Kongsrirod, W. 2007. "Effect of promoters on natural rubber to metal bonding" (oral). Proceedings of 11th International Seminar on Elastomers (ISE 2007), 23–27 September 2007. Konzerthaus Freiburg, Konrad-Adenauer-Platz 1: 79098 Freiburg, Germany pp.125–126