



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาฉนวนสำหรับฟิวส์สวิตช์แรงต่ำจากยางธรรมชาติ
Development of Low Voltage Fuse Switch Insulator from Natural Rubber

โดย นายนิติพงศ์ ปานกลาง และคณะ

สิงหาคม 2555

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาฉนวนสำหรับฟิวส์สวิตช์แรงต่ำจากยางธรรมชาติ

Development of Low Voltage Fuse Switch Insulator from Natural Rubber

คณะผู้วิจัย

นายนิติพงศ์ ปานกลาง
นายสมชาย เปียนสูงเนิน
กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์

สังกัด

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

สนับสนุนโดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (มทรธ.)
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย มทรธ. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ นำเสนอการออกแบบฉนวนสำหรับฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ ฉนวนแบบใหม่ที่พัฒนาขึ้นทำจากวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางอีพิตีเอ็ม โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่างยางธรรมชาติ 60% กับยางอีพิตีเอ็ม 40% วัสดุฉนวนผ่านการทดสอบคุณสมบัติตามมาตรฐาน ASTM D2240, ASTM D412, ASTM D257 และ ASTM D149 จากการทดสอบ พบว่า วัสดุฉนวนมีค่าความแข็งเท่ากับ 45.9 ± 0.2 Shore A และสามารถรับแรงดึงได้สูงสุดเท่ากับ 10.09 ± 0.58 MPa วัสดุฉนวนมีความต้านทานจำเพาะเชิงผิวและเชิงปริมาตรเท่ากับ 1.3×10^{13} Ω /square และ 1.4×10^{15} Ω - cm ตามลำดับ และมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าประมาณ 18.8 kV/mm นอกจากนั้น ฟิวส์สวิตช์แรงต่ำยังผ่านการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50 μ s ที่ระดับแรงดัน 14.8kV และการทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกินของฉนวนแข็งที่ระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 2.2kV_{RMS} ความถี่ 50 Hz รวมถึงการทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่กระแสฟัด 400A ในห้องปฏิบัติการตามมาตรฐาน IEC 60947-3 ทั้งนี้ ฉนวนยางธรรมชาติที่พัฒนาขึ้นนี้ ทำให้น้ำหนักของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำลดลง 13 เปอร์เซ็นต์

Abstract

This research presents a new design of insulator for low-tension fuse switch. The developing insulator is compounded between natural rubber 60% and EPDM rubber 40%. It has been also tested and approved for electrical and mechanical properties by using ASTM D2240, ASTM D412, ASTM D257 and ASTM D149 standard. From testing results, the hardness and maximum tensile strength of the insulator are approximately equal to 45.9 ± 0.2 Shore A and 10.09 ± 0.58 MPa, respectively. Furthermore, the volume and surface resistivity of it are more than $1.3 \times 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$ and $1.4 \times 10^{15} \Omega/\text{square}$, respectively. And also, it can be withstanding a maximum AC power frequency voltage about 18.8 kV/mm. In addition, the low-tension fuse switch has been tested in laboratory referring to IEC 60947-3 standard. The low-tension fuse switch can be withstanding an impulse voltage(1.2/50 μ s) and AC power frequency voltage about 14.8kV and 2.2kV_{RMS}, 50Hz, respectively along with the temperature rise test at 400A rated current. Therefore, The new insulator can reduce weight of low-tension fuse switch about 13 percents.

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	i
1. ความสำคัญและที่มาของการวิจัย	1
2. วัตถุประสงค์	2
3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2
4. วัสดุฉนวนและการทดสอบคุณสมบัติ	4
5. ฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ	15
6. การออกแบบฉนวนและการจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์	17
7. การทดสอบฟิวส์สวิตช์แรงต่ำในห้องปฏิบัติการ	24
8. สรุปผลการวิจัย	29
9. ข้อเสนอแนะ	29
10. เอกสารอ้างอิง	29
ภาคผนวก	31

1. ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

ไฟฟ้าเป็นพลังงานที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจ สังคม รวมถึงการดำรงชีวิตของมนุษย์ ในปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็นภาคเกษตรกรรม อุตสาหกรรม หรือภายในที่อยู่อาศัย ล้วนแต่ใช้พลังงานไฟฟ้าในการดำเนินกิจกรรมต่างๆ ระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้าจึงมีความสำคัญในฐานะเป็นสื่อกลางในการนำพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งผลิตส่งไปยังผู้บริโภค ในระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้าประกอบด้วยอุปกรณ์ไฟฟ้าที่สำคัญๆ หลายชนิด ทั้งทางด้านไฟฟ้าแรงสูงและไฟฟ้าแรงต่ำ ฟิวส์สวิตช์แรงต่ำถือเป็นอุปกรณ์หนึ่งที่มีความสำคัญไม่ยิ่งหย่อนไปกว่าอุปกรณ์อื่นๆ ในระบบจำหน่าย ฟิวส์สวิตช์แรงต่ำทำหน้าที่ป้องกันการลัดวงจรทางด้านแรงต่ำที่ระดับแรงดัน 220/380V และทำหน้าที่เป็นสวิตช์สำหรับตัด-ต่อวงจร เมื่อจำเป็น ต้องมีการดับไฟฟ้าเพื่อซ่อมแซม บำรุงรักษา หรือขยายระบบจำหน่ายแรงต่ำ ฟิวส์สวิตช์แรงต่ำที่ใช้งานในปัจจุบัน ส่วนที่เป็นนวนสำหรับยึดจุดต่อสายไฟฟ้าและสำหรับการติดตั้งเข้ากับคอนสายจะทำจากวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวน อาทิเช่น เซรามิก ปอร์ซเลน ฯลฯ ดังนั้น ฟิวส์สวิตช์แรงต่ำจึงสามารถแตกหักง่าย ทั้งจากการขนส่ง การติดตั้ง วัสดุฉนวนมีความยืดหยุ่นต่ำ ไม่สะดวกในการขนย้าย น้ำหนักมาก ลักษณะการติดตั้งใช้งานฟิวส์สวิตช์แรงต่ำแสดงดังรูปที่ 1

หากเราพิจารณาถึงศักยภาพของการผลิตและปริมาณวัตถุดิบจากยางพารา จะพบว่า นับตั้งแต่ปี 2534 เป็นต้นมาจนถึงปัจจุบัน ประเทศไทยได้ก้าวขึ้นเป็นผู้ผลิตและส่งออกยางธรรมชาติเป็นอันดับ 1 ของโลก จากข้อมูลการส่งออกในปี 2549 ของสถาบันวิจัยยาง ประเทศไทยส่งออกผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติรวมทุกประเภทไปขายยังต่างประเทศถึง 2.8 ล้านตัน คิดเป็นมูลค่าการส่งออกประมาณ 2.05 แสนล้านบาทโดยส่งออกไปในรูปน้ำยางข้น (Concentrate Latex) ยางแผ่นรมควัน (Ribbed Smoke Sheet : RSS) ยางอบแห้ง (Air Dried Sheet : ADS) ยางแท่ง (Standard Thai Rubber : STR) และผลิตภัณฑ์อื่นๆ ที่ใช้ยางธรรมชาติเป็นวัตถุดิบ

จากตัวเลขการผลิตและส่งออกยางธรรมชาติของประเทศไทย และคุณสมบัติความเป็นฉนวนไฟฟ้าของยางธรรมชาติ กอปรกับปัญหาที่เกิดขึ้นกับฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ โครงการวิจัยนี้ ได้การออกแบบและพัฒนาฟิวส์สวิตช์แรงต่ำแบบใหม่ โดยการนำยางธรรมชาติมาพัฒนาเป็นฉนวน เพื่อแก้ไขจำกัดของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำแบบเดิมตั้งที่เด็กล่ามาข้างต้น นอกจากนี้ ผลผลิตจากการวิจัยในโครงการนี้ มีความเป็นไปได้ในการที่จะนำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์ สร้างมูลค่าผลผลิตทางการเกษตร พัฒนาศักยภาพในการแข่งขันและการพึ่งพาตนเองของสินค้าเกษตรและอุตสาหกรรมภายในประเทศอีกด้วย



รูปที่ 1 ตำแหน่งการติดตั้งฟิวส์สวิตช์แรงต่ำในระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้า

2. จุดประสงค์

1. ออกแบบและพัฒนาฟิวส์สวิตช์แรงต่ำแบบใหม่ ที่ใช้ยางธรรมชาติเป็นฉนวนทดแทนฉนวนเซรามิกแบบเดิมที่มีปัญหาการชำรุดเสียหายจากการแตกหักและมีน้ำหนักมาก
2. สร้างมูลค่าเพิ่มให้วัตถุดิบทางการเกษตรภายในประเทศ
3. ส่งเสริมและสนับสนุนการสร้างนักวิจัยรุ่นใหม่ในระดับปริญญาโทหรือปริญญาตรี
4. เพื่อถ่ายทอดองค์ความรู้ที่ได้จากการวิจัยสู่ชุมชน หน่วยงานของภาครัฐและเอกชน รวมถึงบุคคลที่สนใจ อันจะนำไปสู่การต่อยอดงานวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์

3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากปริมาณการผลิตยางธรรมชาติภายในประเทศที่เพิ่มขึ้นทุกปี และยางธรรมชาติถือว่าเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญอันดับต้นๆ ของประเทศ ทำให้เกิดการวิจัยและพัฒนาในการที่จะเพิ่มมูลค่าของยางธรรมชาติ โดยในอดีตที่ผ่านมา มีตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับยางธรรมชาติ สรุปได้พอสังเขปดังนี้

ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภาพ และคณะ[1] นำเสนอวิธีการผลิตและทดสอบหลังคายางพาราจากวัสดุผสมยางธรรมชาติกับซีลี้อย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. ศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตวัสดุผสมระหว่างผงซีลี้อยไม้และยางธรรมชาติเพื่อพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์หลังคายางพารา
2. เพื่อทดสอบสมบัติของวัสดุผสมระหว่างผงซีลี้อยไม้และยางธรรมชาติเพื่อพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์หลังคายางพารา ในแง่การใช้งานจริง เช่น สมบัติทางการไหล เชิงกล ทางกายภาพ ทางความร้อน การทนทานต่อสภาวะอากาศและแสง และสมบัติด้านการติดไฟ
3. เพื่อเพิ่มชนิดของผลิตภัณฑ์จากยางพาราและเพิ่มมูลค่ายางพารา และนำผลงานวิจัยมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์สู่ภาคเอกชนที่ต้องการนำไปทดลองผลิตจริง อันจะเป็นแนวทางสนับสนุนการผลิตผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติ โดยผ่านกระบวนการวิจัยจากหน่วยงานภาครัฐ

หลังคายางพาราจากวัสดุผสมยางธรรมชาติกับซีลี้อยที่ได้มีสมบัติการใช้งานที่ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่ง สมบัติด้านความสามารถในการขึ้นรูป สมบัติเชิงกลและกายภาพ และสมบัติการทนทานต่อสภาวะอากาศ น้ำ และแสง นอกจากนี้ ยังมีเป้าหมายที่จะลดต้นทุนการผลิตผลิตภัณฑ์โดยการนำเส้นใยธรรมชาติที่เหลือจากกระบวนการผลิตและแปรรูปไม้มาใช้ร่วมกับยางธรรมชาติ อีกด้วย เพราะราคาของเส้นใยซีลี้อยมีราคาถูกกว่าราคายางธรรมชาติถึง 40 เท่าโดยน้ำหนัก งานวิจัยนี้ยังเน้นถึงการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ (จริง) จากของผสมยางธรรมชาติและซีลี้อยไม้ โดยมีเป้าหมายที่ต้องการจะทราบถึง การเลือกใช้เส้นใยธรรมชาติที่เหมาะสมกับการใช้งานแต่ละประเภท อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างยางธรรมชาติและเส้นใยธรรมชาติ การปรับปรุงผิวของผงซีลี้อย รวมไปถึงกลไกการยึดเกาะของคู่วัสดุและวิธีการทดสอบสมบัติต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ภายหลังการผลิต สำหรับกระบวนการผลิตโดยจะเน้นเฉพาะกับกระบวนการผลิตแบบอัดขึ้นรูปด้วยความดัน (Compression Moulding)

จากโครงการวิจัยดังกล่าวทำให้เราได้วัสดุผสมยางธรรมชาติกับซีลี้อยไม้ที่เหมาะสมเพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์หลังคายางพาราในเบื้องต้น และผลการทดสอบของวัสดุผสมระหว่างผงซีลี้อยไม้และยางธรรมชาติเพื่อพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์หลังคายางพาราในแง่การใช้งานจริง เช่น สมบัติทางการไหล เชิงกล ทางกายภาพ ทางความร้อน การทนทานต่อสภาวะอากาศและแสง และสมบัติด้านการติดไฟ

และที่สำคัญงานวิจัยชิ้นนี้ยังได้ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์หลังคายางพาราผสมซีลีเนียม ซึ่งเป็นทางเลือกใหม่ของผู้บริโภคสินค้าใหม่จากยางพารา และสามารถเพิ่มมูลค่ายางพารา ผงซีลีเนียมยางพารา และนำผลงานวิจัยมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์สู่ภาคเอกชนที่ต้องการนำไปทดลองผลิตจริง อันจะเป็นแนวทางการสนับสนุนการผลิตผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติ โดยผ่านกระบวนการวิจัยจากหน่วยงานภาครัฐ

วิภา เศรษฐกนิษฐ์[2] นำเสนอการผลิตท่อน้ำหยดใช้ในสวนจากวัตถุดิบยางธรรมชาติ เนื่องจากการทำสวนขนาดใหญ่ เช่น สวนทุเรียน สวนเงาะ สวนลิ้นจี่ และสวนผักกอนานัย เป็นต้น จะต้องควบคุมการให้น้ำแก่พืช จะช่วยให้พืชออกผลตามต้องการได้ วิธีการหนึ่งที่จะควบคุมการให้น้ำก็คือ การใช้ท่อน้ำหยด งานวิจัยชิ้นนี้ นำเสนอการผลิตท่อน้ำหยด โดยใช้ยางธรรมชาติเป็นวัตถุดิบ (ข้อเสียคือทนทานการเสื่อมสภาพน้อยกว่ายางสังเคราะห์ อี พี ดี เอ็ม) การขึ้นรูปท่อน้ำหยดจะใช้สารตัวเติมในปริมาณต่าง ๆ เช่น china clay 50 phr + CaCO₃ 50 phr + เหม่ดำ N330 50 phr หรือ เหม่ดำ 50 phr + silica 30 phr หรือ CaCO₃ 100 phr + เหม่ดำ 50 phr หรือ Silica 50 phr + PEG 5 phr โดยมีส่วนผสมอื่น ๆ ได้แก่ ZnO 5 phr stearic acid 2 phr สารกันเสื่อม 1 phr สารเร่ง CBS 0.6 phr กำมะถัน 2 phr น้ำมันผสมยาง 2.5 phr มีสารตัวเติมยางรีเคลมขนาด 20 - 30 เมช ในปริมาณ 70 - 80 ส่วนต่ออย่าง 100 ส่วน บดผสมยางและสารเคมีด้วยเครื่องบดผสมยาง ขึ้นรูปท่อน้ำหยดด้วยเครื่องเอ็กทรูดเตอร์ อบอุ่นให้ท่อน้ำหยดคงรูปโดยใช้หม้อนึ่งไอน้ำนาน 1 ชม. อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส

วิภา เศรษฐกนิษฐ์[3] นำเสนอการผลิตฝาจุกยางสำหรับขวดยาที่บรรจุยาชนิดเหลว ตามมาตรฐานของ ISO 8362 - 21928 (E) โดยมีความแข็งประมาณ 40 - 45 Shore A ฝาจุกยางแต่ละชุดของการผลิตมีค่าความแข็งผิวดัดได้ 5 หน่วย มีความเหนียวบิดขาดได้สนิท ยาไม่รั่ว และใช้เข็มฉีดยาเจาะฝาจุกยาใช้แรงไม่เกิน 10 N ฝาจุกยาเมื่อใช้เข็มเจาะจะต้องฉีกขาด เป็นชิ้นไม่เกิน 5 ชิ้น ต่อการเจาะ 100 ครั้ง ตามวิธีทดสอบมาตรฐาน และมีความปลอดภัย เมื่อสัมผัสสารเคมีหรือมีสมบัติตามข้อกำหนดความปลอดภัยของหัวนมยางสำหรับขวดนมตามมาตรฐาน มอก.969 - 2533 คือ เนื้อยางจะต้องปลอดภัยมีปริมาณตะกั่ว แคดเมียม และไนโตรซามีน ไม่เกินตามข้อกำหนด และมีสมบัติปลอดภัยจากสารละลายเคมีที่มีสารละลายออกมาตามข้อกำหนด ได้แก่ ฟีนอล พอร์มาลดีไฮด์ โลหะสังกะสี โลหะตะกั่ว และปริมาณสารตกค้างจากการระเหย สูตรยางที่ใช้การผลิตได้ทดลองใช้ยางธรรมชาติ STR 5L100 ส่วน ZnO 5 ส่วน Stearic acid 2 ส่วน CaCO₃ 30 ส่วน สารเร่ง Rhenogran ZDMC - 80 0.8 ส่วน Rhenocure 1000/C 1.5 ส่วน สารกันเสื่อม 6PPD 1 ส่วน และ S 2 ส่วน นอกจากนี้ในการเลือกใช้ยาง ถ้าจะใช้ยางทิวทายผสมยางธรรมชาติในอัตราส่วน 9:1 หรือ 4:6 หรือ 3:7 หรือ 2:8 หรือ 1:9 ได้ ส่วนระบบการคงรูปด้วยกำมะถันสามารถใช้ได้ทั้งระบบที่ใช้กำมะถันทั่วไป ที่เรียกว่า CV (Conventional Vulcanisation) และระบบ EV (Efficient Vulcanisation) สำหรับการผลิตฝาจุกยางสำหรับขวดยาได้

สถาพร ลักษณะเจริญและสุนทร วงษ์ศิริ[4] นำเสนอการออกแบบสร้างและศึกษาถึงคุณสมบัติของก้ำมเนื้อเทียมที่ผลิตจากยาง โดยก้ำมเนื้อเทียมที่สร้างขึ้นนี้มีลักษณะการทำงานโดยแรงดึงคล้ายกับใน ก้ำมเนื้อของมนุษย์หรือกระบอกสูบที่ทำงานทางเดียว เมื่อมีอากาศอัดจ่ายเข้าไปในก้ำมเนื้อเทียมอัน ความยาวตามแนวแกนหดสั้นลง และระยะแนวรัศมีเพิ่มสูงขึ้นซึ่งทำให้เกิดแรงดึงขึ้นที่ปลายทั้งสองด้าน ในงานวิจัยนี้ นอกจากจะทำการออกแบบสร้างแล้ว ยังจะศึกษาถึงความสามารถของแรงดึง และระยะหดตัวตามแนวแกนของก้ำมเนื้อเทียมที่สร้างขึ้นด้วย ในงานวิจัยนี้จะแบ่งวิธีการวิจัยเป็นสองส่วน ส่วนแรกคือ การออกแบบและสร้างก้ำมเนื้อเทียมที่ทำจากยางพารา ส่วนที่สองเป็นการศึกษาถึงคุณสมบัติของก้ำมเนื้อเทียมที่สร้างขึ้น ผลประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัยนี้

สามารถที่จะสร้างชุดขับเคลื่อนแบบกล้ำเนื้อเทียมที่ผลิตจากยาง ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรม เช่น ใช้เป็นตัวขับเคลื่อนเชิงเส้น หรือ งานทางด้านการแพทย์เพื่อใช้ในการช่วยการเคลื่อนไหวยของข้อศอก หรือ หัวเข่า เป็นต้น

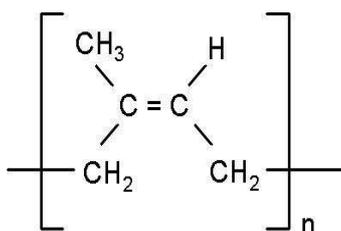
จากการวิจัยที่นำเสนอ จะเห็นได้ว่าประเทศไทยมีการวิจัยและพัฒนาที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มมูลค่าให้กับยางธรรมชาติอย่างต่อเนื่อง แต่ทั้งนี้ การวิจัยและพัฒนาที่ยังเกี่ยวข้องกับสาขาวิศวกรรมไฟฟ้ายังไม่ได้รับความสนใจเท่าที่ควร ดังนั้นจึงเป็นโอกาสอันดีที่โครงการวิจัยนี้ ได้นำยางธรรมชาติ อันเป็นวัตถุดิบที่สามารถผลิตได้เองภายในประเทศมาพัฒนาเป็นฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าเพื่อทดแทนฉนวนประเภทเซรามิกและ/หรือพอร์ซเลน นอกจากนั้นยังเป็นการกระตุ้นให้เกิดการเติบโตและเพิ่มมูลค่าของสินค้าเกษตรด้วยอีกทางหนึ่ง

4. วัสดุฉนวนและการทดสอบคุณสมบัติ

วัสดุฉนวนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นยางคอมปาวด์ที่เกิดจากการผสมกันระหว่างยางธรรมชาติ(Natural Rubber) กับยางเอธิลีนโพรพิลีนไดอีน(Ethylene-Propylene Diene Rubber, EPDM) หรือเรียกว่ายางอีพีดีเอ็ม โดยยางธรรมชาติและยางอีพีดีเอ็มมีคุณสมบัติเบื้องต้นดังนี้

4.1 ยางธรรมชาติ

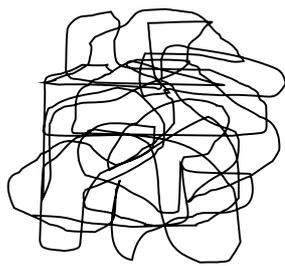
ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมี คือ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน(cis-1,4-polyisoprene) กล่าวคือในโมเลกุลยาง 1 โมเลกุลจะประกอบด้วยหน่วยของไอโซพรีน(C₅H₈) มาต่อกันเป็นสายยาวในลักษณะเส้นตรง ยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ในช่วง 200,000 ถึง 400,000[5] และมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้างมาก ยางธรรมชาติมีความหนาแน่นเท่ากับ 0.93 g/cm³ ที่อุณหภูมิ 20 °C และมีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว(Glass Transition-Temperature, T_g) ประมาณ -72 °C ด้วยเหตุนี้ หากเรานำยางธรรมชาติไปเก็บไว้ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า -72 °C สมบัติของยางธรรมชาติจะเปลี่ยนจากที่เคยยืดหยุ่นไปเป็นของแข็งเปราะเช่นเดียวกับแก้ว



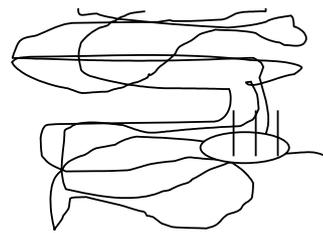
รูปที่ 2 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ

จากรูปที่ 2 จะเห็นว่าในหนึ่งหน่วยของไอโซพรีนจะมีพันธะคู่และมีหมู่แอลฟาเมทิลีนที่ว่างไว้ต่อการเกิดปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกัมมันต์อยู่ พันธะคู่ที่มีอยู่ในโมเลกุลของยางจึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการคงรูปด้วยกัมมันต์ อย่างไรก็ตาม พันธะคู่เหล่านี้ยังสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆ ได้อีก เช่น ออกซิเจน หรือโอโซน การทำปฏิกิริยากับโอโซนหรือออกซิเจน ทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพได้ ทั้งนี้ อัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างยาง(ที่ตำแหน่งพันธะคู่) กับสารเคมีต่างๆ เหล่านี้จะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน(Amorphous) แต่ในบางสภาวะ อาทิเช่น ที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืด โมเลกุลของยางบางส่วนสามารถจัดเรียงตัวได้อย่างค่อนข้างเป็นระเบียบ ยางจึงสามารถเกิดผลึก(Crystallize) ขึ้นได้ การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำหรือที่เรียกว่า “Low Temperature Crystallization” จะพบในกรณีที่เก็บยางไว้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 20°C เป็นเวลานาน โดยยางจะมีอัตราเร็วในการตกผลึกสูงสุดที่อุณหภูมิประมาณ -26°C การตกผลึกที่อุณหภูมิต่ำนี้จะทำให้ยางแข็งมากขึ้น ทำให้ไม่สามารถนำยางไปผสมให้เข้ากับสารเคมีหรือสารตัวอื่นๆ ได้ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นผลึกที่เกิดขึ้นก็จะถูกทำลาย ยางจะอ่อนตัวลงและกลับสู่สภาพเดิม ด้วยเหตุนี้ ประเทศในเมืองหนาวจึงต้องนำยางธรรมชาติมาอบที่อุณหภูมิประมาณ 50°C-70°C เพื่อให้ยางอ่อนก่อนที่จะนำไปใช้ในกระบวนการผลิตต่อไป ส่วนการเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัวหรือที่เรียกว่า “Strain- Induced Crystallization” จะพบเมื่อยางถูกยืดจนมีความยาวตั้งแต่ประมาณ 2-3 เท่า การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัวของยางจะทำให้ยางมีสมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน กล่าวคือ ยางจะเปลี่ยนจากสภาพโปร่งแสง(Transparent) ไปเป็นทึบแสง(Opaque) ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ง่ายในยางคงรูปที่ไม่มีการเติมสารตัวเติม นอกจากนี้ การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัวยังทำให้ยางคงรูปมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น นั่นคือ ยางมีความคงทนต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการขีดถูสูงขึ้น รูปที่ 3 แสดงลักษณะของสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติในสภาวะปรกติและสภาวะที่ยางธรรมชาติถูกยืด



(ก) ในสภาวะปรกติ



(ข) ในสภาวะที่ถูกยืด

รูปที่ 3 สายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติในสภาวะปรกติและสภาวะที่ถูกยืด[5]

4.2 คุณสมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ

ความยืดหยุ่น(Elasticity) ยางธรรมชาติที่คงรูปแล้วจะมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากกระทำกับยางหมดไป ยางจะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม(หรือใกล้เคียง)ได้อย่างรวดเร็ว

ความเหนียวติดกัน(Tack) ยางธรรมชาติ(ในสภาพที่ยังไม่คงรูป) มีสมบัติดีเยี่ยมในด้านความเหนียวติดกันซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางล้อรถยนต์ เป็นต้น

ความทนทานต่อแรงดึง(Tensile Strength) โมเลกุลยางธรรมชาติมีความเป็นระเบียบสูง จึงทำให้ยางธรรมชาติสามารถตกผลึกได้ง่ายเมื่อถูกยืด ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับยาง ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงมีค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงมาก

ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear Strength) ยางธรรมชาติจะสามารถตกผลึกได้เมื่อถูกยืด ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงมีความทนทานต่อการฉีกขาดสูงมากทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูง การเติมสารตัวเติมเสริมแรงลงไปก็ช่วยทำให้ค่าความทนทานต่อการฉีกขาดของยางสูงขึ้น

สมบัติเชิงพลวัต (Dynamic Properties) ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัตที่ดี ง่ายต่อการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนต่ำในระหว่างการใช้งาน นอกจากนี้ ยางธรรมชาติยังมีความต้านทานต่อการล้าตัว(Fatigue Resistance) ที่สูงมากอีกด้วย

ความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion Resistance) ยางธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อการขัดถูสูง

ความเป็นฉนวนไฟฟ้า(Insulation) ยางธรรมชาติมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูงมาก โดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ(Specific Resistivity) สูงถึง 10^{15} หรือ $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$

ความทนทานต่อของเหลวและสารเคมี(Liquid and Chemical Resistance) ยางธรรมชาติมีองค์ประกอบเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขี้ผึ้ง ดังนั้น ยางจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขี้ผึ้ง เช่น เบนซีน เฮกเซน และโทลูอีน เป็นต้น ความสามารถในการละลายนี้จะลดลงถ้าเกิดการคงรูปเนื่องจากการเชื่อมโยงทางเคมีของโมเลกุลเกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติในยางคงรูปจะไปขัดขวางกระบวนการละลายของยาง ยางคงรูปจึงเพียงแต่เกิดการบวมตัวในตัวทำละลายเหล่านี้เท่านั้น อย่างไรก็ตาม การบวมตัวของยางดังกล่าวจะทำให้สมบัติเชิงกลของยางด้อยลง ด้วยเหตุนี้ ยางธรรมชาติจึงไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือตัวทำละลายที่ไม่มีขี้ผึ้งต่างๆ แต่ยางจะทนทานต่อของเหลวที่มีขี้ผึ้ง เช่น อะซิโตนหรืออัลกอฮอล์ นอกจากนี้ ยางธรรมชาติยังทนต่อกรดและด่างเจือจางได้ดี แต่ไม่ทนต่อกรดไนตริกและกรดกำมะถันเข้มข้น

การเสื่อมสภาพเนื่องจากเกิดความร้อน โอโซน และแสงแดด(Aging Properties) โมเลกุลยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่มาก ทำให้ยางไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน(เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นว่าปฏิกิริยาออกซิเดชัน) โดยมีแสงแดดหรือความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงถูกออกซิไดส์ได้ง่าย นอกจากนี้ ยางธรรมชาติยังไม่ทนต่อโอโซน เพราะเมื่อยางถูกยึดและได้รับโอโซนนานๆ จะเกิดรอยแยกขนาดเล็กจำนวนมากที่บริเวณพื้นผิวในทิศตั้งฉากกับทิศทางการยึดตัวของยาง ด้วยเหตุนี้ จึงจำเป็นต้องมีการเติมสารเคมีบางชนิด เพื่อเป็นการป้องกันการเสื่อมสภาพเพื่อยืดอายุการใช้งานของยางธรรมชาติ

การหักงอที่อุณหภูมิต่ำ(Low Temperature Flexibility) ยางธรรมชาติยังคงรักษาสมบัติความยืดหยุ่นหรือความสามารถในการหักงอได้แม้ที่อุณหภูมิต่ำมากๆ ซึ่งยางที่มีสมบัตินี้ที่ดีกว่ายางธรรมชาติมีเพียง 2 ชนิดคือ ยางบิวตาไดอีน(BR) และยางซิลิโคน(Q)

ความต้านทานต่อแรงกดอัด(Compression Set) ยางธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อแรงกดอัดค่อนข้างต่ำทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูงปานกลาง อย่างไรก็ตามความต้านทานต่อแรงกดอัดที่อุณหภูมิต่ำของยางธรรมชาติจะสูงขึ้น เนื่องจากยางอาจเกิดการตกผลึกทำให้ความยืดหยุ่นของยางเริ่มสูญเสียไป ในขณะที่ค่าความต้านทานต่อแรงกดอัดที่อุณหภูมิสูงของยางธรรมชาติจะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากยางธรรมชาติไม่ทนต่อความร้อน ยางจึงเกิดการเสื่อมสภาพและส่งผลทำให้สมบัติความต้านทานต่อแรงกดอัดด้อยลงไป

การกระด้างกระดอน(Rebound Resilience) ยางธรรมชาติมีสมบัติการกระด้างกระดอนสูง (สูงกว่ายางชนิดอื่นๆ ทั้งหมดยกเว้นยางบิวตาไดอีน) และในระหว่างการเปลี่ยนแปลงของรูปร่าง ยางจะสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนน้อย(มี Hysteresis ต่ำ) ยางธรรมชาติจึงมีความร้อนสะสมต่ำเมื่อถูกใช้งานในเชิงพลวัตยางชนิดนี้จึงเหมาะที่จะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่มีขนาดใหญ่ เช่น ยางรถบรรทุกหรือยางล้อเครื่องบิน เพราะหากใช้ยางที่มีความร้อนสะสมสูงก็อาจทำให้ยางเกิดการระเบิดได้ง่าย

อุณหภูมิของการทำงาน(Service Temperature) ยางธรรมชาติสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิ ตั้งแต่ -55°C จนถึง 70°C อย่างไรก็ตาม หากเก็บยางไว้ที่อุณหภูมิต่ำนานๆ ยางอาจเกิดการตกผลึกซึ่งจะทำให้ยางแข็งขึ้นและสูญเสียความยืดหยุ่นไป แต่เมื่ออุณหภูมิการใช้งานสูงเกินไป สมบัติเชิงกลต่างๆ จะด้อยลง อันเนื่องมาจากความร้อนจะทำให้ยางเสื่อมสภาพ ในบางกรณีที่มีการออกสูตรผสมเคมีอย่างได้เหมาะสม และมีการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพลงไป ยางธรรมชาติอาจสามารถนำไปใช้งานได้อย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิสูงถึง 90°C หรืออาจสูงถึง 100°C (ในกรณีที่ยางได้รับอุณหภูมิสูงเป็นช่วงๆ เท่านั้น)

ยางธรรมชาติจัดเป็นยางอเนกประสงค์ที่สามารถนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้อย่างมากมายเนื่องจากยางธรรมชาติมีสมบัติทั้งเชิงกลและเชิงพลวัตที่ดี ดังนั้น จึงจำแนกผลิตภัณฑ์ตามสมบัติของยางธรรมชาติได้ดังนี้

- สมบัติที่ดีในด้านความทนทานต่อแรงดึงและความยืดหยุ่นสูงมาก จึงเหมาะที่จะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น ถุงมือยาง ถุงยางอนามัย ลูกโป่ง และยางรัดของ เป็นต้น
- สมบัติที่ดีในด้านทนความร้อนและความเหนียวติดกันที่ดี จึงเหมาะที่จะนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิด เช่น ยางล้อรถบรรทุก ยางล้อรถยก ยางล้อเครื่องบิน ยางกันกระแทกท่าเรือ เป็นต้น
- สมบัติที่ดีในด้านความทนทานต่อการฉีกขาดสูงทั้งที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง จึงเหมาะสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ ยางกระเปาะน้ำร้อน

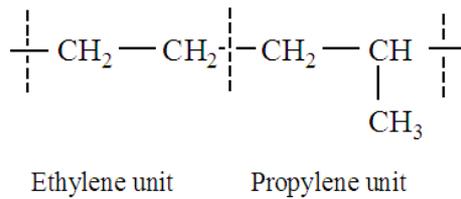
จากคุณสมบัติด้านต่างๆ ของยางธรรมชาติเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นๆ หรือเปรียบเทียบกับยางสังเคราะห์ ยางธรรมชาติมีข้อดีในเรื่องความสามารถในการต้านทานแรงดึง มีความยืดหยุ่นสูง ทนต่อการฉีกขาด แต่ทั้งนี้ยางธรรมชาติยังมีข้อด้อยในเรื่องของการทนทานต่อความร้อน และสภาพอากาศ รวมถึงน้ำมันและสารเคมีต่างๆ ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติต่างๆ ของยางธรรมชาติ

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติ

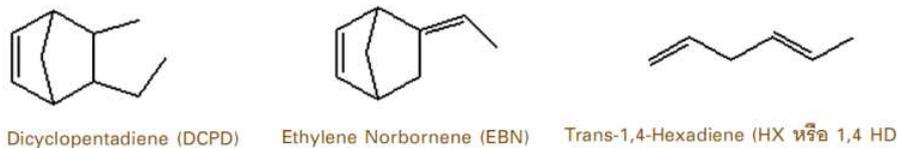
คุณสมบัติ	
Specific Gravity (20°C)	0.934
Refractive Index (20°C)	1.5215 - 1.5238
Coefficient of Cubical Expansion	$0.00062/^{\circ}\text{C}$
Specific Heat (20°C)	0.502
Cohesive Energy Density	63.7 Cal/CC
Heat of Combustion at Constant Volume	44.16KJ/g/g
Thermal Conductivity	10,700 Cal/g
Dielectric Constant	2.37
Power Factor (1,000 cycles)	0.15-0.2
Volume Resistivity	10^{15} Ohm/CC
Dielectric Strength	1 kV/mm.

4.3 ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอิน

ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอินหรือยางอีพีดีเอ็มมาจากการสังเคราะห์พอลิเมอร์จากการทำปฏิกิริยาโคพอลิเมอร์ไรเซชัน ระหว่างโมโนเมอร์ของเอทิลีนกับโพรพิลีน แล้วทำการเติมโมโนเมอร์ตัวที่สาม คือ ไอโอดีนลงไปเล็กน้อยในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ซึ่งทำให้ยางที่ได้มีส่วนที่ไม่อิ่มตัวอยู่ในสายโซ่โมเลกุลยางจึง สามารถคงรูปได้ด้วยกำมะถัน สำหรับสูตรโครงสร้างของยางอีพีดีเอ็มจะแสดงดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5



รูปที่ 4 สูตรโครงสร้างของยางอีพีดีเอ็ม



รูปที่ 5 สูตรโครงสร้างของไดอินที่มีอยู่ในยางอีพีดีเอ็ม

จากลักษณะโครงสร้างโมเลกุลจะเห็นว่ายางอีพีดีเอ็มเป็นยางไม่มีขั้ว ดังนั้นจึงไม่ทนต่อน้ำมันหรือสารละลายที่ไม่มีขั้ว การจัดเรียงตัวของโมโนเมอร์ในสายโมเลกุลเป็นแบบไม่มีรูปแบบ(Random) ทำให้ได้พอลิเมอร์อสัญฐาน(Amorphous) ยางชนิดนี้จึงไม่ตกผลึก ทำให้ความคงทนต่อแรงดึงต่ำและต้องอาศัยสารเสริมแรง(Reinforcing filler) เข้าช่วย คุณสมบัติของยางอีพีดีเอ็มในด้านต่างๆ สามารถสรุปได้พอสังเขปดังนี้

ความยืดหยุ่น(Elasticity) ยางอีพีดีเอ็มมีค่าความยืดหยุ่นสูงกว่ายางสังเคราะห์ชนิดอื่นๆ แต่ยังต่ำกว่ายางธรรมชาติ

ความทนทานต่อแรงดึง(Tensile strength) เนื่องจากการจัดเรียงตัวของโมโนเมอร์ในสายโซ่โมเลกุลเป็นแบบไม่มีรูปแบบ ทำให้ได้พอลิเมอร์แบบอสัญฐาน ยางชนิดนี้จึงไม่สามารถตกผลึกได้ ส่งผลให้ยางมีค่าความทนทานต่อแรงดึงค่อนข้างต่ำและต้องอาศัยการเติมสารตัวเติมเสริมแรงเข้าช่วย โดยค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางที่ได้รับการเสริมแรงจะสูงหรือต่ำมากน้อยเพียงไรก็ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารตัวเติมที่ใช้

ความทนทานต่อการฉีกขาด(Tear strength) ยางอีพีดีเอ็มเมื่อได้รับการเสริมแรงด้วยสารตัวเติมที่เหมาะสม จะมีความทนทานต่อการฉีกขาดสูง โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูงๆ ยางชนิดนี้จะมีค่าความทนทานต่อการฉีกขาดใกล้เคียงกับยางธรรมชาติ

ความทนทานต่อแรงกดอัด(Compression Set) ยางอีพดีเอ็มจะมีค่า Compression Set ต่ำมาก ในยางเกรดที่มี ENB(Ethylidene Norborne)ในปริมาณที่สูง ยางที่คงรูปด้วยระบบเพอร์ออกไซด์ค่า Compression Set จะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในขณะที่ค่า Compression Set ของยางที่คงรูปด้วยระบบกำมะถันจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น

สมบัติเชิงพลวัต(Dynamic Properties) ยางอีพดีเอ็มมีสมบัติเชิงพลวัตที่ดีมากและมีความต้านทานต่อการล้าตัวสูง โดยเฉพาะในยางที่ได้รับการคงรูปด้วยระบบกำมะถันซึ่งจะมีสมบัติเชิงพลวัตใกล้เคียงกับยาง SBR(Styrene Butadiene Rubber)

ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ(Aging Properties) ยางอีพดีเอ็มมีพันธะคู่ในโมเลกุลน้อยมาก ดังนั้น ยางชนิดนี้จึงทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากสภาพอากาศ ออกซิเจน โอโซน แสงแดด และความร้อนได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยางอีพดีเอ็ม ยังทนต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากสารเคมี กรด และด่าง ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพดังกล่าวขึ้นอยู่กับปริมาณของ ไดอินที่มีอยู่ในโมเลกุลยางอีพดีเอ็ม เกรดที่มีปริมาณไดอินต่ำ จะมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพสูง(จึงไม่จำเป็นต้องเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพ)แต่ในยางเกรดที่มีปริมาณไดอินค่อนข้างสูง อาจจำเป็นต้องเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากออกซิเจนและแสงแดดลงไปด้วย อย่างไรก็ตาม ยางชนิดนี้ทุกเกรดมีความทนทานต่อโอโซนดีมาก จึงไม่จำเป็นต้องเติมสารป้องกันโอโซน (Antiozonants)ลงไป ส่วนระบบการคงรูปจะมีผลกระทบโดยตรงต่อความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนและโอโซนของยาง เพราะยางที่คงรูปด้วยระบบเพอร์ออกไซด์จะมีความทนทานต่อความร้อนและโอโซนสูงกว่ายางที่คงรูปด้วยระบบกำมะถัน

ความทนทานต่อน้ำมันและสารเคมี(Oil and Chemical Resistanc) จากลักษณะโครงสร้างโมเลกุล จะเห็นว่ายาง EPM และ EPDM เป็นยางไม่มีขั้ว ดังนั้น ยางจึงไม่ทนต่อน้ำมันหรือตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว แต่จะทนต่อตัวทำละลายที่มีขั้วได้ดี ยางชนิดนี้จึงทนต่อกรด ด่าง น้ำ อัลกอฮอล์ น้ำมันไฮดรอลิก และตัวทำละลายที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบได้เป็นอย่างดี มีความทนทานต่อน้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์ได้ปานกลาง แต่ไม่ทนต่อตัวทำละลายที่มีฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบ กรดอินทรีย์เข้มข้น ตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ตรง(Aliphatic Hydrocarbon Solvents)และตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนที่มีวงแหวน(Aromatic Hydrocarbon Solvents)

ความเป็นฉนวน(Insulation) ยางชนิดนี้มีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะสูงมาก ดังนั้น ยางจึงมีความเป็นฉนวนสูงและยังสามารถรักษาสมบัติความเป็นฉนวนได้ดี แม้ที่อุณหภูมิสูงๆ นอกจากนี้ยางชนิดนี้ยังดูดซึมน้ำได้น้อยมากจึงเหมาะสำหรับใช้ในการผลิตยางหุ้มสายเคเบิลในกรณีที่สายเคเบิลนั้นต้องสัมผัสกับน้ำ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างยางอีพดีเอ็มกับยางอีพเอ็มพบว่ายางอีพดีเอ็ม มีความเป็นฉนวนสูงกว่ายางอีพดีเอ็มเล็กน้อย

การหักงอที่อุณหภูมิต่ำ(Low Temperature Flexibility) ยางอีพดีเอ็มมีสมบัติด้านการหักงอที่อุณหภูมิต่ำดีใกล้เคียงกับยางธรรมชาติ

อุณหภูมิของการใช้งาน(Service Temperature) โดยทั่วไปยางอีพดีเอ็มสามารถนำไปใช้งานได้ที่อุณหภูมิตั้งแต่ -40°C ถึง 150°C ปกติยางจะทนต่ออุณหภูมิที่ 165°C ได้นาน 1 เดือน หรือที่ 125°C ได้นาน 1 ปี และที่ 100°C ได้นาน 5 ปี ทั้งนี้สมบัติความทนทานต่อความร้อนของยางยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ ด้วย เช่น การเลือกใช้ชนิดของสารป้องกันการเสื่อมสภาพและปริมาณของ ไดอินในยาง

ยางอีพดีเอ็มมีค่าความหนาแน่นที่อุณหภูมิห้องค่อนข้างต่ำกว่ายางชนิดอื่นๆ คือ ประมาณ 0.86-0.87 g/cm³ และมีค่าของอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วประมาณ -60 °C ส่วนสมบัติทางกายภาพอื่นๆ แสดงดังในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของยางอีพดีเอ็ม

คุณสมบัติ	
Specific Gravity (20 °C)	0.855-0.880
Refractive Index (20 °C)	1.476 - 1.481
Hardness	73 Shore-A
Modulus of Elasticity	2 – 10 MPa
Percent Elongation at Break	310%
Coefficient of Thermal Expansion	600×10 ⁻⁶ /K
Thermal Conductivity	0.26 W/m-K
Dielectric Constant	2.6-2.8
Specific Heat Capacity	0.45 J/g-K
Electrical Resistivity	1×10 ¹⁵ Ohm-cm
Dielectric Strength	28-36 kV/mm

4.4 ฉนวนยางคอมปาวด์และการทดสอบคุณสมบัติ

จากที่กล่าวมาข้างต้น วัสดุที่ใช้ทำฉนวนสำหรับฟิวส์สวิตช์แรงต่ำเป็นยางคอมปาวด์ โดยในการผสมยางทั้งสองชนิดใช้อัตราส่วนยางธรรมชาติ 60 เปอร์เซ็นต์และยางอีพดีเอ็ม 40 เปอร์เซ็นต์ การผสมยางธรรมชาติกับยางอีพดีเอ็มในอัตราส่วนดังกล่าว มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มคุณสมบัติความทนทานต่อสภาพแวดล้อมให้กับยางคอมปาวด์และยังเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการผสมยางทั้งสองชนิด [6,7] วัตถุดิบและสารเคมีที่จำเป็นในการผสมยางคอมปาวด์แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 วัตถุดิบที่ใช้ในการผสมยางคอมปาวด์

วัตถุดิบ	ปริมาณ(phr)
ยางธรรมชาติ (STR 5L)	60.0
ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอินโมโนเมอร์ (EPDM)	40.0
ซิงก์ออกไซด์ (ZnO)	5.0
กรดสเตียริก (Stearic acid)	2.0
ไดไซโคลเฮกซิลเบนโซโทอะโซลซัลฟิनाไมด์ (TBBS)	1.0
เทตระเมทิลไทูแรมไดซัลไฟด์ (TMTD)	0.2
กำมะถัน (Sulphur : S)	1.8
ผงเขม่าดำ (Carbon-black:CB N330)	1.0

การผสมยางคอมปาวด์จากวัตถุดิบตามตารางที่ 3 จะทำการผสมยางและสารเคมีต่างๆ ด้วยเครื่องผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง(Two-Roll Mill) อุณหภูมิที่ใช้ผสมยางคอมปาวด์เท่ากับ 50°C ขั้นตอนการผสมยางคอมปาวด์จะเริ่มจากการบดผสมยางธรรมชาติกับยางอีพดีเอ็มในเครื่องผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้งเป็นเวลา 3 นาที จากนั้นเติมซิงก์ออกไซด์(ZnO) และกรดสเตียริก(Stearic

Acid) ลงไปบดผสมกับยาง โดยใช้เวลาบดผสมประมาณ 2 นาที ขั้นตอนต่อไป เติมผงเขม่าดำ (Carbon-black) และบดส่วนผสมต่ออีกประมาณ 1 นาที สุดท้ายเติมกำมะถัน(Sulphur)ไดไซโคลเฮกซิลเบนโซโทอะโซลซัลฟิโนไซด์(TBBS)และเทตระเมทิลไทูเรมไดซัลไฟด์(TMTD)โดยใช้เวลาในการบดผสมในขั้นตอนสุดท้ายประมาณ 4 นาที รูปที่ 6 แสดงการบดผสมยางธรรมชาติกับยางอีพดีเอ็มด้วยเครื่องผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง



รูปที่ 6 การบดผสมยางคอมปาวด์ด้วยเครื่องผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง



รูปที่ 7 ยางคอมปาวด์ที่ได้หลังการผสมยางและสารเคมีตามสูตร

จากกระบวนการบดผสมยางธรรมชาติกับยางอีพดีเอ็มตามที่ได้อธิบายมาแล้ว เมื่อเสร็จกระบวนการจะได้อายุคอมปาวด์ดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งพร้อมที่จะนำไปขึ้นรูปและทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ทั้งทางกลและทางไฟฟ้า การทำให้ยางคงรูปหรือเรียกว่าการวัลคาไนเซชัน(Vulcanization) ซึ่งเป็นการใช้ความร้อนทำให้ยางเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากสายโซ่อิสระมาเป็นแบบร่างแห ยางคอมปาวด์ต้องทำการทดสอบเพื่อหาอุณหภูมิและเวลาที่ใช้สำหรับการทำให้ยางคงรูป จากการทดสอบด้วย Oscillating Disk Rheometer(ODR) ได้ระยะเวลาสกอร์ช(Scorch Time, T_{s2}) และระยะเวลาในการคงรูป(Optimum Cure Time, T_{c90}) เท่ากับ 9.22 ± 0.09 นาที และ 13.38 ± 0.71 นาที ตามลำดับ ที่อุณหภูมิทดสอบ 150 องศาเซลเซียส การขึ้นรูปฉนวนสำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางกลและทางไฟฟ้า ยางคอมปาวด์จะถูกนำไปอัดขึ้นรูปในแม่พิมพ์โลหะด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก(Compression Molding Machine) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส รูปที่ 8 แสดงลักษณะของแผ่นฉนวนที่ผ่านการขึ้นรูปขนาด $150 \times 150 \times 2.5$ มิลลิเมตร



รูปที่ 8 ฉนวนยางธรรมชาติผสมยางอีพิตีเอ็มขนาด 150×150×2.5 มิลลิเมตร

วัสดุฉนวนที่ผ่านการขึ้นรูปเป็นแผ่นขนาด 150×150×2.5 มิลลิเมตร จะนำไปทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางไฟฟ้า ประกอบด้วย การทดสอบความแข็ง, การทดสอบสมบัติการรับแรงดึง, การทดสอบสภาพต้านทานเชิงผิวและเชิงปริมาตร รวมถึงการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า การทดสอบจะอ้างอิงมาตรฐานในการทดสอบ ASTM D2240, ASTM D412, ASTM D257-99 และ ASTM D149-05 การทดสอบในแต่ละหัวข้อมีรายละเอียดและผลการทดสอบดังนี้

การทดสอบความแข็ง(Hardness)การวัดค่าความแข็งเป็นการวัดความต้านทานของยางคงรูปต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเฉพาะที่บริเวณพื้นผิว การทดสอบความแข็งกระทำโดยเครื่องคูโรมิเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 9 การทดสอบกระทำตามมาตรฐาน ASTM D2240 การที่ความแข็งมีค่ามากจะทำให้ยางมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือเกิดรอยได้ยาก เมื่อมีวัตถุมากระทำต่อผิวสัมผัสของยาง แต่ถ้ายางมีความแข็งมากเกินไปจะทำให้ยางมีความเปราะและแตกหักได้ง่าย ผลการทดสอบความแข็งของยางคงรูปแสดงดังตารางที่ 4



รูปที่ 9 เครื่องคูโรมิเตอร์สำหรับวัดความแข็งในหน่วยชอร์ตามมาตรฐาน ASTM D2240

ตารางที่ 4 ค่าความแข็งของยางคงรูป

ค่าความแข็งที่ผิว	ผลการทดสอบ
ความแข็ง (Shore A)	45.9±0.2

การทดสอบสมบัติการรับแรงดึง(Tensile Strength) ตามมาตรฐาน ASTM D412 การทดสอบสมบัติแรงดึงของยางสามารถวัดได้ด้วยการดึงขึ้นงานทดสอบมาตรฐานจนขาด ด้วยอัตราเร็วในการดึงคงที่(มาตรฐาน ASTM D412 ได้กำหนดอัตราเร็วในการดึงเท่ากับ 500 ± 50 มิลลิเมตร/นาที) เครื่องที่ใช้ทดสอบสมบัติแรงดึงแสดงดังรูปที่ 10 เรียกว่า Universal Testing Machine สมบัติแรงดึงเป็นสมบัติพื้นฐานที่ใช้ในการควบคุมการผลิต เนื่องจากค่าความทนทานต่อแรงดึงเป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงได้ง่ายตามการเปลี่ยนแปลงของยางอันเนื่องมาจากสาเหตุต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการเปลี่ยนสูตรการผสมเคมีหรือการเปลี่ยนแปลงทางกระบวนการผลิต นอกจากนี้ สมบัตินี้ยังนิยมใช้เป็นตัวชี้วัดความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากสิ่งรบกวนต่างๆ เช่น ความร้อน ของเหลว ก๊าซ สารเคมี โอโซน สภาพอากาศ ฯลฯ ตารางที่ 5 แสดงค่าเฉลี่ยของค่า Tensile Strength และ Elongation at Break ที่ได้จากการทดสอบ



รูปที่ 10 เครื่องทดสอบสมบัติการรับแรงดึง Universal Testing Machine

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบ Tensile Strength และ Elongation at break

สมบัติการรับแรงดึง	ผลการทดสอบ
Tensile Strength (MPa)	8.18 ± 0.59
Elongation at Break (%)	493 ± 11

การทดสอบค่าความต้านทานเชิงผิว (Surface Resistivity) และความต้านทานเชิงปริมาตร (Volume Resistivity) ความต้านทานเชิงผิว และความต้านทานเชิงปริมาตร เป็นการนำฉนวนไฟฟ้าไปคั่นระหว่างอิเล็กโทรดที่ป้อนแรงดันกระแสตรงเป็นเวลานานจนกระทั่งอยู่ตัว จะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านฉนวนนั้นแต่มีค่าน้อยมาก เรียกว่ากระแสรั่ว กระแสรั่วที่ไหลผ่านฉนวนนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ทางหนึ่งไหลผ่านเนื้อฉนวน เนื่องจากฉนวนมีสภาพนำอยู่บ้าง ส่วนอีกทางหนึ่งไหลผ่านตามผิวฉนวน เนื่องจากผิวมีสภาพนำไฟฟ้าจากสิ่งเปื้อนและความชื้นที่ผิว การทดสอบความต้านทานโดยนำชิ้นงานทดสอบขนาด $150 \times 150 \times 2.5$ มิลลิเมตร ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D257-99 ที่สภาวะแวดล้อมห้องทดสอบ อุณหภูมิ $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ $(50 \pm 5) \% \text{Rh}$ ใช้ขั้วอิเล็ก-

โพลีเมอร์เป็นชนิดโลหะเรียบ(Flat Metal Plates, HP16008A) เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และทำการวัดด้วยวิธี Voltmeter-Ammeter Method โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (500±5) โวลต์เป็นเวลา 60 วินาที อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังรูปที่ 11 ผลการทดสอบความต้านทานเชิงผิวและความต้านทานเชิงปริมาตรแสดงดังตารางที่ 6



รูปที่ 11 การทดสอบความต้านทานเชิงผิวและเชิงปริมาตร

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบความต้านทานเชิงผิวและความต้านทานเชิงปริมาตร

ผลการทดสอบ	Resistance	Resistivity
Surface	$0.7 \times 10^{15} \Omega$	$1.3 \times 10^{16} \Omega/\text{square}$
Volume	$1.7 \times 10^{13} \Omega$	$1.4 \times 10^{15} \Omega\text{-cm}$

การทดสอบความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า(Dielectric Strength) ความคงทนของฉนวนทางไฟฟ้า คือค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้า สูงสุดที่ฉนวนนั้นสามารถทนอยู่ได้ โดยไม่เกิดความเสียหาย เกิดการเบรกดาวน์ทำให้การฉนวนเสื่อมสภาพ ซึ่งมีหน่วยเป็นเป็นค่าแรงดันต่อหน่วยความหนาของฉนวน V/cm หรือ kV/cm ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ใช้กำหนดค่าความคงทนของการฉนวนทางไฟฟ้า โดยทั่วไปจะคำนวณจากสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอที่เกิดขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดที่มีลักษณะเป็นแผ่นระนาบวางขนานกัน โดยความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดที่เกิดขึ้นจะเท่ากันทุกจุด ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันขณะจะเกิดเบรกดาวน์นี้ก็คือ ความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวนไฟฟ้า ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$E_b = \frac{U_b}{d} \quad (1)$$

- เมื่อ E_b คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าหรือความคงทนของฉนวนไฟฟ้า
 U_b คือ แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน์ด้วยสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ
 d คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด

การทดสอบความคงทนของฉนวนทางไฟฟ้าตามมาตรฐาน ASTM D149-05 ทำโดยนำแผ่นยางรูปทดสอบในน้ำมันที่อุณหภูมิห้อง 25 ± 5 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องทดสอบ High Voltage Breakdown Tester พิกัด 100 kV, 5 kVA โดยการทดสอบจะเพิ่มแรงดันไฟฟ้าด้วยอัตราเร็ว 500 V/sec. อิเล็กโตรดที่ใช้ในการทดสอบเป็นแบบ Opposing Cylinders เส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว ปลายขอบโค้งรัศมี 0.25 นิ้ว ดังแสดงในรูปที่ 12 ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 7



รูปที่ 12 เครื่องทดสอบความคงทนของฉนวนทางไฟฟ้า

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบความคงทนของฉนวนทางไฟฟ้า

ขั้นตอนทดสอบที่	แรงดันเบรกดาวน์(kV)	ความหนา(mm.)	ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า(kV/mm.)
1	42.8	2.29	18.7
2	41.5	2.28	18.2
3	43.4	2.34	18.5
4	44.5	2.27	19.6
เฉลี่ย	43.1	2.30	18.8

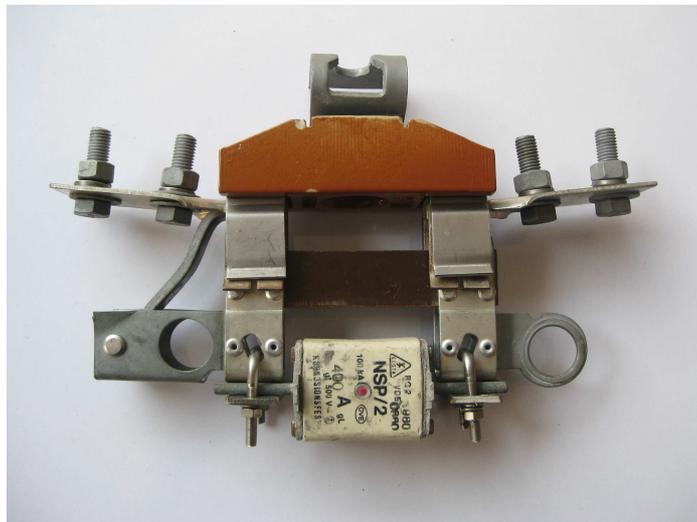
5. ฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ

ในระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค(กฟภ.) ประกอบด้วยอุปกรณ์ไฟฟ้าหลายๆ ตัว อาทิเช่น หม้อแปลงระบบจำหน่าย ฟิวส์คัทเอาท์ หม้อแปลงกระแส ฯลฯ ฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ(Low Tension Fuse Switch) เป็นหนึ่งในอุปกรณ์ไฟฟ้าที่จำเป็นในระบบจำหน่ายแรงต่ำ โดยทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ตัดต่อวงจรและป้องกันการลัดวงจร เพื่อป้องกันการจ่ายกระแสเกินทางด้านแรงต่ำของหม้อแปลงระบบจำหน่าย ฟิวส์สวิตช์แรงต่ำจะติดตั้งทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงระบบจำหน่าย โดยตำแหน่งที่ติดตั้งจะอยู่บริเวณขอนสายไฟฟ้า ณ จุดที่ติดตั้งหม้อแปลงระบบจำหน่าย รูปที่ 13 แสดงลักษณะจริงของการติดตั้งฟิวส์สวิตช์แรงต่ำในระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้าแรงต่ำ

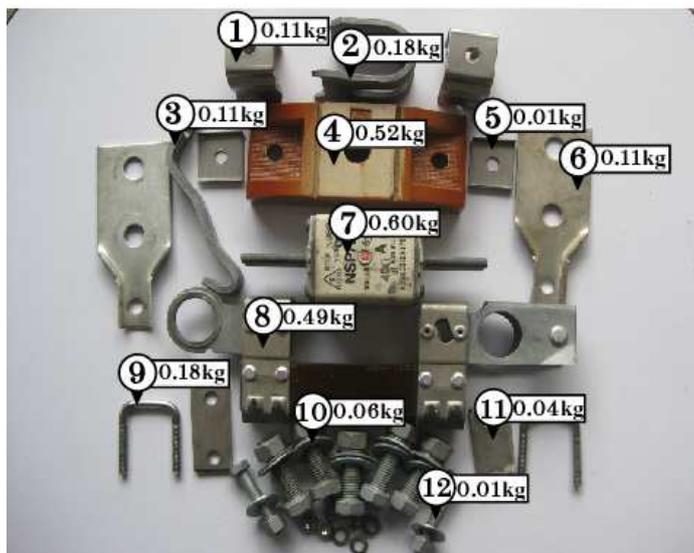


รูปที่ 13 ตำแหน่งติดตั้งฟิวส์สวิตช์แรงต่ำในระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้าแรงต่ำ

ฟิวส์สวิตช์แรงต่ำที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันตามมาตรฐาน IEC 60947-3: Low-Voltage Switchgear and Control Gear – Part 3: Switches, Disconnectors, Switch-Disconnectors and Fuse-Combination Units[8] จะมีพิกัดแรงดันใช้งาน 500 V และพิกัดกระแสใช้งานสูงสุด 400A ฟิวส์สวิตช์แรงต่ำมีลักษณะดังรูปที่ 14 และประกอบด้วยชิ้นส่วนทั้งหมด 12 ชิ้น ฉนวนเซรามิกเดิมของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำจะมีน้ำหนักเท่ากับ 0.52 กิโลกรัม และจากการทดสอบความแข็งด้วยคูโรมิเตอร์(Durometer) มีความแข็งเท่ากับ 88 ชอร์ดี(Shore-D) น้ำหนักโดยรวมของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำเท่ากับ 2.42 กิโลกรัม น้ำหนักของชิ้นส่วนแต่ละชิ้นของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 14 ลักษณะของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ



รูปที่ 15 ส่วนประกอบและน้ำหนักแต่ละชิ้นส่วนของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ

6. การออกแบบฉนวนและการจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์

การออกแบบฉนวนสำหรับฟิวส์สวิตช์แรงต่ำในโครงการวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้นำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการสร้างแบบจำลองเสมือนจริงของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ วัตถุประสงค์เพื่อให้มีความยืดหยุ่นต่อการออกแบบฉนวน รวมไปถึงการวิเคราะห์ผลด้านสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ การออกแบบฉนวนในทางวิศวกรรมไฟฟ้า คุณสมบัติที่ต้องการของวัสดุฉนวนที่ดี เราสามารถพิจารณาจากคุณสมบัติดังต่อไปนี้

คุณสมบัติทางไฟฟ้า

- มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า ณ ระดับแรงดันที่ใช้งานได้
- มีค่าความต้านทานสูงทุกระดับแรงดัน
- มีค่าสูญเสียไดอิเล็กตริกต่ำ เพื่อป้องกันมิให้อุณหภูมิของฉนวนเพิ่มขึ้นเกินขีดจำกัด
- มีความคงทนต่อการเกิดร่องรอยนำไฟฟ้าที่ผิว เพื่อป้องกันการกัดกร่อนหรือการเสื่อมสภาพของฉนวน

คุณสมบัติทางกลของฉนวน ฉนวนจะต้องมีความทนทานต่อแรงกล เนื่องจากในทางปฏิบัติวัสดุฉนวนนอกจากต้องทำหน้าที่ป้องกันการลัดวงจรแล้ว ยังต้องรับน้ำหนัก แรงกด แรงบิด หรือแรงดึง

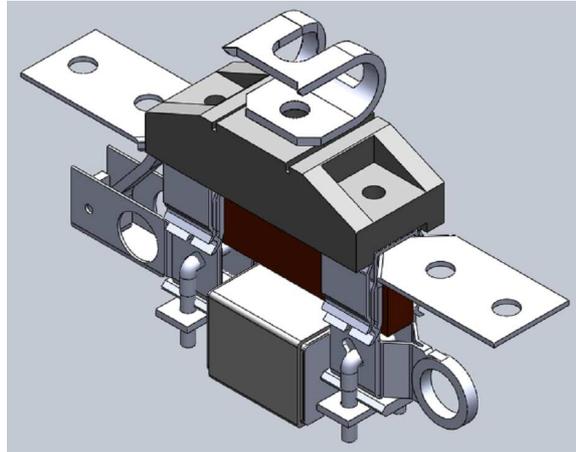
คุณสมบัติทางความร้อนของฉนวน ฉนวนที่ดีต้องทนความร้อนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้า รวมถึงสามารถระบายความร้อนได้ดี ไม่ติดไฟ มีสัมประสิทธิ์ขยายตัวทางความร้อนต่ำ

คุณสมบัติความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมีได้ดี ฉนวนต้องไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมี และไม่เป็นพิษ

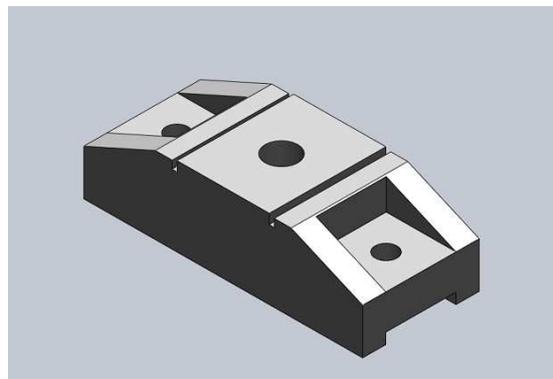
คุณสมบัติความทนทานต่อสภาพแวดล้อม ณ สถานที่ที่ติดตั้งใช้งาน ฉนวนต้องทนต่อน้ำมัน โอโซน ไม่ดูดซึมน้ำหรือความชื้น ทนต่อการแผ่รังสี

กระบวนการออกแบบฉนวนสำหรับฟิวส์สวิตช์แรงต่ำจากยางธรรมชาติผสมยางอีพิตีเอ็มเพื่อทดแทนฉนวนเซรามิกเดิม จะเริ่มจากการสร้างแบบจำลอง 3 มิติเสมือนจริงบนคอมพิวเตอร์ แบบจำลอง 3 มิติที่สร้างขึ้นมีขนาดและมิติ รวมถึงส่วนประกอบเท่ากับฟิวส์สวิตช์แรงต่ำทุกประการ แบบจำลอง 3 มิติแสดงดังรูปที่ 16 สำหรับในส่วนของฉนวนที่ทำจากยางธรรมชาติผสมยางอีพิตีเอ็ม การออกแบบจะ

ออกแบบให้มีขนาดและมิติที่ดัดเทียบกับฉนวนเซรามิกเดิม เพื่อสามารถนำฉนวนที่ทำจากยางธรรมชาติผสมยางอีพิตีเอ็มประกอบเข้ากับชิ้นส่วนที่เหลือของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำได้ โดยที่ไม่จำเป็นต้องมีการตัดแปลงหรือแก้ไขส่วนประกอบอื่นๆ เพิ่มเติม รูปที่ 17 แสดงแบบของฉนวนที่ทำจากยางธรรมชาติผสมยางอีพิตีเอ็ม(แบบพิมพ์เขียวที่แสดงลักษณะและขนาดโดยละเอียดของฉนวนสามารถดูได้จากภาคผนวก)



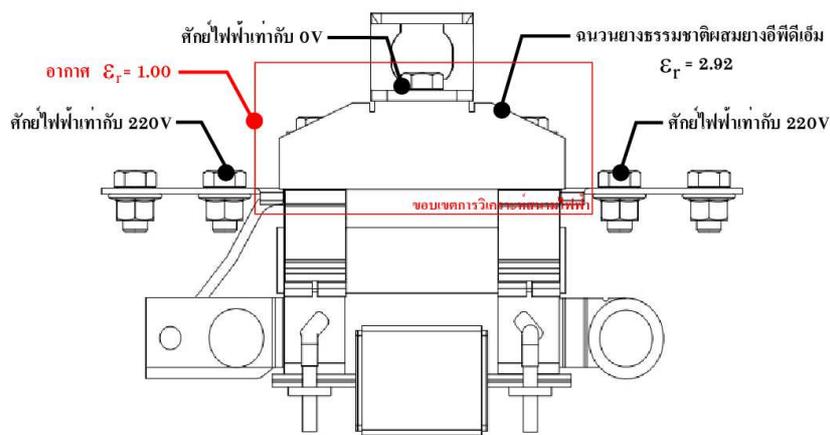
รูปที่ 16 แบบจำลอง 3 มิติของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ



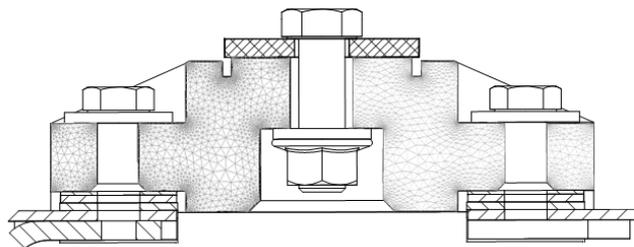
รูปที่ 17 แบบ 3 มิติในส่วนของฉนวนที่ทำจากยางธรรมชาติผสมยางอีพิตีเอ็ม

สำหรับการวิเคราะห์ผลของสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าที่กระทำต่อฉนวนยางธรรมชาติผสมยางอีพิตีเอ็มจะอาศัยแบบจำลอง 3 มิติที่สร้างขึ้นมาสร้างแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์[9] การจำลองจะกำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้ใกล้เคียงกับสภาพการใช้งานฟิวส์สวิตช์แรงต่ำในระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้ามากที่สุด แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าที่กระจายตัวในเนื้อฉนวนของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำแสดงดังรูปที่ 18 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบจำลองบริเวณที่เป็นฉนวนยางธรรมชาติผสมยางอีพิตีเอ็มจะถูกแบ่งเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยมแสดงดังรูปที่ 19 จำนวนเอลิเมนต์สามเหลี่ยมที่ใช้ในการคำนวณเท่ากับ 60,172 เอลิเมนต์ และจำนวนโหนดทั้งหมดเท่ากับ 30,413 โหนด เงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณประกอบด้วย

- ขอบเขตการวิเคราะห์เป็นฉนวนอากาศและมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 1.0
- ฉนวนยางธรรมชาติและยางอีพิตีเอ็มมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 2.92 (เมื่ออัตราส่วนการผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางอีพิตีเอ็มเท่ากับ 60:40)
- บริเวณที่เป็นฉนวนและตัวนำทั้งหมดกำหนดให้ไม่มีประจุค้าง(Space Charge) และฉนวนยางธรรมชาติผสมยางอีพิตีเอ็มเป็นฉนวนสมบูรณ์แบบ(Perfect Dielectric) ซึ่งไม่มีค่าความนำไฟฟ้า(Electrical Conductivity, ρ)
- แบบจำลองจะละลายในส่วนที่เป็นฟิวส์(High Rupture Capacity Fuses) และขั้วต่อสายไฟฟ้าที่ปลายทั้งสอง
- การคำนวณกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับ(Tolerance) เท่ากับ 1×10^{-6}



รูปที่ 18 แบบจำลอง 2 มิติสำหรับการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า



รูปที่ 19 การแบ่งพื้นผิวของฉนวนเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยม

สำหรับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฉนวนยางธรรมชาติผสมยางอีพิตีเอ็มที่ใช้ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า เนื่องจากฉนวนไฟฟ้าแต่ละชนิดจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกแตกต่างกัน อาทิเช่น ปอร์ซเลน (Porcelain) มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกอยู่ระหว่าง 5.0 - 7.0 เป็นต้น ยางธรรมชาติหรือยางพาราและยางอีพิตีเอ็มมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกไม่เท่ากัน โดยทั่วไป ยางธรรมชาติมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประมาณ 2.7 ส่วนยางอีพิตีเอ็มมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประมาณ 3.3 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเกรดของยาง การนำยางธรรมชาติและยางอีพิตีเอ็มมาผสมเข้าด้วยกันเป็นฉนวนไฟฟ้าจะทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีการเปลี่ยนแปลงไป

จากเดิม การหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฉนวน สามารถทำได้ 2 กรณี คือ การทดสอบค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฉนวนตามมาตรฐาน ASTM D150 - 98(2004) Standard Test Methods for AC Loss Characteristics and Permittivity (Dielectric Constant) of Solid Electrical Insulation หรือ IEC 60250 Recommended Methods for the Determination of the Permittivity and Dielectric Dissipation Factor of Electrical Insulating Materials at Power, Audio and Radio Frequencies Including Meter Wavelengths การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D150 หรือ IEC 60250 อาศัยการวัดค่าความจุไฟฟ้า(Capacitance) ของฉนวนระหว่างอิเล็กโทรดแบบระนาบ(Plate - Plate Electrode) ฉนวนที่นำมาวัดค่าความจุไฟฟ้าต้องมีความหนามากกว่า 50 มิลลิเมตรหรือ 2 นิ้ว ความจุไฟฟ้าของฉนวนที่วัดได้จะนำมาคำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กตริกตามสมการที่ (2) อุปกรณ์และอิเล็กโทรดสำหรับวัดค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนแสดงดังรูปที่ 20

$$\epsilon_r = \frac{C_r}{C_0} \quad (2)$$

เมื่อ ϵ_r คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฉนวน, C_r คือค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนที่ทำการทดสอบด้วยอิเล็กโทรดแบบระนาบ(F) และ C_0 คือค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนอากาศหรือสุญญากาศระหว่างอิเล็กโทรดทดสอบ(F)



รูปที่ 20 อุปกรณ์สำหรับการทดสอบค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฉนวนแข็งตามมาตรฐาน ASTM D150(ที่มา <http://www.ptli.com/testlopedia/tests/d150dielectric.asp>)

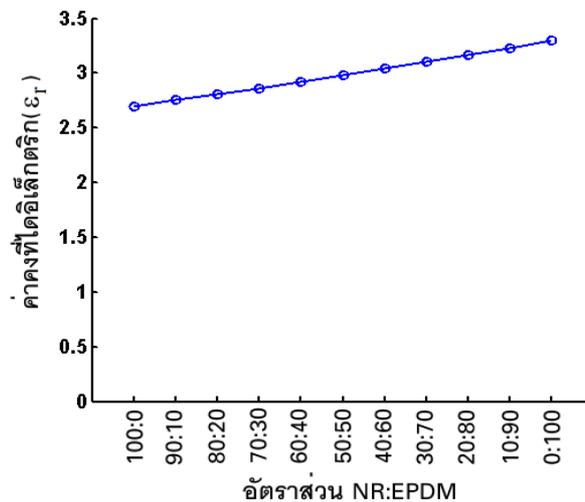
การหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกแบบที่สอง สามารถทำได้โดยการคำนวณ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่คำนวณได้จะเป็นค่าโดยประมาณและอ้างอิงจากค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฉนวนที่นำมาผสมกัน สมการที่ใช้ในการคำนวณคือ

$$\frac{\varepsilon_m - 1}{\varepsilon_m + 2} = \sum_{i=1}^n Y_i \frac{\varepsilon_i - 1}{\varepsilon_i + 2} \quad (3)$$

เมื่อ ε_m คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฉนวนผสม, ε_i คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฉนวนชนิดที่ i และ Y_i คือสัดส่วนของฉนวนชนิดที่ i ตารางที่ 8 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฉนวนยางธรรมชาติผสมยางอีพิตีเอ็มในอัตราส่วนต่างๆ เมื่อคำนวณโดยสมการที่ (3) และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของยางธรรมชาติและยางอีพิตีเอ็มมีค่าเท่ากับ 2.7 และ 3.3 ตามลำดับ

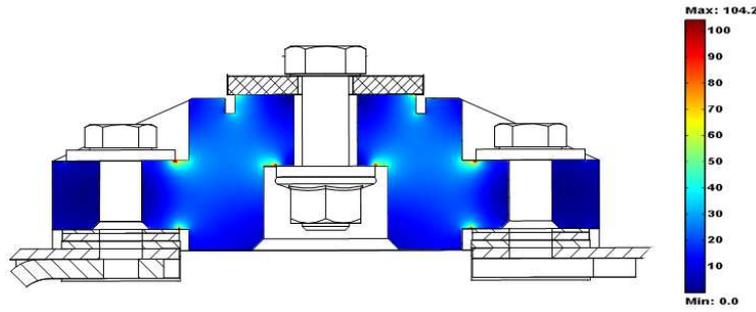
ตารางที่ 8 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของยางธรรมชาติผสมยางอีพิตีเอ็มที่อัตราส่วนต่างๆ

อัตราส่วน ยางธรรมชาติ : ยางอีพิตีเอ็ม	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก
80:20	2.81
70:30	2.87
60:40	2.92

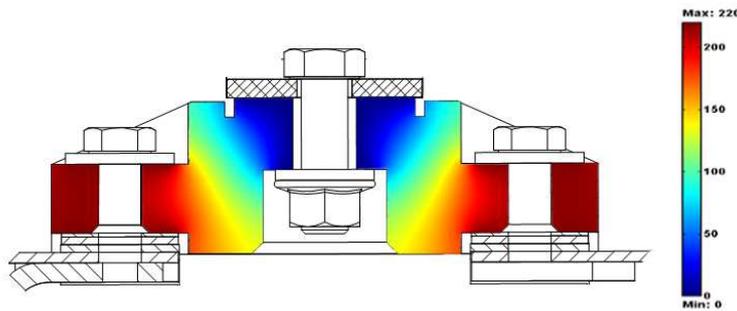


รูปที่ 21 แนวโน้มค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฉนวนยางธรรมชาติผสมยางอีพิตีเอ็มที่อัตราส่วนต่างๆ

จากการคำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฉนวนยางธรรมชาติผสมยางอีพิตีเอ็ม พบว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฉนวนเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางอีพิตีเอ็ม ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฉนวนจะมีค่าอยู่ระหว่าง 2.7 ถึง 3.3 รูปที่ 21 แสดงแนวโน้มค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฉนวนยางธรรมชาติผสมยางอีพิตีเอ็มที่อัตราส่วนต่างๆ ทั้งนี้ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฉนวนเป็นค่าโดยประมาณที่คำนวณทางทฤษฎี ในทางปฏิบัติค่าคงที่ไดอิเล็กตริกอาจมีการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากสารเคมีต่างๆ ที่ผสมลงในเนื้อฉนวน



รูปที่ 22 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในเนื้อฉนวนยางธรรมชาติผสมยางอีพิตีเอ็ม



รูปที่ 23 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าภายในเนื้อฉนวนยางธรรมชาติผสมยางอีพิตีเอ็ม

จากแบบจำลองและเงื่อนไขขอบเขตของการคำนวณที่กำหนด ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 22 และรูปที่ 23 เมื่อฉนวนยางธรรมชาติผสมยางอีพิตีเอ็มในอัตราส่วนยางธรรมชาติต่อยางอีพิตีเอ็มเท่ากับ 60:40 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณฉนวนมีค่าสูงสุดเท่ากับ 104.2 V/mm ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นบริเวณจุดสัมผัสระหว่างฉนวนกับน็อตที่ใช้ยึดฟิวส์สวิตช์แรงต่ำและยึดขั้วต่อสายไฟฟ้า ซึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้าที่มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับศูนย์โวลต์และ 220 โวลต์ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาถึงความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้น จะเห็นได้ว่า ความเครียดสนามไฟฟ้าดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 18.8kV/mm ดังนั้นความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นนี้ จึงไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อฉนวนและไม่ก่อให้เกิดการเบรกดาวนขึ้นในเนื้อฉนวนแต่อย่างใด

ตารางที่ 9 เปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดของฉนวนแต่ละชนิด

ชนิดของฉนวน	NR	EPDM	NR:EPDM			Ceramic
			80:20	70:30	60:40	
ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด(V/mm)	107.4	99.6	105.8	104.9.7	104.2	85.7

ตารางที่ 9 แสดงถึงค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์-เมนต์เมื่อกำหนดให้ฉนวนของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำเป็นฉนวนต่างชนิดกัน อันได้แก่ ยางธรรมชาติ(NR), ยางอีพิตีเอ็ม(EPDM), ยางธรรมชาติผสมยางอีพิตีเอ็ม(NR:EPDM) และเซรามิก(Ceramic) ฟิวส์สวิตช์แรงต่ำที่ฉนวนทำจากยางธรรมชาติมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 107.4 V/mm ในขณะที่ฉนวนเซรา

มิกมีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำสุดเท่ากับ 85.7 V/mm ฉนวนยางธรรมชาติเมื่อผสมกับยางอีพิตีเอ็ม ความเครียดสนามไฟฟ้าจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามอัตราส่วนของยางอีพิตีเอ็ม ยางอีพิตีเอ็มมีอัตราส่วนเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดลดลง ฉนวนยางธรรมชาติเมื่อผสมกับยางอีพิตีเอ็ม ในอัตราส่วน 80:20 ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 105.8 V/mm เมื่ออัตราส่วนในการผสมยางธรรมชาติกับยางอีพิตีเอ็มเปลี่ยนเป็น 60:40 ความเครียดสนามไฟฟ้าลดลงเหลือ 104.2 V/mm หรือลดลงประมาณ 1.5% เมื่อทำการเปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นระหว่างฉนวนเซรามิกกับฉนวนยางธรรมชาติกับยางอีพิตีเอ็มอัตราส่วนผสม 60:40 พบว่า ฉนวนยางธรรมชาติกับยางอีพิตีเอ็มอัตราส่วนผสม 60:40 มีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมากกว่าฉนวนเซรามิกประมาณ 18%

การขึ้นรูปฉนวนสำหรับฟิวส์สวิตช์แรงต่ำจากยางธรรมชาติผสมยางอีพิตีเอ็ม กระทำโดยการนำแบบจำลอง 3 มิติไปสร้างแม่พิมพ์โลหะสำหรับการขึ้นรูปฉนวน การขึ้นรูปฉนวนใช้วิธีการกดอัดด้วยความร้อน ซึ่งเป็นวิธีการขึ้นรูปที่ง่ายและเหมาะสมกับการขึ้นรูปชิ้นงานที่ไม่มีความซับซ้อนมาก รูปที่ 24 แสดงถึงลักษณะแม่พิมพ์โลหะสำหรับการขึ้นรูปฉนวน ฉนวนสำหรับฟิวส์สวิตช์แรงต่ำที่ผ่านการขึ้นรูปจะถูกติดตั้งแทนฉนวนเซรามิกเดิมดังแสดงในรูปที่ 25 ต้นแบบฟิวส์สวิตช์แรงต่ำที่ฉนวนเป็นยางธรรมชาติ โดยฉนวนที่พัฒนาขึ้นทำให้ฟิวส์สวิตช์มีน้ำหนักเบาลง 0.31 กิโลกรัม หรือลดลงประมาณ 13% นอกจากนี้ ข้อดีของการใช้ฉนวนยางธรรมชาติคือ ฉนวนทนทานต่อแรงกระแทกได้ดี ไม่ชำรุดแตกหัก เนื่องจากการใช้งานหรือการขนส่ง



รูปที่ 24 แม่พิมพ์โลหะสำหรับการขึ้นรูปฉนวน



รูปที่ 25 ต้นแบบฟิวส์สวิตช์แรงต่ำที่ฉนวนเป็นยางธรรมชาติผสมยางอีพิตีเอ็ม

7. การทดสอบฟิวส์สวิตช์แรงต่ำในห้องปฏิบัติการ

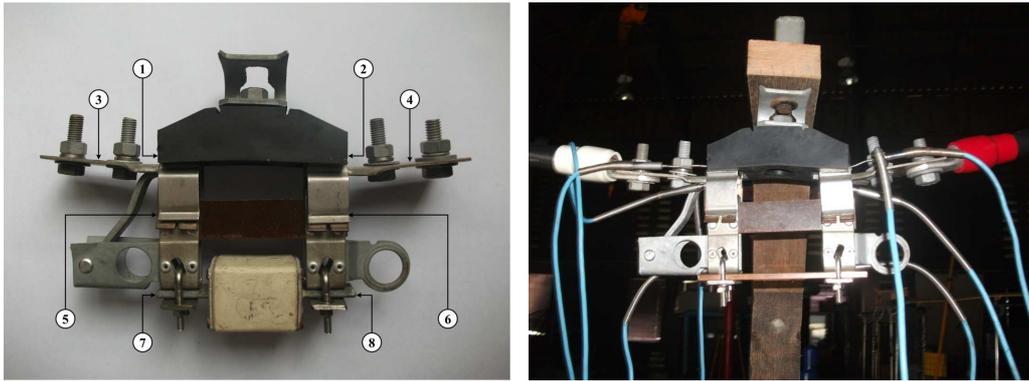
การทดสอบฟิวส์สวิตช์ที่ฉนวนเป็นยางธรรมชาติผสมยางอีพิตีเอ็มในอัตราส่วน 60:40 กระทำ การทดสอบโดยอ้างอิงมาตรฐานการทดสอบ IEC 60947-3 การทดสอบประกอบด้วย การทดสอบ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น(Temperature Rise Test), การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์(Impulse Withstand Voltage Test), การทดสอบความทนทานต่อแรงดันเกินของฉนวนแข็ง(Over Voltage Withstand Test) และการวัดความต้านทานฉนวน(Insulation Resistance Measurement) การ ทดสอบกระทำ ณ ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรม ศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ผลการทดสอบในแต่ละรายการทดสอบมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

การทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น(Temperature Rise Test)เป็นการวัดอุณหภูมิ ณ ชิ้นส่วนใน ตำแหน่งต่างๆ ของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำภายใต้การทำงานที่กระแสพิกัดเปรียบเทียบกับอุณหภูมิอากาศ โดยรอบ อุณหภูมิของชิ้นส่วนต่างๆ ณ จุดวัดจะต้องเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิอากาศโดยรอบไม่เกินค่าที่ กำหนดตามมาตรฐาน การทดสอบจะป้อนกระแสไฟฟ้าเท่ากับกระแสพิกัดของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำที่ 400A, 50Hz ให้กับฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ โดยใช้แหล่งจ่ายกระแสแสดงดังรูปที่ 26 การจ่ายกระแสให้กับ ฟิวส์สวิตช์ใช้สายตัวนำขนาด 240 mm² และความยาวสายจากขั้วต่อสายแหล่งจ่ายถึงขั้วต่อสายฟิวส์ สวิตช์แรงต่ำไม่น้อยกว่า 2 เมตร ในการวัดอุณหภูมิของชิ้นส่วนจะทำการวัดอุณหภูมิ ณ จุดที่อุณหภูมิ สูงที่สุด โดยใช้เทอร์มอคัปเปิลชนิดลวดละเอียด อุณหภูมิของชิ้นส่วนคำนวณจากผลต่างระหว่าง อุณหภูมิชิ้นส่วนที่วัดได้กับอุณหภูมิอากาศโดยรอบ รูปที่ 27 แสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิที่จุดต่างๆ

ผลการของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแสดงดังตารางที่ 10 โดยหลังจากการจ่ายกระแสทดสอบ 400A เป็น เวลา 3 ชั่วโมง อุณหภูมิที่จุดวัดทั้งหมด 8 จุดมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิไม่เกิน 1 °C จึงหยุดทำการ ทดสอบ รูปที่ 28 แสดงกราฟอุณหภูมิ ณ จุดวัดต่างๆ บนฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ จากผลการทดสอบอุณหภูมิ ที่เพิ่มขึ้นสรุปผลได้ดังตารางที่ 11 อุณหภูมิโดยรอบเท่ากับ 34.6°C ที่เวลา 3 ชั่วโมง อุณหภูมิทุกจุดถึงค่า คงที่จุดที่ 1 ถึงจุดที่ 4 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่ำกว่าขีดจำกัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามมาตรฐาน จึงถือว่าผ่าน การทดสอบ ส่วนจุดที่ 5 ถึงจุดที่ 8 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสูงกว่าขีดจำกัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้จุดดังกล่าว เป็นจุดเชื่อมต่อระหว่างหน้าสัมผัสของฟิวส์แรงต่ำ มิใช่จุดที่สัมผัสกับฉนวนยางธรรมชาติกับยาง อีพิตีเอ็ม การที่อุณหภูมิเพิ่มเกินขีดจำกัดจึงมิใช่มาจากการเปลี่ยนแปลงฉนวนจากเซรามิกเป็นยาง ธรรมชาติกับยางอีพิตีเอ็ม สามเหตุอาจเกิดจากการถอดและประกอบชิ้นส่วนของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ ทำ ให้จุดต่อดังกล่าวเกิดอาการล้าหรือการช่นน้อต ณ จุดต่อดังกล่าวไม่แน่นอน



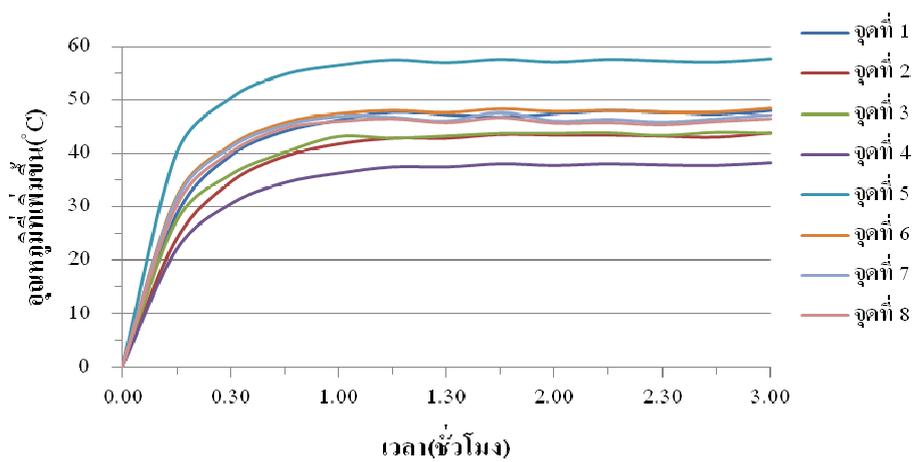
รูปที่ 26 แหล่งจ่ายกระแส 400A 50Hz



รูปที่ 27 จุดวัดอุณหภูมิทั้งหมด 8 จุด

ตารางที่ 10 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเทียบกับระยะเวลาที่ทดสอบ

เวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิโดยรอบ (°C)	อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามจุดที่ทดสอบ (°C)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
0:00	32.1	0	0	0	0	0	0	0	0
0:30	33.0	39.5	34.5	35.9	30.5	50.3	41.5	41.0	40.1
1:00	34.0	46.2	41.7	43.1	36.3	56.5	47.5	46.8	46.0
1:30	34.8	47.2	42.8	43.2	37.5	57.0	47.7	46.0	45.8
2:00	34.5	47.4	43.4	43.7	37.8	57.1	47.9	46.0	45.7
2:30	34.7	47.7	43.2	43.3	37.9	57.3	47.8	45.8	45.4
3:00	34.6	48.0	43.8	43.7	38.3	57.7	48.5	47.1	46.5



รูปที่ 28 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ

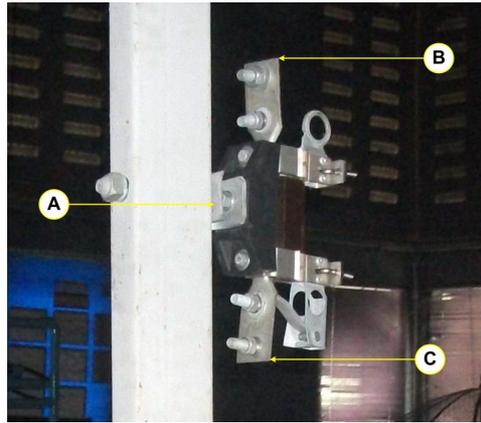
ตารางที่ 11 ผลการทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของแต่ละจุด

จุดที่ทดสอบ	อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น(°C)	ขีดจำกัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น(°C)	สถานะ
1	48.0	65	ผ่าน
2	43.8	65	ผ่าน
3	43.7	65	ผ่าน
4	38.3	65	ผ่าน
5	57.7	40	ไม่ผ่าน
6	48.5	40	ไม่ผ่าน
7	47.1	40	ไม่ผ่าน
8	46.5	40	ไม่ผ่าน

การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์(Impulse Withstand Voltage Test) เป็นการทดสอบความทนทานของฉนวนฟิวส์สวิตช์แรงต่ำต่อแรงดันเกินชั่วขณะฟ้าผ่า(Lightning Surge) การทดสอบทำการป้อนแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μ S เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนค่ายอด \pm 3% เวลาค้นขึ้น 30% และเวลาค้นลง 20% รูปสัญญาณแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังรูปที่ 29 การทดสอบจะทำการป้อนแรงดันทดสอบทั้งหมดจำนวน 5 ครั้ง สำหรับแต่ละตำแหน่งที่ป้อนหากันไม่น้อยกว่า 1 วินาที ที่ระดับแรงดันอิมพัลส์ 14.8kV สำหรับตำแหน่งการป้อนแรงดันอิมพัลส์แสดงดังรูปที่ 30 ระหว่างจุด A กับจุด B, จุด A กับจุด C, และจุด B กับจุด C ทั้งนี้ในระหว่างการทดสอบหรือหลังการทดสอบต้องไม่เกิดการปล่อยประจุทำลายที่ทำให้ฉนวนของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำในตำแหน่งที่ทดสอบได้รับความเสียหาย ผิดพร่องใดๆ เช่น การเกิดประกายข้าม(Sparkover), วาบไฟตามผิว(Flashover), เจาะทะลุ(Puncture) ผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำแสดงดังตารางที่ 12 สภาวะในการทดสอบที่อุณหภูมิ 34.0 °C, ความดันบรรยากาศ 103 kPa, ความชื้นสัมพัทธ์ 54%



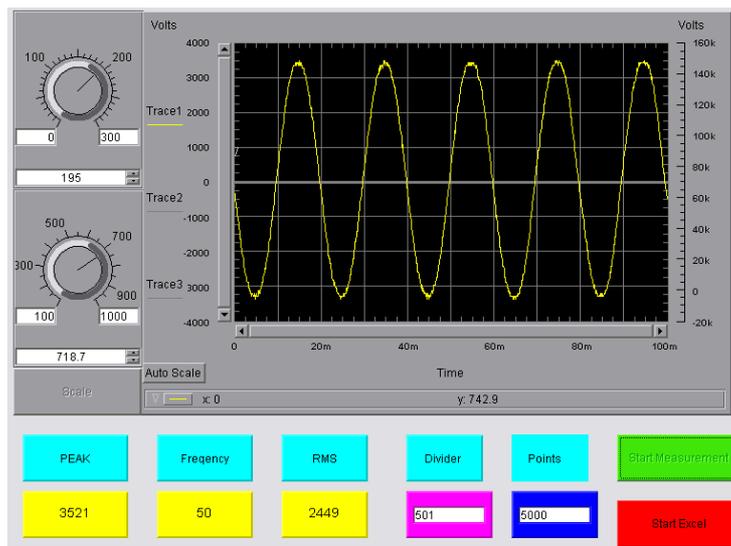
รูปที่ 29 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μ s



รูปที่ 30 ตำแหน่งการป้อนแรงดันอิมพัลส์

ตารางที่ 12 ผลการทดสอบความทนต่อแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μ s

ครั้งที่	ค่าแรงดันยอด(kV)			เวลาหน้าคลื่น(μ s)			เวลาทางคลื่น(μ s)		
	A-B	A-C	B-C	A-B	A-C	B-C	A-B	A-C	B-C
1	14.8	14.8	14.8	0.82	0.79	0.81	45.93	47.40	48.01
2	14.8	14.8	14.8	0.81	0.80	0.81	48.40	48.65	48.53
3	14.8	14.8	14.8	0.79	0.78	0.79	47.12	48.70	47.76
4	14.8	14.8	14.8	0.80	0.82	0.79	47.50	48.23	47.48
5	14.8	14.8	14.8	0.82	0.78	0.78	47.29	47.79	48.10
เฉลี่ย	14.8	14.8	14.8	0.81	0.80	0.80	47.25	48.15	47.98



รูปที่ 31 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากโปรแกรม Agilent VEE Pro

การทดสอบความทนทานต่อแรงดันเกินของฉนวนแข็งเป็นการทดสอบความสามารถในการทนทานต่อแรงดันเกินชั่วคราวของฉนวนแข็งโดยการทดสอบจะป้อนแรงดันไฟฟ้าทดสอบที่ 2.2 kV_{RMS} เป็นเวลา 5 วินาที ระหว่างจุด A กับจุด B, จุด A กับจุด C, และจุด B กับจุด C (จุด A, B และ C แสดงดังรูปที่ 30) แรงดันไฟฟ้าทดสอบเป็นรูปคลื่นไซน์ชอยด์และมีความถี่ระหว่าง 45-65 Hz หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่ใช้ทดสอบต้องสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าลัดวงจรได้ไม่น้อยกว่า 200 mA ในระหว่างการทดสอบต้องไม่เกิดการวาบไฟตามผิว(Flashover) และไม่เกิดการเบรกดาว์นของฉนวนทั้งภายในและภายนอก อาทิเช่น การเจาะทะลุ(Puncture) การเบรกดาว์นเนื่องจากร่องรอยนำไฟฟ้าที่ผิว(Tracking) เป็นต้น รูปที่ 31 แสดงลักษณะรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าทดสอบ ผลการทดสอบพบว่า ระหว่างป้อนแรงดันทดสอบให้กับฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ ไม่เกิดการวาบไฟตามผิวและการเบรกดาว์นของฉนวนแข็งแต่อย่างใด

การทดสอบความต้านทานของฉนวนเป็นการวัดความต้านทานของฉนวนระหว่างขั้วต่อสายทั้งสองกับจุดยึดที่ต่อลงกราวด์ของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ การวัดความต้านทานใช้เครื่อง High Voltage Insulation Tester แบบอนาล็อก การทดสอบทำการวัดความต้านทานระหว่างจุด A กับจุด B, จุด A กับจุด C และจุด B กับจุด C ดังแสดงในรูปที่ 30 การวัดความต้านทานระหว่างจุดต่างๆ จะวัดทั้งหมด 3 ครั้ง ผลการวัดแสดงดังตารางที่ 13 รูปที่ 32 แสดงตัวอย่างการวัดความต้านทานของฉนวนระหว่างจุด A กับจุด C

ตารางที่ 13 ผลการวัดความต้านทานของฉนวน

ขั้นทดสอบที่	A กับจุด B (GΩ)	จุด A กับจุด C (GΩ)	จุด B กับจุด C (GΩ)
1	3	3.5	4.5
2	2.9	3	4.75
3	2.75	3.25	5
เฉลี่ย	2.88	3.25	4.75



รูปที่ 32 ตัวอย่างการวัดความต้านทานของฉนวนระหว่างจุด A กับจุด C

8. สรุปผลการวิจัย

การพัฒนามาตรฐานสำหรับฟิวส์สวิตช์ที่ทำจากยางธรรมชาติผสมยางอีพิตีเอ็มทำให้ได้วัสดุคุณภาพทดแทนฉนวนเซรามิกเดิม โดยฉนวนยางธรรมชาติผสมยางอีพิตีเอ็มมีน้ำหนักเบาขึ้นประมาณ 13% การใช้ฉนวนยางธรรมชาติผสมยางอีพิตีเอ็มทำให้น้ำหนักโดยรวมของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำลดลงจาก 2.42 กิโลกรัมเหลือ กิโลกรัม

จากการทดสอบคุณสมบัติทางกลและทางไฟฟ้าตามมาตรฐานทดสอบพบว่า ฉนวนยางธรรมชาติผสมยางอีพิตีเอ็มมีค่าความแข็งเท่ากับ 45.9 ± 0.2 Shore A ก่อนการบ่มแรงสามารถรับแรงดึงได้เท่ากับ 10.09 ± 0.58 MPa จากการบ่มแรงการรับแรงดึงลดลงเหลือ 8.18 ± 0.59 MPa ฉนวนมีความต้านทานจำเพาะเชิงผิวและเชิงปริมาตรเท่ากับ 1.3×10^{13} Ω /square และ 1.4×10^{15} Ω - cm ตามลำดับ และมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าประมาณ 18.8 kV/mm.

การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในเนื้อฉนวนแสดงให้เห็นว่า ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณฉนวนมีค่าสูงสุดเท่ากับ 104.2 V/mm ซึ่งวัสดุฉนวนสามารถทนความเครียดสนามไฟฟ้าดังกล่าวได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ ฟิวส์สวิตช์แรงต่ำที่ฉนวนทำจากยางธรรมชาติยังได้ผ่านการทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50 μ s และการทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกินของฉนวนแข็ง ตามมาตรฐาน IEC 60947-3 แต่ทั้งนี้ ยังต้องมีการทดสอบการใช้งานฟิวส์สวิตช์แรงต่ำในระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้าต่อไป เพื่อแน่ใจได้ว่าฟิวส์สวิตช์แรงต่ำที่ฉนวนทำจากยางธรรมชาติสามารถนำไปใช้งานได้จริง

9. ข้อเสนอแนะ

- การนำฟิวส์สวิตช์แรงต่ำที่ฉนวนทำจากยางธรรมชาติผสมยางอีพิตีเอ็มไปใช้งานจริงในระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้า ควรมีการทำการทดสอบเฉพาะแบบ (Type Test) เพิ่มเติม ซึ่งในงานวิจัยนี้ มิได้ทำการทดสอบเฉพาะแบบ เนื่องจากการทดสอบเฉพาะแบบจำเป็นต้องใช้งบประมาณในการทดสอบจำนวนมาก
- ควรมีการทดสอบการปลด-สับฟิวส์สวิตช์แรงต่ำเพิ่มเติม

10. เอกสารอ้างอิง

1. ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ และคณะ, การผลิตและทดสอบหลังคายางพาราจากวัสดุผสมยางธรรมชาติกับซีลี้อย, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย(สกว.), 2546.
2. วิภา เสวตกนิษฐ์ และคณะ, การผลิตท่อน้ำหยดใช้ในสวน, สถาบันวิจัยยาง, กรุงเทพฯ, 2543
3. วิภา เสวตกนิษฐ์ และคณะ, การผลิตฝาจุกยางสำหรับขูดยา, สถาบันวิจัยยาง, กรุงเทพฯ, 2543
4. สถาพร ลักษณะเจริญและสุนทร วงษ์ศิริ, การออกแบบสร้างและศึกษาถึงคุณสมบัติของกล้ามเนื้อเทียมที่ผลิตจากยาง, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17, 15-17 ตุลาคม 2546 จังหวัดปราจีนบุรี.
5. พงษ์ธร แซ่ฮุย, ยาง: ชนิด สมบัติ และการใช้งาน, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพฯ, 2548.
6. พงษ์ธร แซ่ฮุย และชาคริต สิริสิงห์, การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล ความทนทานต่อความร้อนและความต้านทานโอโซนของยางผสม NR/EPDM, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2548.

7. นพิตา หิฎฐีระนันท์ และคณะ, วัลคาไนเซชันของยางผสมยาง อีพิตีเอ็มและยางธรรมชาติโดยใช้เปอร์ออกไซด์เป็นสารวัลคาไนเซชันร่วม, การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17, 2550.
8. IEC 60947-3, "Low-Voltage Switchgear and Control Gear – Part 3: Switches, Disconnectors, Switch-Disconnectors and Fuse-Combination Units", Edition 2.2, 2005.
9. A.B.J. Reece and T.W. Preston, "Finite Element Methods in Electrical Power Engineering", Oxford University Press Inc., New York, 2000.

ภาคผนวก

ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย
RESEARCH AND DEVELOPMENT CENTRE FOR THAI RUBBER INDUSTRY



เลขที่ : 1-258-2553

รายงานผลการทดสอบ

ออกให้เมื่อ 8 กุมภาพันธ์ 2553
ออกให้แก่ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหลวง
อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

ผลการทดสอบ

1. ผสมยางและสารเคมีด้วยเครื่องผสมแบบเปิด (Two roll mill, LABTECH) ที่อุณหภูมิ 50 °C

ขั้นตอนในการผสม

- NR+EPDM 3 นาที
- ZnO+Stearic acid 2 นาที
- เขม่าดำ (N330) 1 นาที
- Sulfur, TBBS และ TMTD 4 นาที

2. วัดลักษณะการคงรูปด้วย Oscillating Disk Rheometer (MONSANTO 100S)

ที่อุณหภูมิ 150 °C

3. เตรียมชิ้นงานตัวอย่างสำหรับทดสอบโดยการนำยางคอมพาวด์ไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก (Compression moulding machine) ที่อุณหภูมิ 150 °C

4. ทดสอบสมบัติการรับแรงดึงด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (INSTRON 5569) ตามมาตรฐาน ASTM D412 (Die C)

5. ทดสอบความแข็ง (Hardness) ด้วยเครื่อง Shore A Hardness Tester (WALLACE)



1/2

ใบรายงานผล (REPORT)

F. 004 REV.2/2551



ผลการทดสอบ :

รายการทดสอบ	ผลการทดสอบ
1. ลักษณะการคงรูป - Scorch time, ts2 (min) - Optimum cure time, tc90 (min)	9.22 ± 0.09 13.38 ± 0.71
2. สมบัติการรับแรงดึง - Tensile strength (MPa) - Elongation at break (%) - 100% Modulus (MPa) - 300% Modulus (MPa)	8.18 ± 0.59 493 ± 11 0.94 ± 0.01 2.35 ± 0.02
3. ค่าความแข็ง (shore A)	45.9 ± 0.2

ทดสอบโดย

อรรรรณ

สุภาพพรชัย

รายงานโดย

อรรรรณ

สุภาพพรชัย

(อรรรรณ สุภาพพรชัย)

(อรรรรณ สุภาพพรชัย)



รับรองผลการทดสอบ

อจฉฉฉฉ

อจฉฉฉฉ

รับรองผลการทดสอบ

(อจฉฉฉฉ พูนสุข)

(ดร. ชูเดช ติประเสริฐกุล)

- หมายเหตุ 1. ศูนย์ฯ ไม่อนุญาตให้มีการแก้ไขเพิ่มเติม ตัดต่อ เปลี่ยนแปลงรายงานหรือส่วนใดส่วนหนึ่งของรายงาน เว้นแต่จะได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากศูนย์ฯ ก่อน
2. ศูนย์ฯ ไม่รับผิดชอบต่อความเสียหายใดๆ ที่อาจเกิดขึ้นไม่ว่าโดยทางตรงหรือทางอ้อม ในกรณีที่มีการนำข้อมูล ผลการวิเคราะห์ข้อสรุปหรือข้อเสนอแนะในเอกสารฉบับนี้ไปเพื่อใช้ในการออกแบบ การผลิต หรือจุดประสงค์อื่นใดก็ตาม
3. ผลการทดสอบนี้เป็นจริงเฉพาะกับชิ้นงานที่นำมาทดสอบเท่านั้น

2/2

ใบรายงานผล (REPORT)

F. 004 REV.2/2551



ที่ วท 0307/ 14570

ถึง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

กรมวิทยาศาสตร์บริการขอส่งรายงานผลการตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบตัวอย่าง แผ่นยางผสม (NR+EPDM) NR:EPDM (60:40) หมายเลขปฏิบัติการ L53/06345.1 จำนวน 1 ตัวอย่าง ตามคำร้อง เลขรับ L53/06345 วันที่ 4 สิงหาคม 2553

พร้อมนี้ ได้แนบผลการตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ มาเพื่อทราบ



โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม

โทร. 0 2201 7130

โทรสาร 0 2201 7127

E-mail : physics@dss.go.th



รายงานการทดสอบ



TESTING
No. 0252

ชื่อวัสดุตัวอย่าง

เครื่องหมาย / ตรา

หมายเลขปฏิบัติการ

แผ่นยางผสม (NR+HDPE) NR:EPDM
(60:40)

-

L53/06345.1

ผลการทดสอบ

สภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว

ชั้นทดสอบที่	ความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว Ω	สภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว Ω/square
1	0.38×10^{15}	0.7×10^{16}
2	0.65×10^{15}	1.2×10^{16}
3	0.59×10^{15}	1.1×10^{16}
4	1.16×10^{15}	2.2×10^{16}

สภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร

ชั้นทดสอบที่	ความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร Ω	ความหนา cm	สภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร $\Omega\text{-cm}$
1	2.0×10^{13}	0.23	1.7×10^{15}
2	1.5×10^{13}	0.23	1.2×10^{15}
3	1.6×10^{13}	0.23	1.4×10^{15}
4	1.6×10^{13}	0.23	1.3×10^{15}

รายงานนี้รับรองเฉพาะวัสดุตัวอย่างที่ได้ทดสอบ/สอบเทียบเท่านั้น ไม่รับรองวัตถุหรือสินค้าที่ใช้จริงขณะในการโฆษณาหรืออ้างถึง ห้ามคัดถ่ายใบรับรองหรือรายงานผลแต่เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตจากกรมวิทยาศาสตร์บริการเป็นลายลักษณ์อักษร

กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ถนนพระรามที่ 6 ราชเทวี กรุงเทพฯ 10400 ประเทศไทย

หน้า 2/3

หมายเลขปฏิบัติการ L53/06345.1

ความทนทานต่อแรงดันไฟฟ้า *

ขั้นตอนที่	แรงดันไฟฟ้าเสียดสภาพล้มปลิ้น kV	ความหนา mm	ความทนทานต่อแรงดันไฟฟ้า kV/mm
1	42.8	2.29	18.7
2	41.5	2.28	18.2
3	43.4	2.34	18.5
4	44.5	2.27	19.6

ชื่อผู้ให้บริการ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ที่อยู่ผู้ให้บริการ 39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลอง 6 อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี

ลักษณะตัวอย่าง แผ่นยางสีดำ จำนวน 12 แผ่น

วันที่ทดสอบ 16 - 17 สิงหาคม 2553

วิธีทดสอบ สภาพต้านทานไฟฟ้า : ASTM D 257 และ ความทนทานต่อแรงดันไฟฟ้า : ASTM D 149

หมายเหตุ 1. การทดสอบสภาพต้านทานไฟฟ้า

1.1 ห้องทดสอบที่ อุณหภูมิ (23 ± 2) องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ (50 ± 5)

1.2 ขั้วอิเล็กโทรดเป็นชนิดขั้วโลหะเรียบ (HP 16008A) เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร

1.3 วิธีการวัดเป็นวิธีโวลต์มิเตอร์-แอมป์มิเตอร์ ที่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (500 ± 5) โวลต์

1.4 เวลาป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 60 วินาที

1.5 การรายงานผลค่าที่วัดเป็นค่าคงที่

2. การทดสอบความทนทานต่อแรงดันไฟฟ้า

2.1 ทดสอบชิ้นตัวอย่างในน้ำมัน ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 5) องศาเซลเซียส

2.2 เครื่องทดสอบ High voltage breakdown tester 100 kV ด้วยพิทช์กำลังงาน 5 kVA และมีมอเตอร์ควบคุมการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าด้วยอัตรา 500 V/sec.

2.3 ขั้วทดสอบแบบ Opposing cylinders เส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว ลบขอบโค้งรัศมี 0.25 นิ้ว

3. เครื่องหมาย “*” หมายถึง รายการทดสอบอยู่นอกขอบข่ายการรองรับรองความสามารถห้องปฏิบัติการตามมาตรฐาน ISO/IEC 17025-2548

ผู้รับรอง

(นายสรรค์ จิตรไคร์ครุญ)

นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการพิเศษ

ผู้รายงาน

(นายสุรินทร์ อรรถจักร์คำ)

นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการพิเศษ

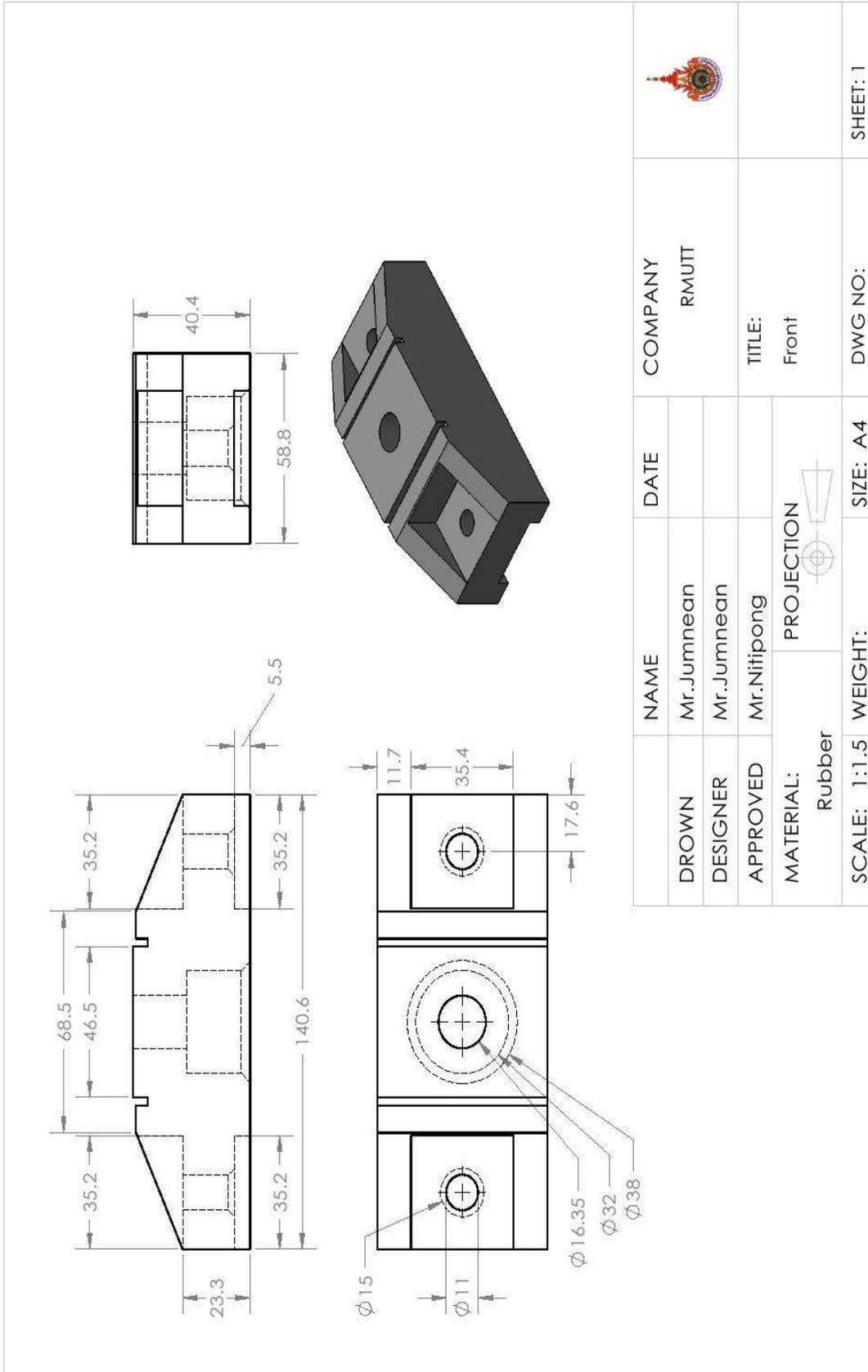
รายงานนี้รับรองเฉพาะวัตถุตัวอย่างที่ได้ทดสอบ/สอบเทียบเท่านั้น ไม่รับรองวัตถุหรือสินค้าที่ใช้รายงานนี้ในการโฆษณาหรืออ้างถึง

ห้ามคัดถ่ายใบรับรองหรือรายงานผลแต่เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตจากกรมวิทยาศาสตร์บริการเป็นลายลักษณ์อักษร

กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

หน้า 3/3

ถนนพระรามที่ 6 ราชเทวี กรุงเทพฯ 10400 ประเทศไทย



การนำเสนอโปสเตอร์งานวิจัย

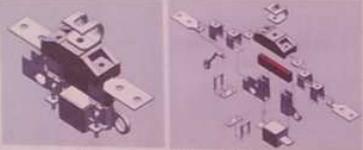
งาน ECTI-Conference on Application Research and Development 2012

การพัฒนามาตรฐานสำหรับฟิวส์สวิตช์แรงต่ำจากยางธรรมชาติ

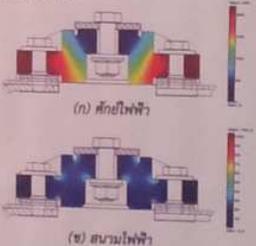
นิติพรศักดิ์ ปานภักดิ์, สมชาย เข็มขุนทูล และ กฤชนันท์ ภูมิภักดิ์ทิพย์
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ECTI - Conference Application Research Development 2012

ฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ (LT Fuse Switch) เป็นอุปกรณ์ป้องกันในระบบจำหน่ายแรงต่ำ 220V/380V ทำหน้าที่ตัดวงจรเมื่อเกิดการลัดวงจร ต้นแรงต่ำและยังทำหน้าที่เป็นสวิตช์สำหรับเปิดและปิดวงจร ฟิวส์สวิตช์แรงต่ำในปัจจุบัน อนุพันธ์ใช้ร่องรับขั้วต่อสายและฟิวส์ทำจาก กระเบื้องหรือปอร์ซเลนแบบทั่วไปที่มีโอกาสเกิดการชำรุดเสียหายเนื่องจากการใช้งาน การขบข้าย และยังมีน้ำหนักมาก งานวิจัยนี้ นำเสนอการ พัฒนามาตรฐานสำหรับฟิวส์สวิตช์แรงต่ำจากยางธรรมชาติ วัสดุฉนวนที่ใช้เป็นยางธรรมชาติผสมยางอีพทีดีเอ็ม (Ethylene-Propylene Diene Rubber, EPDM) ในอัตราส่วนยางธรรมชาติ 60 เปอร์เซ็นต์และยางอีพทีดีเอ็ม 40 เปอร์เซ็นต์ วัสดุฉนวนที่ใช้ผ่านการทดสอบสมบัติทาง ไฟฟ้าและทางกลตามมาตรฐาน ASTM D412, ASTM D257, ASTM D149 และผ่านการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ความถี่กำลัง การทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น การทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง



รูปที่ 1 แบบจำลอง 3 มิติของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ

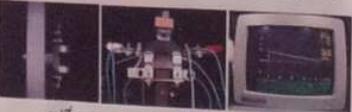


(ก) สนามไฟฟ้า
(ข) สนามแม่เหล็ก

รูปที่ 1 แสดงถึงแบบจำลองสามมิติของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ แบบจำลองดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในการจำลองผลด้วย คอมพิวเตอร์ และใช้ในการทำแม่พิมพ์โลหะสำหรับการขึ้นรูป อนุพันธ์ไฟฟ้าด้วยวิธีการฉีดด้วยความร้อน สำหรับการทดสอบ คุณสมบัติของวัสดุฉนวน ประกอบด้วย ความแข็ง (Hardness) สมบัติการรับแรงดึง (Tensile Strength Test) ความต้านทานเชิง ผิว (Surface Resistivity) ความต้านทานเชิงปริมาตร (Volume Resistivity) ความคงทนของไดอิเล็กตริก (Dielectric Strength) ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติของวัสดุฉนวนยางธรรมชาติผสมยางอี พทีดีเอ็มอัตราส่วน 60:40

การวัด	ค่า
ความแข็งแรงดึง (Tensile Strength)	47.9 ± 0.20 (N/mm ²)
ความยืดหยุ่นเมื่อขาด (Elongation at Break)	6.14 ± 0.14 (%)
ความต้านทานเชิงผิว (Surface Resistivity)	Resistance: 9.89 × 10 ¹² Ω
	Resistivity: 1.3 × 10 ¹⁷ Ω·cm
ความต้านทานเชิงปริมาตร (Volume Resistivity)	Resistance: 1.4 × 10 ¹² Ω
	Resistivity: 1.4 × 10 ¹⁷ Ω·cm
ความคงทนของไดอิเล็กตริก (Dielectric Strength)	18.123 kV/mm

สำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ฟิวส์สวิตช์จะทำการทดสอบความ คงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่กำลัง 2.2kV_{rms} การทดสอบ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่กระแส 400A, 50Hz การทดสอบความคงทนต่อ แรงดันอินทูลส์ค่า 1.2/50 μs, 14.8kV โดยผลการทดสอบที่ได้ ฟิวส์ สวิตช์สามารถผ่านการทดสอบที่สามรายการ



รูปที่ 3 การทดสอบฟิวส์สวิตช์ในห้องปฏิบัติการ

http://www.en.mut.tu.ac.th