



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการพัฒนาฉนวนหุ้มข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีจากยางพารา
The Development of Bimetal PG-Clamp Insulator from Para Rubber

โดย นายนิติพงศ์ ปานกลาง และคณะ

ธันวาคม พ.ศ. 2551

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การการพัฒนาฉนวนหุ้มขั้วรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีจากยางพารา
The Development of Bimetal PG-Clamp Insulator from Para Rubber

คณะผู้วิจัย

1. นายนิติพงศ์ ปานกลาง
2. นายสุพจน์ สิงห์ระสมร
3. นายพุฒพงษ์ เรืองพิศาล

สังกัด

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปรายงานสำหรับผู้บริหาร

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การพัฒนานวนหุ้มข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีจากยางพารา
(ภาษาอังกฤษ) The Development of Bimetal PG-Clamp Insulator from Para Rubber

ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานสังกัด ที่อยู่

ชื่อ-สกุล นายนิติพงษ์ ปานกลาง
หน่วยงาน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ที่อยู่ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110
โทรศัพท์/โทรสาร 0 2549 3429/0 2549 3568
E-mail p.nitipong@gmail.com

ที่ปรึกษาโครงการวิจัย

ชื่อ-สกุล นายสุพจน์ สิงห์วีระสมร
ที่อยู่ 20/5 หมู่ 10 ต.ลาดสวาย อ.ลำลูกกา จ.ปทุมธานี 12150
โทรศัพท์/โทรสาร 0 2549 7705/0 2549 7704

นักศึกษา/ผู้ร่วมทำวิจัย

ชื่อ-สกุล นายภูมิพงษ์ เรืองพิศาล
โทรศัพท์/โทรสาร 0 8 6419 2099

ระยะเวลาดำเนินการ 9 เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 กันยายน 2550 ถึงวันที่ 31 พฤษภาคม 2551

ปัญหาที่ทำวิจัยและความสำคัญ

ปัจจุบันการต่อสายไฟฟ้าในระบบจำหน่ายที่ระดับแรงดัน 220/380V ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จากระบบสายจำหน่ายไปยังมิเตอร์รับไฟของผู้ใช้ตามที่อยู่อาศัย ส่วนใหญ่จะใช้ข้อรัดสายไฟ (Clamp) ที่ทำจากโลหะหรืออลูมิเนียม โดยปกติการต่อสาย ณ จุดดังกล่าวมักไม่มีฉนวนหุ้มตรงจุดต่อ ทำให้เมื่อใช้งานไปนาน ๆ บริเวณจุดที่เป็นโลหะ หรือตัวข้อรัดสายไฟที่เป็นอลูมิเนียมเอง เมื่อโดนความชื้นจะเกิดสนิมขึ้น ส่งผลต่อการนำไฟฟ้าของจุดต่อสายแย่ง สายไฟฟ้าบริเวณจุดชำรุดหรือต่อขาดเนื่องจากการกัดกร่อน หรือแม้แต่ว่าจุดต่อเกิดหลุดและหลวม ทำให้ผู้ใช้ไฟฟ้าไม่สามารถใช้ไฟฟ้าได้ อีกทั้งยังเป็นภาระหน้าที่ทำให้การไฟฟ้าต้องเข้ามาดูแลแก้ไขเมื่อเกิดปัญหาขึ้น ทำให้สิ้นเปลืองงบประมาณและเวลาในการบำรุงรักษา

โครงการวิจัยนี้จึงจะพัฒนานวนหุ้มข้อรัดสายไฟที่ใช้สำหรับการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าจากระบบสายจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคไปยังมิเตอร์รับไฟของผู้ใช้ตามที่อยู่อาศัย เพื่อช่วยในการป้องกันปัญหาที่เกิดจากความชื้น การลัดวงจร ที่เกิดขึ้นกับจุดต่อดังกล่าว โดยฉนวนหุ้มข้อรัดสายไฟฟ้าจะผลิตจากยางพาราที่มีส่วนผสมที่เหมาะสม และผ่านการทดสอบการใช้งานและวิเคราะห์ข้อมูล ผลสำเร็จจากโครงการวิจัยนี้ จะทำให้เราได้ฉนวนหุ้มข้อรัดสายไฟฟ้าจากยางพาราที่มีประสิทธิภาพ สามารถนำไปใช้กับข้อรัดสายไฟในระบบจำหน่าย 3 เฟส 4 สายที่ระดับแรงดัน 220/380V นอกจากนั้น ยังเป็นการช่วยส่งเสริมการใช้วัตถุดิบทางการเกษตร เพิ่มมูลค่าผลผลิตทางการเกษตร และสนับสนุนอุตสาหกรรมการแปรรูปยางพาราภายในประเทศอีกด้วย

วัตถุประสงค์

พัฒนานวนหุ้มข้อรัดสายไฟฟ้าจากยางพาราเพื่อใช้กับข้อรัดสายไฟฟ้าในระบบจำหน่าย 3 เฟส 4 สายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ผลการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบนวนสำหรับข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจี 2 สลัก สำหรับใช้ในการต่อแยกสายไฟฟ้าขนาด 25 – 95 ตร.มม การต่อสายไฟฟ้าในระบบจำหน่ายแรงต่ำ 220/380V ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค นิยมใช้ข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจี(Parallel Groove Clamp: PG Clamp) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การต่อแยกสายไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายไปยังมิเตอร์รับไฟของผู้ใช้ไฟฟ้าตามบ้านพักอาศัย การต่อสายในลักษณะดังกล่าว บริเวณจุดต่อจะไม่มีฉนวนป้องกันหรือใช้เพียงเทปพันสายไฟฟ้าพันทับ ณ จุดต่อสายเท่านั้น ข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีชนิดนี้ มีลักษณะเป็นอะลูมิเนียม 2 ชั้นมาประกบกัน โดยมีสลักเกลียวโลหะ 2 ตัวเป็นตัวยึดเพื่อบีบอัดสายไฟฟ้าที่อยู่ระหว่างชั้นอะลูมิเนียมทั้งสอง

วัสดุที่ใช้ทำนวนเป็นยางธรรมชาติผสมยาง ในอัตราส่วน 60:40 เพื่อเพิ่มคุณสมบัติความทนทานต่อสภาพแวดล้อมให้กับนวน สูตรยางที่ใช้ทำนวนประกอบด้วย ยางธรรมชาติ (STR 5L) 60.0 phr, ยางเอทริลีนโพรพิลีนไดอีนโมโนเมอร์(EPDM) 40.0 phr, ซิงก์ออกไซด์(ZnO) 5.0 phr, กรดสเตียริก(Stearic acid) 2.0 phr, ไดโซโคลเฮกซิลเบนโซไทโอะโซลซัลฟิโนไมด์(TBBS) 1.0 phr, เทตระเมทิลไทูแรมไดซัลไฟด์(TMTD) 0.2 phr, กำมะถัน(Sulphur : S) 1.8 phr, และผงเขม่าดำ(Carbon-black:CB N330) 30.0 phr

การเตรียมยางคอมพาวด์จากสูตรยางที่กำหนด ทำโดยนำวัตถุดิบและสารเคมีมาผสมโดยใช้เครื่องผสมระบบปิด(Brabender) ที่อุณหภูมิห้องผสมเท่ากับ 60°C ความเร็วรอบในการหมุนของโรเตอร์ 40 รอบ/นาที การผสมจะเริ่มจากผสมยางธรรมชาติกับยางอีทีดีเอ็มเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นจึงเติมซิงก์ออกไซด์และกรดสเตียริก กวนส่วนผสมต่อประมาณ 3 นาทีจึงเติมผงเขม่าดำ จากนั้นนำยางที่ได้จากเครื่องผสมระบบปิดไปเติมกำมะถัน, เทตระเมทิลไทูแรมไดซัลไฟด์ และไดโซโคลเฮกซิลเบนโซไทโอะโซลซัลฟิโนไมด์ ด้วยเครื่องบดผสม 2 ลูกกลิ้ง บดส่วนผสมต่างๆ ให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันเป็นเวลาประมาณ 5 นาที จะได้ยางคอมพาวด์ตามสูตรที่ต้องการ จากนั้นจึงนำยางคอมพาวด์ไปหาวะระยะเวลาสกอร์ช(Scorch Time, ts_2) และระยะเวลาในการคงรูปของยางคอมพาวด์ที่เหมาะสมด้วยเครื่อง Moving Die Rheometer(TECHPRO, Rheotech MD+) ที่อุณหภูมิ 155°C แล้วจึงนำยางคอมพาวด์ไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก(Compression moulding machine) ที่อุณหภูมิ 155°C และใช้เวลาในการวัลคาไนซ์ 12.36 ± 0.57 นาที เพื่อทำเป็นชิ้นยางคงรูปขนาด $200 \times 200 \times 2.5$ มิลลิเมตร สำหรับการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ จากการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางไฟฟ้าของยางคงรูป พบว่า ยางคงรูปดังกล่าวมีค่าความแข็ง(Shore A) ก่อนและหลังบ่มแรงเท่ากับ 62.2 ± 0.3 ชอร์เอและ 65.9 ± 0.3 ชอร์เอ ตามลำดับ ก่อนบ่มแรงสามารถรับแรงดึงได้เท่ากับ 10.09 ± 0.58 MPa และหลังจากบ่มแรงสามารถรับแรงดึงได้เท่ากับ 7.77 ± 1.20 MPa ยางคงรูปมีความต้านทานเชิงปริมาตรสูงสุดเท่ากับ $1.97 \times 10^9 \Omega\text{-cm}$ ความต้านทานเชิงผิวเท่ากับ $0.56 \times 10^{10} \Omega/\text{square}$ และมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่กำลังเท่ากับ 2 kV/mm

การออกแบบนวนสำหรับข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีได้นำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบ และการวิเคราะห์ทางไฟฟ้า เพื่อให้การออกแบบสะดวกรวดเร็ว มีความยืดหยุ่นในการปรับเปลี่ยนหรือปรับปรุงรูปแบบของนวน รวมถึงเพื่อความสะดวกในการจัดทำแม่พิมพ์เพื่อขึ้นรูปชิ้นงานจริง การออกแบบและผลิตชิ้นงานตัวอย่างของนวนข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจี จะเริ่มจากการวัดขนาดและมิติของข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจี 2 สลัก จากนั้นนำขนาดและมิติของข้อรัดสายไฟฟ้าไปวาดแบบพิมพ์เขียว 2 มิติบนคอมพิวเตอร์และสร้างชิ้นงานเสมือนจริงด้วยแบบจำลอง 3 มิติเพื่อดูลักษณะโดยรวมของนวนที่ออกแบบเสร็จเรียบร้อยแล้ว นวนข้อรัด

สายไฟฟ้าที่ออกแบบประกอบด้วย ฉนวนชั้นบนและฉนวนชั้นล่างที่สามารถประกบยึดติดเข้าหากันได้ การประกบเข้าหากันจะยึดติดด้วยสกรูสแตนเลสทั้งหมด 6 ตัว โดยฉนวนชั้นบน และชั้นล่างมีรูเจาะสำหรับขันสกรูทะลุถึงกัน บริเวณส่วนปลายทั้งสองของฉนวนมีช่องสำหรับรองรับสายไฟฟ้าทั้งสองด้านลักษณะเป็นครึ่งวงกลมประกบเข้าหากัน มีเส้นรัศมีที่แตกต่างกันสามระดับ โดยในการใช้งานสามารถเนียนตัดให้มีขนาดเหมาะสมกับสายไฟฟ้าได้ ฉนวนชั้นบนและชั้นล่างจะมีบอลลูนกึ่งสูงขึ้นมา สำหรับป้องกันการเคลื่อนตัว ป้องกันความชื้นและองน้ำเข้าสู่ภายใน การประกอบฉนวนชั้นบนและฉนวนชั้นล่างเข้ากับข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจี ทำโดยการประกบด้านล่างและบนเข้าหากัน ข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีจะถูกห่อหุ้มอยู่ภายในและสายไฟฟ้าจะตอ่ยื่นออกมาผ่านช่องรองรับสายไฟฟ้า งานวิจัยนี้ ได้รับความอนุเคราะห์จากภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ในการจัดทำแม่พิมพ์โลหะ การขึ้นรูปฉนวนทั้งสองชั้นใช้วิธีการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แบบกดอัดด้วยความร้อน

ในส่วนของการจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ ได้นำแบบพิมพ์เขียว 2 มิติและ 3 มิติไปใช้ร่วมกับโปรแกรมประยุกต์ไฟในเอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าบริเวณฉนวน ผลการคำนวณตามเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนด พบว่า ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดบริเวณข้อรัดสายไฟฟ้าที่อยู่ใกล้กับฉนวนมีค่าเท่ากับ 29.9 V/mm โดยมีค่าต่ำกว่าค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของยางคงรูปที่ทำการทดสอบคือ 2 kV/mm หรือ 2000 V/mm ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นดังกล่าว จึงไม่สามารถทำให้ฉนวนเกิดความเสียหายขึ้นได้ จึงยืนยันได้ว่าฉนวนที่ออกแบบและวัสดุฉนวนที่เลือกใช้สามารถทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้เป็นอย่างดี

สุดท้าย จากฉนวนข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีที่ผลิตเป็นชิ้นงานตัวอย่าง ได้นำไปทดลองติดตั้งใช้งานจริงกับข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีในระบบจำหน่ายแรงต่ำ 220/380V ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ณ หมู่บ้านชมฟ้า-วารังกุล รังสิต คลอง 2 โดยได้รับความอนุเคราะห์จากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคอำเภอธัญบุรี และโครงการพัฒนาระบบบริหารจัดการหม้อแปลงและระบบจำหน่ายแรงต่ำแบบอัตโนมัติ

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้พัฒนานวนสำหรับข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจี 2 สลักขนาด 25 – 95 ตร.มม ซึ่งเป็นข้อรัดสายไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่ายแรงต่ำ 220/380V ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีดังกล่าว ใช้สำหรับต่อแยกสายไฟจากระบบจำหน่ายไปยังมิเตอร์ผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละราย โดยฉนวนสำหรับข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีที่พัฒนาขึ้นจะช่วยให้การต่อสายไฟมีความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน ป้องกันการเกิดการลัดวงจรอันไม่พึงประสงค์ รวมถึงป้องกันการชำรุดเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับข้อรัดสายไฟฟ้าอันเนื่องมาจากความชื้นและละอองน้ำได้

วัสดุที่นำมาใช้ทำฉนวนเป็นยางพาราผสมยางอีพีดีเอ็มในอัตราส่วน 60:40 นั่นคือประกอบด้วยยางพารา 60 phr และยางอีพีดีเอ็ม 40 phr จากการทดสอบคุณสมบัติยางคงรูปที่นำมาทำฉนวน พบว่า ยางคงรูปดังกล่าว มีค่าความแข็ง(Shore A) ก่อนและหลังบ่มแรงเท่ากับ 62.2 ± 0.3 ชอร์เอและ 65.9 ± 0.3 ชอร์เอตามลำดับ ก่อนบ่มแรงสามารถรับแรงดึงได้เท่ากับ $10.09 \pm 0.58 \text{ MPa}$ และหลังจากบ่มแรงสามารถรับแรงดึงได้เท่ากับ $7.77 \pm 1.20 \text{ MPa}$ ยางคงรูปมีความต้านทานเชิงปริมาตรสูงสุดเท่ากับ $1.97 \times 10^9 \text{ } \Omega\text{-cm}$ ความต้านทานเชิงผิวเท่ากับ $0.56 \times 10^{10} \text{ } \Omega\text{/square}$ และมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่กำลังเท่ากับ 2 kV/mm

ฉนวนข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีที่ได้ออกแบบมีลักษณะเป็นฉนวนสองชั้นที่สามารถประกบยึดติดเข้าหากันได้ การประกบเข้าหากันจะยึดติดด้วยสกรูสแตนเลสผ่านรูเจาะที่ทะลุถึงกันระหว่างฉนวนทั้งสองชั้น บริเวณส่วนปลายทั้งสองของฉนวนมีช่องสำหรับรองรับสายไฟฟ้าทั้งสองด้าน ลักษณะเป็นครึ่งวงกลมประกบ

เข้าหากันและมีเส้นรัศมีที่แตกต่างกันสามระดับ ฉนวนชั้นบนและชั้นล่างจะมีบอลลูนยกสูงขึ้นมาสำหรับป้องกันการเคลื่อนตัว ป้องกันความชื้นและองน้ำ การประกอบฉนวนชั้นบนและฉนวนชั้นล่างเข้ากับข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจี ทำโดยการประกบด้านล่างและบนเข้าหากัน ข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีจะถูกห่อหุ้มอยู่ภายในและสายไฟฟ้าจะต่อยื่นออกมาผ่านช่องรองรับสายไฟฟ้าที่ถูกตัดให้มีขนาดเหมาะสมกับสายไฟฟ้า

ข้อเสนอแนะ

- ควรทำการทดสอบการใช้งานจริงในระยะยาว ณ ระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าเพิ่มเติม เพื่อหาข้อบกพร่องของฉนวนที่ทำการออกแบบ และนำมาปรับปรุงสูตรยาง รูปร่าง ให้มีความเหมาะสมยิ่งขึ้น
- ยางธรรมชาติผสมยางอีพิตีเอ็มมีค่าความแข็งที่จำกัดจึงทำให้การออกแบบระบบล้อยของฉนวนเป็นไปได้ยาก ดังนั้นควรมีการวิจัยและพัฒนาเพื่อปรับปรุงสูตรยางให้วัสดุมีความแข็งเพิ่มขึ้นแต่ไม่แตกหักง่าย หรือปรับปรุงรูปแบบของฉนวน เพื่อให้ระบบล้อยของฉนวนสามารถยึดติดด้วยตัวฉนวนเองไม่จำเป็นต้องใช้นอตหรือสกรูยึดติดแต่อย่างใด
- การนำฉนวนไปใช้กับระดับแรงดันสูงขึ้น(มากกว่า 1kV) อาจจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนสูตรยางและสารตัวเติมบางตัว เพื่อเพิ่มคุณสมบัติความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้น

ผลงานวิชาการที่เกิดขึ้น

- บทความวิชาการเรื่อง “การออกแบบฉนวนสำหรับข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีจากยางธรรมชาติ” นำเสนอในงานการประชุมเครือข่ายวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 1, 19 – 21 พฤศจิกายน 2551.

ผลงานวิชาการที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

- สิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร “ฉนวนหุ้มข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีจากยางพารา”

บทคัดย่อ

ข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการต่อแยกสายไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายแรงต่ำของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค(กฟภ.)ไปยังมิเตอร์ของผู้ใช้ไฟฟ้าตามบ้านพักอาศัย ซึ่งในปัจจุบัน บริเวณจุดต่อดังกล่าว มักไม่มีการหุ้มฉนวนแต่อย่างใดหรือจะมีก็เพียงแต่การใช้เทปพันสายไฟพันทับไว้เท่านั้น งานวิจัยนี้จึงเป็นการออกแบบและพัฒนานวนสำหรับข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจี 2 สลักขนาด 25 – 95 ตร.มม อันเป็นข้อรัดสายไฟฟ้าที่นิยมใช้มากที่สุดในระบบจำหน่ายของ กฟภ. ฉนวนที่ออกแบบมีลักษณะเป็นฉนวนสองชั้นที่สามารถประกบยึดติดเข้าหากันด้วยสกรูสแตนเลสผ่านรูเจาะที่ทะลุถึงกันระหว่างฉนวนทั้งสองชั้น ข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีจะถูกห่อหุ้มอยู่ภายใน และสายไฟฟ้าจะต่อยื่นออกมาภายนอกโดยผ่านช่องรองรับสายไฟฟ้าลักษณะเป็นครึ่งวงกลมประกบเข้าหากันและมีเส้นรัศมีที่แตกต่างกันสามระดับที่สามารถัดัดเงื่อนไขให้มีขนาดพอเหมาะกับขนาดของสายไฟฟ้า วัสดุที่นำมาใช้ทำฉนวนเป็นยางพาราผสมยางอีพียีเอ็มในอัตราส่วนยางพารา 60% และยางอีพียีเอ็ม 40% เพื่อเพิ่มคุณสมบัติความทนทานต่อสภาพแวดล้อมให้กับฉนวน จากการทดสอบคุณสมบัติยางคงรูปที่นำมาทำฉนวน พบว่า ยางคงรูปดังกล่าวมีค่าความแข็ง(Shore A) ก่อนและหลังบ่มแรงเท่ากับ 62.2 ± 0.3 ซอร์เอและ 65.9 ± 0.3 ซอร์เอ ตามลำดับ ก่อนบ่มแรงสามารถรับแรงดึงได้เท่ากับ 10.09 ± 0.58 MPa และหลังจากบ่มแรงสามารถรับแรงดึงได้เท่ากับ 7.77 ± 1.20 MPa ยางคงรูปมีความต้านทานเชิงปริมาตรสูงสุดเท่ากับ $1.97 \times 10^9 \Omega\text{-cm}$ ความต้านทานเชิงผิวเท่ากับ $0.56 \times 10^{10} \Omega/\text{square}$ และมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่กำลังเท่ากับ 2 kV/mm โดยทั้งนี้ ฉนวนสำหรับข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีที่พัฒนาขึ้นจะช่วยให้การต่อสายไฟมีความปลอดภัย ป้องกันการลัดวงจรอันไม่พึงประสงค์ที่อาจจะเกิดขึ้น ป้องกันการชำรุดเสียหายกับข้อรัดสายไฟฟ้าอันเนื่องจากความชื้นและละอองน้ำ รวมถึงช่วยให้การปฏิบัติงานของพนักงาน กฟภ. ในการซ่อมบำรุงมีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น

Abstract

PG-Clamp is an equipment used as a tap-off the cable conductor from Low voltage management system of Provincial Electricity Authority (PEA) to the household's meter. In the meantime, no electrical insulator has been applied, only electrical insulation tape is normally used at the connection point. This research is to design and develop the electrical insulator for 2 blot PG-Clamp, size $25 - 95 \text{ mm}^2$, which is the most commonly used type in the Distribution system of PEA. The design of electrical insulator for PG-Clamp is composed of 2 insulation components; upper and lower bodies which can be sandwiched using stainless screw bolt passing through the blots made between upper and lower bodies. PG-Clamp can be securely kept inside and the conductor cable will be available for usage passing through the ridged grooves providing 3 different radius adjustment which can be adjusted to suit the cable size. The Para rubber and EDPM rubber are used as an insulation material. The ratio of Para rubber to EDPM rubber is 60:40 to increase the weather resistance to the electrical insulator over atmospheric pollution. From the characteristic tests of vulcanized rubber used for making electrical insulator, results that the vulcanized rubber has hardness properties before and after aging process as 62.2 ± 0.3 Shore A and 65.9 ± 0.3 Shore A respectively. The vulcanized rubber sample has ultimate tensile strength as 10.09 ± 0.58 Mpa before aging process and 7.77 ± 1.20 MPa after aging process. The maximum volume resistivity of vulcanized rubber sample is $1.97 \times 10^9 \Omega\text{-cm}$, the surface resistivity is $0.56 \times 10^{10} \Omega/\text{square}$ and the power frequency withstand voltage is 2 kV/mm. Therefore the development of PG-Clamp insulator may be useful for the security purpose when connect the cable, prevent the intention of short circuit and damage from humidity and water spray. And also benefit the security efficiency of maintenance operation by the PEA operator.

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทสรุปรายงานสำหรับผู้บริหาร	I
บทคัดย่อ	V
Abstract	VI
1. ความสำคัญและที่มาของการวิจัย	1
2. วัตถุประสงค์	1
3. ทฤษฎีและแนวความคิดในการวิจัย	1
3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	1
3.2 ข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจี	2
3.3 คุณสมบัติของข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจี	4
3.4 ปัญหาที่เกิดขึ้นกับข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจี	6
4. การออกแบบจนวนข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจี	8
4.1 สูตรร่างและการเตรียมชิ้นงานทดสอบ	8
4.2 การทดสอบและผลการทดสอบคุณสมบัติ	9
4.3 การออกแบบและทดสอบการใช้งานจนวน	13
5. สรุป	20
6. ข้อเสนอแนะ	20
7. เอกสารอ้างอิง	20
ภาคผนวก	22

1. ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

นับตั้งแต่ปี 2534 เป็นต้นมาจนถึงปัจจุบัน ประเทศไทยได้ก้าวขึ้นเป็นผู้ผลิตและส่งออกยางพาราเป็นอันดับ 1 ของโลก จากการสำรวจเมื่อปี 2537 พบว่า มีพื้นที่ปลูกยางพาราประมาณ 11.9 ล้านไร่ ผลิตยางได้ 1.72 ล้านตัน สามารถส่งออกขายยังต่างประเทศคิดเป็นมูลค่า 41,352 ล้านบาท โดยส่งออกในรูปแบบน้ำยางข้น (Concentrate Latex) ยางแผ่นรมควัน (Ribbed Smoke Sheet : RSS) ยางอบแห้ง (Air Dried Sheet : ADS) และยางแท่ง (Standard Thai Rubber : STR) โดยที่ ยางพาราได้ถูกนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้หลากหลายรูปแบบ

ด้วยเหตุนี้ ทางคณะวิจัยจึงมีแนวความคิดที่จะพัฒนานวนหุ้มข้อรัดสายไฟฟ้าที่ทำจากยางพารา เนื่องจากในปัจจุบัน การต่อสายไฟฟ้าในระบบจำหน่ายที่ระดับแรงดัน 220/380V ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจากระบบสายจำหน่ายไปยังมิเตอร์รับไฟของผู้ใช้ตามที่อยู่อาศัย ส่วนใหญ่จะใช้ข้อรัดสายไฟ (Clamp) ที่ทำจากโลหะหรืออลูมิเนียม โดยปกติการต่อสาย ณ จุดดังกล่าวมักไม่มีนวนหุ้มข้อรัดสายไฟ (Clamp) ทำให้เมื่อใช้งานไปนาน ๆ บริเวณนอตที่เป็นโลหะ หรือตัวข้อรัดสายไฟที่เป็นอลูมิเนียมเอง เมื่อโดนความชื้นจะเกิดสนิมขึ้น ส่งผลต่อการนำไฟฟ้าของจุดต่อสายแยกลง สายไฟฟ้าบริเวณจุดชำรุดหรือต่อขาดเนื่องจากการกัดกร่อน หรือแม้แต่ว่าจุดต่อเกิดหลุดและหลวม ทำให้ผู้ใช้ไฟฟ้าไม่สามารถใช้ไฟฟ้าได้ อีกทั้งยังเป็นภาระหน้าที่ทำให้การไฟฟ้าต้องเข้ามาดูแลแก้ไขเมื่อเกิดปัญหาขึ้น ทำให้สิ้นเปลืองงบประมาณและเวลาในการบำรุงรักษา

โครงการวิจัยนี้เป็นการพัฒนานวนหุ้มข้อรัดสายไฟที่ใช้สำหรับการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าจากระบบสายจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคไปยังมิเตอร์รับไฟของผู้ใช้ตามที่อยู่อาศัย เพื่อช่วยในการป้องกันปัญหาที่เกิดจากความชื้น การลัดวงจร ที่เกิดขึ้นกับจุดต่อดังกล่าว โครงการวิจัยนี้จะทำการการออกแบบนวนหุ้มข้อรัดสายไฟให้มีความเหมาะสมกับข้อรัดสายไฟแบบพีจีที่ใช้ในปัจจุบัน โดยนวนดังกล่าวจะต้องติดตั้งง่ายและมีลักษณะห่อหุ้มข้อรัดสายไฟฟ้า โดยนวนหุ้มข้อรัดสายไฟฟ้าจะผลิตจากยางพาราที่มีส่วนผสมที่เหมาะสม และผ่านการทดสอบการใช้งานและวิเคราะห์ข้อมูล โดยเมื่อโครงการวิจัยนี้แล้วเสร็จ ผลลัพธ์ที่ได้ จะทำให้เราได้นวนหุ้มข้อรัดสายไฟฟ้าจากยางพาราที่มีประสิทธิภาพ สามารถนำไปใช้กับข้อรัดสายไฟในระบบจำหน่าย 3 เฟส 4 สายที่ระดับแรงดัน 220/380V นอกจากนั้น ยังเป็นการช่วยส่งเสริมการใช้วัตถุดิบทางการเกษตร เพิ่มมูลค่าผลผลิตทางการเกษตร และสนับสนุนอุตสาหกรรมการแปรรูปยางพาราภายในประเทศอีกด้วย

2. วัตถุประสงค์

พัฒนานวนหุ้มข้อรัดสายไฟฟ้าจากยางพาราเพื่อใช้กับข้อรัดสายไฟฟ้าในระบบจำหน่าย 3 เฟส 4 สายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

3. ทฤษฎีและแนวความคิดในการวิจัย

3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ที่ผ่านมา มีการค้นคว้าวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้ยางธรรมชาติเป็นจำนวนมาก โดยงานวิจัยนี้ได้สรุปถึงงานวิจัยในสาขาต่างๆ ที่เกี่ยวข้องมาพอสังเขปดังนี้

Guo-Ping Luo and etc. [1] ได้นำเสนอการวิเคราะห์ข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจี (Parallel Groove Clamp) ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์จุดบกพร่องต่างๆ ของกระบวนการด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากผลการวิจัยพบว่า แรงดึงที่เกิดขึ้นบริเวณข้อรัดสายไฟฟ้า มีเหตุเนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแรงดึงสูงสุดมีค่าถึง 43.98 N/°C และ การเร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนพื้นผิวของจุดต่อและการเพิ่มขึ้นของความต้านทานจะเกิดขึ้นพร้อมกัน การวิเคราะห์แบบจำลองการสั่นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เช่น การเขย่า การโยกกลับไปกลับมาของข้อรัดสายไฟ ฯลฯ พบว่า ความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของ

ตัวข้อรัดสายไฟอันเนื่องมาจากลม จะเกิดการสั่นในลักษณะความถี่ การไม่สมดุลของความต้านทานของข้อรัดสายไฟกับตัวนำทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านไปยังสลักยึด อันเป็นผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและการเร่งการเกิดความเครียดของตัวนอตและสลักเกลียว

วิวรรธน์ มั่นคงวิวัฒน์ และคณะ [2] ได้เสนอการศึกษาและพัฒนา ข้อต่อสายไฟฟ้า(Connectors) สำหรับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการศึกษา กระบวนการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบของ ข้อต่อสายไฟฟ้า (Connector) และข้อรัดสายไฟฟ้า (Clamp) แบบต่างๆ ทางไฟฟ้าแรงสูงที่ได้จากสถานประกอบการที่ร่วมโครงการ การทดสอบทำตามมาตรฐาน ANSI C119.4-2004 โดยการทดสอบทางไฟฟ้าจะใช้วิธีการทดสอบแบบ Current Cycle Tests (CCT) เพื่อหาอุณหภูมิและความต้านทานที่เกิดขึ้นของข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจี 2 สลัก (Parallel Groove Clamp Two Bolt) และการทดสอบทางกลแบบ Torque Strength Test จากการทดสอบพบว่า อุณหภูมิ ความต้านทาน และแรงบิดของข้อรัดสายไฟ ที่ได้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน เมื่อเทียบกับผลจากการใช้โปรแกรมคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่า ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการจำลองผลด้วยโปรแกรมเป็นผลมาจากความไม่แน่นอนของข้อมูล ความร้อนที่เกิดขึ้นบนข้อรัดสายไฟ ค่าความสูญเสียเนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านและค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นจากหน้าสัมผัสของข้อรัดสายไฟ ทำให้ไม่สามารถบ่อนค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องให้แก่โปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้

ต่อศักดิ์ เลิศศรีสุกุลรัตน์ และคณะ [3] ได้เสนอการพัฒนาน้ำยางธรรมชาติสำหรับเคลือบผิวโลหะเหล็ก เพื่อป้องกันการกัดกร่อน โดย งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการพัฒนาคุณภาพยางพารา เพื่อนำไปใช้ป้องกันการกัดกร่อน และถูกทำลายโดยสภาพอากาศและสภาพแวดล้อมของเหล็กโครงสร้าง งานวิจัยนี้ได้นำยางพารามาเป็นวัสดุหลักที่ใช้ในการเคลือบผิวโลหะเหล็กเพื่อป้องกันการกัดกร่อน อันเกิดจากการสัมผัสระหว่างโลหะเหล็กกับสภาพแวดล้อม และเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการป้องกันที่ดียิ่งขึ้น จึงผสมผสานกันระหว่างวิธีการเคลือบผิวโลหะเหล็กด้วยน้ำยางเข้ากันกับวิธีป้องกันแบบคาธอดิก โดยการผสมผงโลหะกับน้ำยาง เพื่อทำหน้าที่สูญเสียอิเล็กตรอนแทนโลหะ

พงษ์ธร แห่อยู่ และชาคริต สิริสิงห์ [4] ได้นำเสนอการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล ความทนทานต่อความร้อนและความต้านทานต่อโอโซนของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางอีพิตีเอ็ม งานวิจัยนี้ได้นำยางธรรมชาติไปผสมกับยางสังเคราะห์ชนิดอื่น ๆ เพื่อที่จะปรับปรุงข้อด้อยของยางธรรมชาติ ซึ่งยางสังเคราะห์ที่นิยมนำมาใช้ผสมกับยางธรรมชาติคือยางอีพิตีเอ็ม เพราะยางอีพิตีเอ็มมีปริมาณพันธะคู่อยู่น้อยมาก ดังนั้น จึงทำให้ยางผสมมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนและโอโซนสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม การผสมยางธรรมชาติกับยางอีพิตีเอ็ม แม้จะทำให้ยางผสมที่ได้มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพสูงขึ้น แต่สมบัติเชิงกลของยางผสมที่ได้มักมีค่าต่ำ โดยเฉพาะค่าความทนทานต่อแรงดึง ทำให้เกิดข้อจำกัดในการนำยางผสมดังกล่าวไปใช้งานในทางวิศวกรรม งานวิจัยนี้จึงเน้นที่จะศึกษาผลของตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของยางผสม NR/EPDM เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางผสม NR/EPDM โดยตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ เกรดของยางอีพิตีเอ็ม(ศึกษาผลของปริมาณเอทิลีนและปริมาณของไดอีน) อัตราส่วนการผสม ระบบการคงรูป สภาวะของการผสม(ศึกษาผลของความเร็วยรอบของโรเตอร์และระยะเวลาที่ใช้ในการผสม) รวมถึงชนิดและปริมาณของสารตัวเติม

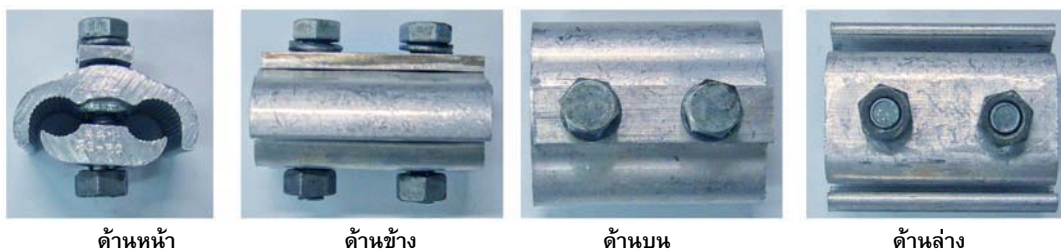
3.2 ข้อรัดสอยไฟฟ้าแบบพีจี

การต่อสายไฟฟ้าในระบบจำหน่ายแรงต่ำ 220/380V ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค นิยมใช้ข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจี(Parallel Groove Clamp: PG Clamp) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การต่อแยกสายไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายไปยังมิเตอร์รับไฟของผู้ใช้ไฟฟ้าตามบ้านพักอาศัย การต่อสายในลักษณะดังกล่าว บริเวณจุดต่อจะไม่มีฉนวนป้องกันหรือใช้เพียงเทปพันสายไฟฟ้าพันทับ ณ จุดต่อสายเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 1

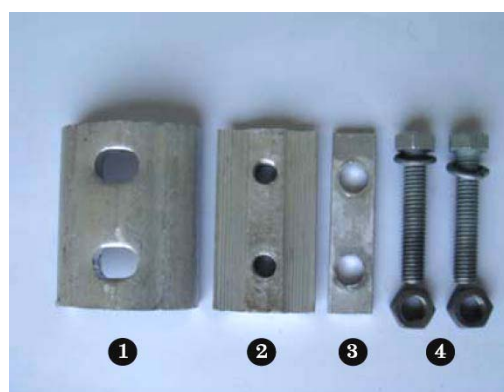
รูปที่ 2 แสดงลักษณะของข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจี 2 สลักขนาด 25 – 95 ตร.มม. ซึ่งเป็นขนาดที่นิยมใช้ในการต่อสายไฟฟ้าในระบบจำหน่ายแรงต่ำ 220/380 โวลต์ ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีชนิดนี้ มีลักษณะเป็นอะลูมิเนียม 2 ชิ้นมาประกบกัน โดยมีสลักเกลียวโลหะ 2 ตัวเป็นตัวยึดเพื่อบีบอัดสายไฟฟ้าที่อยู่ระหว่างชิ้นอะลูมิเนียมทั้งสอง ส่วนประกอบของข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจี 2 สลักขนาด 25 – 95 ตร.มม. แสดงดังรูปที่ 3 ประกอบด้วย ข้อรัดสายไฟฟ้าชั้นบนและชั้นล่าง นอตและสลักเกลียวอย่างละ 2 ตัว และแผ่นโลหะรองสลักเกลียว



รูปที่ 1 การต่อสายไฟฟ้าด้วยข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีในระบบจำหน่าย



รูปที่ 2 ลักษณะข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจี 2 สลักขนาด 25 – 95 ตร.มม



- หมายเหตุ
1. ข้อรัดสายไฟฟ้าชั้นบน
 2. ข้อรัดสายไฟฟ้าชั้นล่าง
 3. แผ่นโลหะรองนอตและสลักเกลียว
 4. นอตและสลักเกลียว

รูปที่ 3 ส่วนประกอบของข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจี

3.3 คุณสมบัติของขั้วรีดสายไฟฟ้าแบบพีจี

3.3.1 คุณสมบัติทางกล

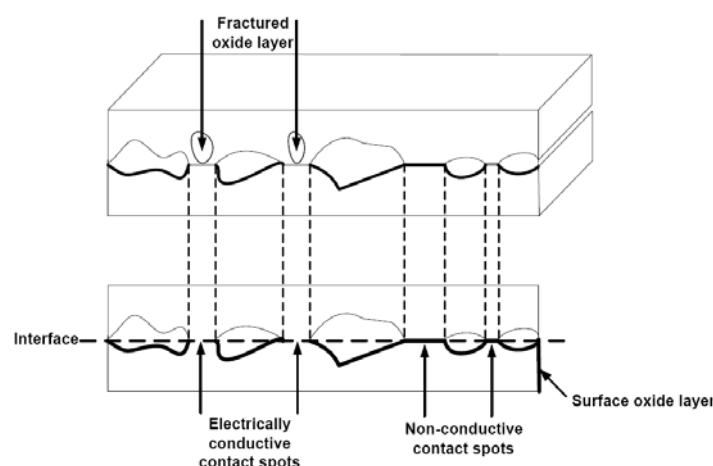
ขั้วรีดสายไฟฟ้าที่ใช้สำหรับต่อแยกสายไฟฟ้า ต้องสามารถรับแรงดึงของสายไฟฟ้าหรือตัวนำที่ต่ออยู่ได้ และเกิดการเคลื่อนที่ของตัวนำที่อยู่ภายใต้แรงบีบของขั้วรีดสายไฟฟ้าน้อยที่สุด นอกจากนี้ขั้วรีดสายไฟฟ้าต้องมีแรงกดบนเนื้อโลหะตัวนำสม่ำเสมอทุกจุดและคงที่เพื่อให้การกระจายของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมีความสม่ำเสมอ

3.3.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

หน้าสัมผัสทางไฟฟ้าระหว่างขั้วรีดสายไฟฟ้ากับตัวนำควรมีพื้นที่มากที่สุด มีความต้านทานต่ำ นำไฟฟ้าได้ดี เพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ง่ายและเกิดกำลังสูญเสียที่หน้าสัมผัสน้อยที่สุด แต่ทั้งนี้ บริเวณผิวของโลหะไม่ว่าจะเป็นที่ผิวตัวนำหรือผิวของขั้วรีดสายไฟฟ้า สามารถเกิดฟิล์มออกไซด์ (Oxide film) ขึ้นได้ ฟิล์มออกไซด์ดังกล่าวมีสภาพเป็นฉนวน ดังนั้นการติดตั้งขั้วรีดสายไฟฟ้าควรทำการขัดผิวโลหะก่อนทุกครั้ง เพื่อขจัดฟิล์มออกไซด์นี้

3.3.3 วงจรสมมูลของการต่อสายไฟฟ้า

ขั้วรีดสายไฟฟ้ามีหน้าที่เชื่อมต่อและเป็นตัวกลางในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าระหว่างตัวนำเส้น ผ่านทางผิวเนื้อโลหะตัวนำของขั้วรีดสายไฟฟ้า เมื่อพิจารณาถึงผิวหน้าสัมผัสระหว่างขั้วรีดสายไฟฟ้ากับสายไฟฟ้า จะพบว่าผิวทั้งสองด้านมีลักษณะไม่เรียบ ดังแสดงในรูปที่ 4 ทำให้พื้นที่สัมผัสทางกลมีน้อยกว่าพื้นที่หน้าสัมผัสจริง นอกจากนี้ ผิวของตัวนำจะเกิดชั้นของฟิล์มออกไซด์ความหนาประมาณ 3 นาโนเมตร ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวน ทำให้บริเวณดังกล่าวไม่สามารถนำไฟฟ้าได้ แต่อย่างไรก็ตาม ฟิล์มออกไซด์สามารถแตกหรือหลุดกลายและกลับมานำไฟฟ้าได้ถ้าได้รับแรงทางกลมากพอ [5]



รูปที่ 4 ภาพขยายบริเวณรอยต่อหน้าสัมผัสระหว่างตัวนำกับขั้วรีดสายไฟฟ้า

จากที่กล่าวมา ทำให้หน้าสัมผัสทางไฟฟ้าจริง ๆ ระหว่างสายไฟฟ้ากับขั้วรีดสายไฟฟ้ามีพื้นที่น้อยมาก โดยทั่วไปมีพื้นที่ประมาณ 1% ของหน้าสัมผัสทั้งหมด [6] จุดที่สัมผัสทางไฟฟ้าระหว่างขั้วรีดสายไฟฟ้ากับสายไฟ เรียกว่า “a-spots” และสามารถถูกทำลายได้ง่าย เมื่อมีแรงทางกลมากกระทำ เนื่องจาก a-spots มีขนาดเล็กมาก

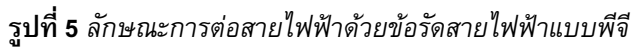
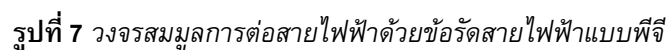


Diagram illustrating the components of a cable gland assembly:

- สลักเกลียว(Bolt)
- สายตัวนำ A
- ข้อรัดสายไฟฟ้าชั้นบน
- สายตัวนำ B
- ข้อรัดสายไฟฟ้าชั้นล่าง
- นอต(Nut)

รูปที่ 6 ภาพหน้าตัดตามแนวตั้งของการต่อสายไฟฟ้าด้วยขั้วรัดสายไฟฟ้าแบบพีจี



จากรูปที่ 7 วงจรสมมูลที่ได้มีลักษณะเป็นวงจรบริดจ์สมมูลที่ประกอบด้วยความต้านทานในแต่ละส่วน คือ R_1 และ R_2 เป็นความต้านทานรวมของข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีขึ้นบนและล่าง, R_{A_1} และ R_{A_2} เป็นความต้านทานรวม ณ จุดสัมผัสระหว่างสายตัวนำ A กับข้อรัดสายไฟฟ้าขึ้นบนและขึ้นล่าง, R_{B_1} และ R_{B_2} เป็นความต้านทานรวม ณ จุดสัมผัสระหว่างสายตัวนำ B กับข้อรัดสายไฟฟ้าขึ้นบนและขึ้นล่าง, R_{b_1} และ R_{b_2} เป็นความต้านทานรวม ณ จุดสัมผัสระหว่างนอตและสลักเกลียวกับข้อรัดสายไฟฟ้าขึ้นบนและขึ้นล่าง ตามลำดับ และ R_b เป็นความต้านทานรวมของนอตทั้งสองตัว จากวงจรสมมูลจะเห็นว่า สายตัวนำ A และสายตัวนำ B จะถูกเชื่อมต่อกับค่าความต้านทาน โดยทั้งนี้ เมื่อมีการใช้งานไปเป็นเวลานาน อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทาน ณ จุดดังกล่าว จากฟิล์มออกไซด์ที่เกิดจากความชื้น

3.4 ปัญหาที่เกิดขึ้นกับข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจี

การใช้งานข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีเป็นระยะเวลานานๆ บริเวณจุดต่อจะเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดี อันเนื่องมาจากปัจจัยด้านสภาพแวดล้อม ไม่ว่าจะเป็น การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ความชื้น แสงแดด แสงอัลตราไวโอเลต(Ultraviolet: UV) บริเวณจุดต่อสายไฟฟ้าจะเกิดฟิล์มออกไซด์ ส่งผลต่อความต้านทานที่จุดสัมผัสระหว่างสายไฟฟ้ากับข้อรัดสายไฟฟ้าสูงขึ้น ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและความร้อน จนก่อความเสียหายให้กับจุดต่อสายดังกล่าวได้ ในที่สุด ปัจจัยที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีมีอยู่หลายประการ ดังนี้

พื้นที่หน้าสัมผัส โดยทั่วไป ผิวตัวนำของสายไฟฟ้าหรือข้อรัดสายไฟฟ้าจะไม่เรียบ บริเวณผิวจะมีฟิล์มออกไซด์และสิ่งเปราะเปื้อนต่างๆ ดังนั้นบริเวณพื้นที่หน้าสัมผัสจะนำไฟฟ้าได้ไม่ดี หรือไม่สามารถนำไฟฟ้าได้ จุดเชื่อมต่อที่ตื้นนั้น อุณหภูมิที่ผิวหน้าสัมผัสจะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิของข้อรัดสายไฟฟ้าทั้งหมดเล็กน้อย ถ้าจุดเชื่อมต่อระหว่างสายไฟฟ้ากับข้อรัดสายไฟฟ้าไม่ดี อุณหภูมิของข้อรัดสายไฟฟ้าจะมีค่าสูงมากจนแรงให้พื้นที่หน้าสัมผัสเสื่อมสภาพ การเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นจะสะสมมากขึ้นเรื่อยๆ และส่งผลย้อนกลับต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอีก จนในที่สุดข้อรัดสายไฟฟ้าก็จะไม่สามารถนำไฟฟ้าได้อีกต่อไป รูปที่ 8 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีที่ผ่านการใช้งาน โดยใช้เทปพันสายไฟพันบริเวณจุดต่อ จะพบว่า ในส่วนที่เป็นโลหะจะเกิดสนิมและสิ่งเปราะเปื้อนสามารถสะสมและเข้าถึงจุดต่อสายไฟฟ้าได้



รูปที่ 8 ข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีที่ผ่านการใช้งาน

ออกซิเดชัน การเกิดออกซิเดชันที่หน้าผิวสัมผัสของโลหะกับโลหะเป็นกระบวนการสำคัญต่อการเสื่อมสภาพของจุดเชื่อมต่อ แต่กรณีข้อรัดสายไฟฟ้าที่ทำจากอะลูมิเนียม การเกิดออกซิเดชันไม่ค่อยมีผลกระทบต่อจุดเชื่อมต่อมากนัก เนื่องจากฟิล์มออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะมีความหนาประมาณ 10 นาโนเมตร และ

เกิดในช่วงเวลาที่สั้นมาก นอกจากนั้น ความหนาของฟิล์มออกไซด์ยังมีขนาดเล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของ a-spot มาก กระบวนการเกิดออกซิเดชันของขั้วลวดสายไฟฟ้า จะเกิดขึ้นเมื่อผิวของอะลูมิเนียมเปลี่ยนสัมผัสกับออกซิเจนในบรรยากาศ จะเกิดฟิล์มออกไซด์ขึ้น 2 ชั้น คือ ชั้นใน(Barrier Layer) และชั้นนอก(Bulk Film) ฟิล์มออกไซด์ชั้นในจะเป็นชั้นบาง ๆ ที่ไม่มีความพรุน (Thin Non-Porous) ส่วนฟิล์มชั้นนอกจะมีความพรุนมาก กว่าชั้นใน ความหนาของฟิล์มออกไซด์ชั้นในขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยจะมีความหนาถึงจุดหนึ่งภายในเวลาที่ไม่กี่ μs ในขณะที่ฟิล์มออกไซด์ชั้นนอก จะมีความหนาเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ขึ้นอยู่กับความชื้น และอุณหภูมิ สมบัติของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ คือ แข็ง เปราะ และมีค่าความต้านทานสูงในระดับ $10^{24} \mu\Omega - cm$ นอกจากนั้น ยังโปร่งแสง

การกัดกร่อนแกลแวนิก เกิดขึ้นเมื่อมีโลหะ 2 ชนิดที่ต่างกันอยู่ใกล้กันภายใต้สภาวะที่นำไอออนได้ หรือเรียกว่า อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ในสภาวะดังกล่าว โลหะตัวหนึ่งจะเปรียบเสมือนเป็น แอโนด (Anode) ซึ่งการกัดกร่อนจะเกิดด้วยอัตราที่ช้ากว่าปกติ[7] ส่วนโลหะอีกตัวหนึ่งจะเป็นแคโทด (Cathode) โดยโลหะที่เป็นแคโทดจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าน้อยกว่าแอโนด แคโทดจะรับอิเล็กตรอนหรือไอออนลบจากแอโนด ดังนั้น แอโนดจึงถูกกัดกร่อนไป

ด้วยเหตุนี้ ในกรณีที่ขั้วลวดสายไฟฟ้าที่เชื่อมต่อระหว่างตัวนำอะลูมิเนียม – ทองแดง อะลูมิเนียมมีค่าศักย์ไฟฟ้าอยู่ในช่วง -0.7 ถึง -0.9 โวลต์ (เฉลี่ยประมาณ -0.8 โวลต์) และทองแดงมีค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยประมาณ -0.3 โวลต์ จะเห็นว่าอะลูมิเนียมมีค่าศักย์ไฟฟ้าน้อยกว่าทองแดง ดังนั้นอะลูมิเนียมจะพบพฤติกรรมเป็น แอโนด ซึ่งจะถูกกัดกร่อนด้วยอัตราที่เร็วกว่า และทองแดงจะพบพฤติกรรมเป็นแคโทด ซึ่งจะถูกกัดกร่อนด้วยอัตราที่ช้ากว่า การกัดกร่อนแกลแวนิกทำให้ขั้วลวดสายไฟฟ้าที่เชื่อมระหว่างตัวนำอะลูมิเนียม-ทองแดง ให้เสื่อมสภาพได้ 2 วิธีคือ หน้าสัมผัสทางไฟฟ้าลดลงอย่างรวดเร็ว และขั้วลวดสายไฟฟ้าถูกกัดกร่อนจนไม่สามารถรับแรงทางกลได้

การขยายตัวจากความร้อน เกิดจากความแตกต่างของสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของ โลหะแต่ละชนิด ขั้วลวดสายไฟฟ้าที่ทำมาจากอะลูมิเนียมจะขยายตัวมากกว่าสายตัวนำทองแดง ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของบริเวณหน้าสัมผัส และแรงกดระหว่างผิวหน้าสัมผัสลดลง การขยายตัวจากความร้อนยังทำให้เกิดการสูญเสียรูปร่าง ในขณะที่โลหะมีการขยายตัวเมื่อเกิดความร้อนขึ้น และจะไม่กลับคืนรูปร่างเดิมเมื่ออุณหภูมิลดลง มีผลทำให้จุดเชื่อมต่อเกิดหลวม ความต้านทานที่หน้าผิวสัมผัสเพิ่มขึ้น และอุณหภูมิสูงขึ้น รูปที่ 9 แสดงถึงผลของความร้อนที่ทำให้ขั้วลวดสายไฟฟ้าเกิดการหลอมละลาย



รูปที่ 9 ขั้วลวดสายไฟฟ้าที่ชำรุดเสียหายเนื่องจากความร้อน

4. การออกแบบฉนวนสำหรับข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจี

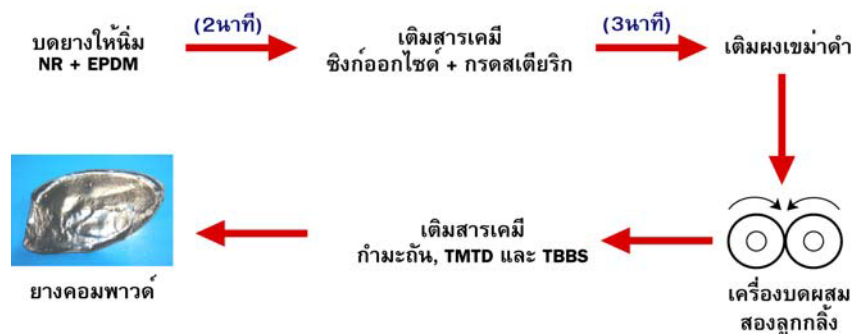
4.1 สูตรยางและการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ยางธรรมชาติมีคุณสมบัติในการเป็นฉนวน โดยมีค่าความต้านทานจำเพาะอยู่ระหว่าง $10^{15} - 10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$ เราจึงสามารถนำยางธรรมชาติมาทำเป็นฉนวนไฟฟ้าได้ แต่ทั้งนี้ ยางธรรมชาติสามารถเสื่อมสภาพได้ง่าย อันเนื่องมาจากความร้อน แสงแดด และโอโซน ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงนำยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอินหรือยางอีพีดีเอ็ม มาเป็นผสมกับยางพาราในอัตราส่วน 60:40 เพื่อเพิ่มคุณสมบัติความทนทานต่อสภาพแวดล้อม[8] สูตรยางและสารเคมีต่างๆ ที่ใช้ในการผสมยางคอมพาวด์แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนผสมและสารเคมีที่ใช้ในการผสมยางคอมพาวด์

วัตถุดิบ	ปริมาณ(phr)
ยางธรรมชาติ (STR 5L)	60.0
ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอินโมโนเมอร์ (EPDM)	40.0
ซิงก์ออกไซด์ (ZnO)	5.0
กรดสเตียริก (Stearic acid)	2.0
ไดโซโคลเฮกซิลเบนโซโทอะโซลซัลฟิनाไมด์ (TBBS)	1.0
เททระเมทิลไทูรัมไดซัลไฟด์ (TMTD)	0.2
กำมะถัน (Sulphur : S)	1.8
ผงเขม่าดำ (Carbon-black:CB N330)	30.0

การเตรียมยางคอมพาวด์จากสูตรยางตามตารางที่ 1 จะนำวัตถุดิบและสารเคมีมาผสมโดยใช้เครื่องผสมระบบปิด(Brabender) ที่อุณหภูมิห้องผสมเท่ากับ 60°C ความเร็วรอบในการหมุนของโรเตอร์ 40 รอบ/นาที การผสมจะเริ่มจากผสมยางธรรมชาติกับยางอีพีดีเอ็มเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นจึงเติมซิงก์ออกไซด์และกรดสเตียริก กวนส่วนผสมต่อประมาณ 3 นาทีจึงเติมผงเขม่าดำ จากนั้นนำยางที่ได้จากเครื่องผสมระบบปิดไปเติมกำมะถัน, เททระเมทิลไทูรัมไดซัลไฟด์ และไดโซโคลเฮกซิลเบนโซโทอะโซลซัลฟิनाไมด์ ด้วยเครื่องบดผสม 2 ลูกกลิ้ง บดส่วนผสมต่างๆ ให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันเป็นเวลาประมาณ 5 นาที จะได้ยางคอมพาวด์แสดงดังรูปที่ 11 จากนั้นจึงนำยางคอมพาวด์ไปหาวะเวลาสกอร์ช(Scorch Time, t_{s2}) และระยะเวลาในการคงรูปของยางคอมพาวด์ที่เหมาะสมด้วยเครื่อง Moving Die Rheometer(TECHPRO, Rheotech MD+) ที่อุณหภูมิ 155°C แล้วจึงนำยางคอมพาวด์ไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก (Compression moulding machine) ที่อุณหภูมิ 155°C และใช้เวลาในการวัลคาไนซ์ 12.36 ± 0.57 นาที เพื่อทำเป็นชิ้นยางคงรูปขนาด $200 \times 200 \times 2.5$ มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 12 สำหรับการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ



รูปที่ 10 กระบวนการในการทำยางคอมพาวด์เพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติต่างๆ



รูปที่ 11 ยางคอมพาวด์ที่ได้หลังการผสมวัตถุดิบตามสูตร



รูปที่ 12 ชิ้นงานยางคงรูป/ขนาด 200×200×2.5 มิลลิเมตร

4.2 การทดสอบและผลการทดสอบ

จากยางคอมพาวด์ที่ได้และถูกนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นขนาด 200×200×2.5 มิลลิเมตร นำไปทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางไฟฟ้าที่จำเป็น ได้แก่ การทดสอบการคงรูปของยาง, การทดสอบความแข็ง, การทดสอบสมบัติการรับแรงดึง, การทดสอบสภาพต้านทานเชิงผิวและเชิงปริมาตร รวมถึงการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวน โดยทั้งนี้ การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของยางคงรูป ผู้วิจัยได้ส่งตัวอย่างชิ้นวัสดุขนาด 200×200×2.5 มิลลิเมตรไปทดสอบ ณ กรมวิทยาศาสตร์บริการ และศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย ตามมาตรฐาน ASTM D2240, ASTM D149, ASTM D257-99 และ ASTM D412 การทดสอบในแต่ละหัวข้อมีรายละเอียดและผลการทดสอบดังนี้

การทดสอบความแข็ง(Hardness)

การวัดค่าความแข็งเป็นการวัดความต้านทานของยางคงรูปต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเฉพาะที่บริเวณพื้นผิว โดยนำชิ้นงานทดสอบมาทดสอบความแข็งก่อนและหลังบ่มแรง สภาวะของการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง การทดสอบความแข็งกระทำโดยเครื่องดูโรมิเตอร์ (Shore A Hardness Tester) ตามมาตรฐาน ASTM D2240 การที่ความแข็งมีค่ามากจะทำให้ยางมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือเกิดรอยได้ยาก เมื่อมีวัตถุมากระทำต่อผิวสัมผัสของยาง แต่ถ้ายางมีความแข็งมากเกินไปจะทำให้ยางมีความเปราะและแตกหักได้ง่าย ผลการทดสอบความแข็งของยางคงรูปแสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งพบว่าค่าความแข็งของยางคงรูปหลังการบ่มแรงมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 13 เครื่องดูโรมิเตอร์สำหรับวัดความแข็งในหน่วยชอร์ตามมาตรฐาน ASTM D2240

ตารางที่ 2 ค่าความแข็งของยางคงรูป

ค่าความแข็งที่ผิว	ก่อนบ่มเร่ง	หลังบ่มเร่ง
ความแข็ง (Shore A)	62.2 ± 0.3	65.9 ± 0.3

การทดสอบสมบัติการรับแรงดึง(Tensile Strength)

ตามมาตรฐาน ASTM D412 การทดสอบสมบัติแรงดึงของยางสามารถวัดได้ด้วยการดึงชิ้นงานทดสอบมาตรฐานจนขาด ด้วยอัตราเร็วในการดึงคงที่ เครื่องที่ใช้ทดสอบสมบัติแรงดึงแสดงดังรูปที่ 14 เรียกว่า Universal Testing Machine สมบัติแรงดึงเป็นสมบัติพื้นฐานที่ใช้ในการควบคุมการผลิต เนื่องจากค่าความทนทานต่อแรงดึงเป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงได้ง่ายตามการเปลี่ยนแปลงของยางอันเนื่องมาจากสาเหตุต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการเปลี่ยนสูตรการผลิต หรือการเปลี่ยนแปลงทางกระบวนการผลิต นอกจากนี้ สมบัตินี้ยังนิยมใช้เป็นตัวชี้วัดความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากสิ่งเร้าต่างๆ เช่น ความร้อน ของเหลว ก๊าซ สารเคมี โอโซน สภาพอากาศ ฯลฯ ตารางที่ 3 แสดงค่าเฉลี่ยของค่า Tensile Strength และ Elongation at Break ที่ได้จากการทดสอบ (รายละเอียดผลการทดสอบสมบัติแรงดึงจำนวนทั้งหมด 5 ครั้งสามารถดูได้ในภาคผนวก)



รูปที่ 14 เครื่องทดสอบสมบัติการรับแรงดึง Universal Testing Machine

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบ Tensile Strength และ Elongation at break

สมบัติการรับแรงดึง	ก่อนบ่มแรง	หลังบ่มแรง
Tensile Strength (MPa)	10.09 ± 0.58	7.77 ± 1.20
Elongation at break (%)	423 ± 8	207 ± 24

การทดสอบค่าความต้านทานเชิงผิว (Surface Resistivity) และความต้านทานเชิงปริมาตร (Volume Resistivity)

ความต้านทานเชิงผิว และความต้านทานเชิงปริมาตร เป็นการนำฉนวนไฟฟ้าไปคั่นระหว่างอิเล็กโทรดที่ป้อนแรงดันกระแสตรงเป็นเวลานานจนกระทั่งอยู่ตัว จะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านฉนวนนั้นแต่มีค่าน้อยมากเรียกว่ากระแสรั่ว กระแสรั่วที่ไหลผ่านฉนวนนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ทางหนึ่งไหลผ่านเนื้อฉนวน เนื่องจากฉนวนมีสภาพนำอยู่บ้าง ส่วนอีกทางหนึ่งไหลผ่านตามผิวฉนวน เนื่องจากผิวมีสภาพนำไฟฟ้าจากสิ่งเปื้อนและฝุ่นและความชื้นที่ผิว การทดสอบความต้านทาน โดยนำชิ้นงานทดสอบขนาด 200×200×2.5 มิลลิเมตร ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D257-99 ที่สภาวะแวดล้อมห้องทดสอบ อุณหภูมิ (23±2) °C ความชื้นสัมพัทธ์ (50±5) %Rh ใช้ขั้วอิเล็กโทรดเป็นชนิด Flat Metal Plates (HP16008A) เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และทำการวัดด้วยวิธี Voltmeter-Ammeter Method โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (500±5) โวลต์ เป็นเวลา 60 วินาที ผลการทดสอบความต้านทานเชิงผิวและความต้านทานเชิงปริมาตรแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบความต้านทานเชิงผิวและความต้านทานเชิงปริมาตร

ผลการทดสอบ	Thickness	Resistance	Resistivity
Surface	-	$1.30 \times 10^{10} \Omega$	$0.56 \times 10^{10} \Omega/\text{square}$
Volume	0.25 cm	$< 0.25 \times 10^8 \Omega$	$< 1.97 \times 10^9 \Omega\text{-cm}$

การทดสอบความคงทนของฉนวนทางไฟฟ้า (Dielectric Strength)

ความคงทนของฉนวนทางไฟฟ้า คือค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้า สูงสุดที่ฉนวนนั้นสามารถทนอยู่ได้ โดยไม่เกิดความเสียหาย เกิดการเบรกดาวน์ทำให้การฉนวนเสื่อมสภาพ ซึ่งมีหน่วยเป็นค่าแรงดันต่อหน่วยความหนาของฉนวน V/cm หรือ kV/cm ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ใช้กำหนดค่าความคงทนของการฉนวนทางไฟฟ้า โดยทั่วไปจะคำนวณจากสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอที่เกิดขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดที่มีลักษณะเป็นแผ่นระนาบวางขนานกัน โดยความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดที่เกิดขึ้นจะเท่ากันทุกจุด ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันขณะจะเกิดเบรกดาวน์นี้ก็คือ ความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวนไฟฟ้า ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$E_b = \frac{U_b}{d}$$

เมื่อ E_b คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า หรือ ความคงทนของฉนวนไฟฟ้า

U_b คือ แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน์ด้วยสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

d คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด

ในการออกแบบนทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ได้แบ่งการนตามระดับแรงดันของระบบไฟฟ้าออกเป็น 3 กลุ่มด้วยกันคือ

1. แรงดันสูง (High Voltage: HV, $1\text{kV} \leq U_m < 300\text{kV}$) การนจะออกแบบบนฐานแรงดันเกินเสรีจฟ้าผ่า(Basic Impulse Insulation Level: BIL)
2. แรงดันสูงพิเศษ (Extra High Voltage: EHV, $300\text{kV} \leq U_m < 765\text{kV}$) การนจะออกแบบบนฐานแรงดันเกินเสรีจฟ้าผ่าร่วมกับแรงดันเกินเสรีจสวิตซิ่ง(Basic Switching Impulse Insulation Level: BSL)
3. แรงดันสูงยิ่ง (Ultra High Voltage: UHV, $U_m \geq 765\text{kV}$)การนจะออกแบบบนฐานแรงดันเกินเสรีจสวิตซิ่งร่วมกับความเปราะเปื้อนเปื้อนงศ์ประกอบสำคัญ

แต่เนื่องจาก นหัวขั้วสายไฟฟ้าแบบพิจาที่ออกแบบ จะนำไปใช้ในระบบจำหน่ายที่ระดับแรงดัน 220/380 โวลต์เท่านั้น จึงทำการทดสอบเฉพาะความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าความถี่กำลังตามมาตรฐาน IEC 60060-1 Ed. 2.0 (High Voltage Test Technique Part 1: General Definitions and Test Requirements) เท่านั้น

การทดสอบความคงทนของน ทำการทดสอบโดยนำขึ้นงานทดสอบ ขนาด $200 \times 200 \times 2.5$ มิลลิเมตร มาวางคั่นระหว่างอิเล็กโตรดระนาบ 2 อันและต่อเข้ากับวงจรทดสอบดังรูปที่ 15 ที่อิเล็กโตรดระนาบทั้งสองจะป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่กำลัง(50Hz)ด้านหนึ่ง และอีกด้านหนึ่งต่อลงกราวด์ การทดสอบจะเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจนกระทั่งเกิดการเบรกดาวนขึ้นที่ตัวน บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดการเบรกดาวน และนำค่าแรงดันไฟฟ้าไปคำนวณหาค่าความคงทนของนไฟฟ้า ผลการทดสอบความคงทนของนไฟฟ้าแสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของยาร

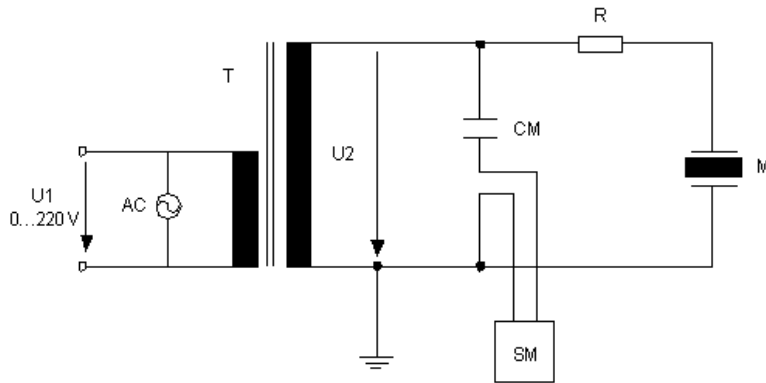
การทดลองครั้งที่	แรงดันเบรกดาวน(kV)	ความหนาของน (mm.)
1	5.30	2.50
2	5.55	2.50
3	5.50	2.50
4	5.35	2.50
5	5.40	2.50
เฉลี่ย	5.42	2.50

หมายเหตุ ความชื้นสัมพัทธ์ 64%, ความดันอากาศ 1035hPa(776.31mm.Hg), อุณหภูมิ 29°C



(ก) วงจรการทดสอบ

รูปที่ 15 วงจรกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับความถี่กำลังสำหรับการทดสอบความคงทนของน



(ข) วงจรสมมูลของการทดสอบความคงทนของฉนวนทางไฟฟ้า

รูปที่ 15 วงจรกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับความถี่กำลังสำหรับการทดสอบความคงทนของฉนวน(ต่อ)

หมายเหตุ	T	หม้อแปลงทดสอบ 220 V / kV 5 kVA
	U1	แหล่งจ่ายภาคแรงต่ำ 0-220 V
	U2	แหล่งจ่ายภาคแรงสูง 0-100 kV
	CM	ตัวเก็บประจุภาคแรงสูง 100 pF 100 kV
	SM	โวลต์มิเตอร์ที่มีอิมพีแดนซ์ขาเข้าสูง พร้อมทั้งมีคาปาซิเตอร์ภาคแรงต่ำในตัว (MWB หรือ Haefely)
	R	ความต้านทานจำกัดกระแส 2400 โอห์ม
	M	อิเล็กทรอนิกส์แบบสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ และชิ้นงานทดสอบ หน้า 2.5 มิลลิเมตร

4.3 การออกแบบและการทดสอบใช้งาน

งานวิจัยนี้ได้นำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบ และการวิเคราะห์ทางไฟฟ้า เพื่อให้การออกแบบ สะดวกรวดเร็ว มีความยืดหยุ่นในการปรับเปลี่ยนหรือปรับปรุงรูปแบบของฉนวนข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจี รวมถึง เพื่อความสะดวกในการจัดทำแม่พิมพ์เพื่อขึ้นรูปชิ้นงานจริง ในส่วนการออกแบบบนคอมพิวเตอร์ได้ใช้ โปรแกรมเขียนแบบสร้างแบบพิมพ์เขียวทั้ง 2 มิติและ 3 มิติของฉนวนข้อรัดสายไฟฟ้า รวมถึงใช้โปรแกรม ประยุกต์ไฟในเอลิเมนต์ การออกแบบฉนวนในทางวิศวกรรมไฟฟ้า คุณสมบัติที่ต้องการของวัสดุฉนวนที่ดี เราสามารถพิจารณาได้จากคุณสมบัติดังต่อไปนี้

คุณสมบัติทางไฟฟ้า

- มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า ณ ระดับแรงดันที่ใช้งานได้
- มีค่าความต้านทานสูงทุกระดับแรงดัน
- มีค่าสูญเสียไดอิเล็กตริกต่ำ เพื่อป้องกันมิให้อุณหภูมิของฉนวนเพิ่มขึ้นเกินขีดจำกัด
- มีความคงทนต่อการเกิดร่องรอยนำไฟฟ้าที่ผิว เพื่อป้องกันการกัดกร่อนหรือการเสื่อมสภาพของ ฉนวน

คุณสมบัติทางกลของฉนวน ฉนวนจะต้องมีความทนทานต่อแรงกล เนื่องจากในทางปฏิบัติวัสดุฉนวนนอก จากต้องทำหน้าที่ป้องกันการลัดวงจรแล้ว ยังต้องรับน้ำหนัก แรงกด แรงบิด หรือแรงดึง

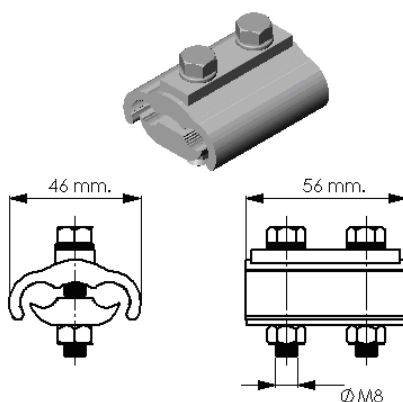
คุณสมบัติทางความร้อนของฉนวน ฉนวนที่ดีต้องทนความร้อนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้า รวมถึงสามารถระบายความร้อนได้ดี ไม่ติดไฟ มีสัมประสิทธิ์ขยายตัวทางความร้อนต่ำ

คุณสมบัติความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมีได้ดี ฉนวนต้องไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมี และไม่เปื้อนพิษ

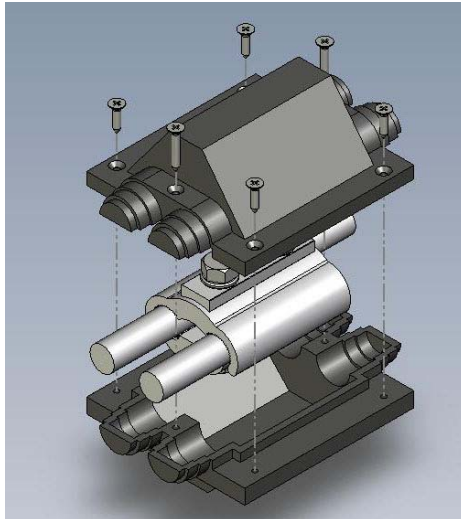
คุณสมบัติความทนทานต่อสภาพแวดล้อม ณ สถานที่ที่ติดตั้งใช้งาน ฉนวนต้องทนต่อน้ำมัน โอโซน ไม่ดูดซึมน้ำหรือความชื้น ทนต่อการแผ่รังสี

ฉนวนขั้วรีดสายไฟฟ้าแบบพีจี ที่ออกแบบจะถูกนำไปใช้งานในระบบจำหน่ายแรงต่ำ ที่ระดับแรงดัน 220/380 โวลต์ ด้วยระดับแรงดันที่ต่ำ (ไม่เกิน 1,000 โวลต์) ทำให้เงื่อนไขด้านค่าสูญเสียไดอิเล็กตริกไม่ได้เป็นปัจจัยสำคัญ เนื่องจากที่ระดับแรงดันต่ำดังกล่าว จะไม่เกิดค่าสูญเสียไดอิเล็กตริกขึ้น การออกแบบจึงมุ่งเน้นไปที่ฉนวนต้องสามารถทนแรงดันไฟฟ้า ณ ระดับแรงดันที่ใช้งานได้เป็นเกณฑ์ จากผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่กำลังในตารางที่ 5 ยางคงรูปที่นำมาทำฉนวนสามารถทนแรงดันไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 2 กิโลโวลต์ ที่ความหนาของฉนวนเท่ากับ 1 มิลลิเมตร การออกแบบจึงกำหนดความหนาของฉนวนต่ำที่สุดเท่ากับ 3 มิลลิเมตร นั่นคือฉนวนสามารถที่จะทนแรงดันได้สูงถึง 6 กิโลโวลต์ และเพื่อให้ฉนวนมีความแข็งแรงไม่บิดงอหรือฉีกขาดง่ายจนเกินไป

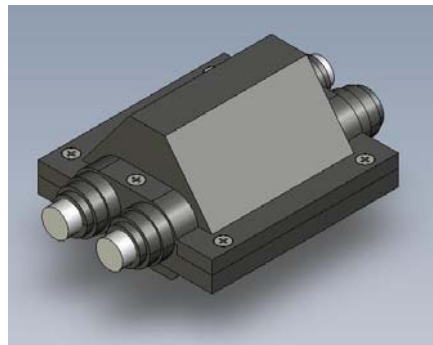
การออกแบบและผลิตชิ้นงานตัวอย่างของฉนวนขั้วรีดสายไฟฟ้าแบบพีจี จะเริ่มจากการวัดขนาดและมิติของขั้วรีดสายไฟฟ้าแบบพีจี 2 สลัก ดังรูปที่ 16 จากนั้นนำขนาดและมิติของขั้วรีดสายไฟฟ้าไปทำการออกแบบฉนวน โดยการวาดแบบพิมพ์เขียว 2 มิติบนคอมพิวเตอร์(สามารถดูรายละเอียดของแบบพิมพ์เขียว 2 มิติได้ในภาคผนวก) และสร้างชิ้นงานเสมือนจริงด้วยแบบจำลอง 3 มิติเพื่อดูลักษณะโดยรวมของฉนวนที่ออกแบบเสร็จเรียบร้อยแล้ว รูปที่ 17 (ก) แสดงแบบจำลองเสมือนจริงของฉนวนขั้วรีดสายไฟฟ้าแบบพีจี เมื่อประกอบเข้ากับขั้วรีดสายไฟฟ้าแบบพีจี ลักษณะของฉนวนขั้วรีดสายไฟฟ้าที่ออกแบบประกอบด้วย ฉนวนชั้นบนและฉนวนชั้นล่างที่สามารถประกบยึดติดเข้าหากันได้ การประกบเข้าหากันจะยึดติดด้วยสกรูสแตนเลสทั้งหมด 6 ตัว โดยฉนวนชั้นบน และชั้นล่างมีรูเจาะสำหรับขันสกรูทะลุถึงกัน บริเวณส่วนปลายทั้งสองของฉนวนมีช่องสำหรับรองรับสายไฟฟ้าทั้งสองด้านลักษณะเป็นครึ่งวงกลมประกบเข้าหากัน มีเส้นรศมีที่แตกต่างกันสามารถบิด โดยในการใช้งานสามารถเนียนตัดให้มีขนาดเหมาะสมกับสายไฟฟ้าได้ ฉนวนชั้นบนและชั้นล่างจะมีปาล์ออกยกสูงขึ้นมา สำหรับป้องกันการเคลื่อนตัว ป้องกันความชื้นและองน้ำเข้าสู่ภายใน การประกอบฉนวนชั้นบนและฉนวนชั้นล่างเข้ากับขั้วรีดสายไฟฟ้าแบบพีจี ทำโดยการประกบด้านล่างและบนเข้าหากัน ขั้วรีดสายไฟฟ้าแบบพีจีจะถูกห่อหุ้มอยู่ภายในและสายไฟฟ้าจะต่อยื่นออกมาผ่านช่องรองรับสายไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 17 (ข)



รูปที่ 16 ขนาดและมิติของขั้วรีดสายไฟฟ้าแบบพีจี



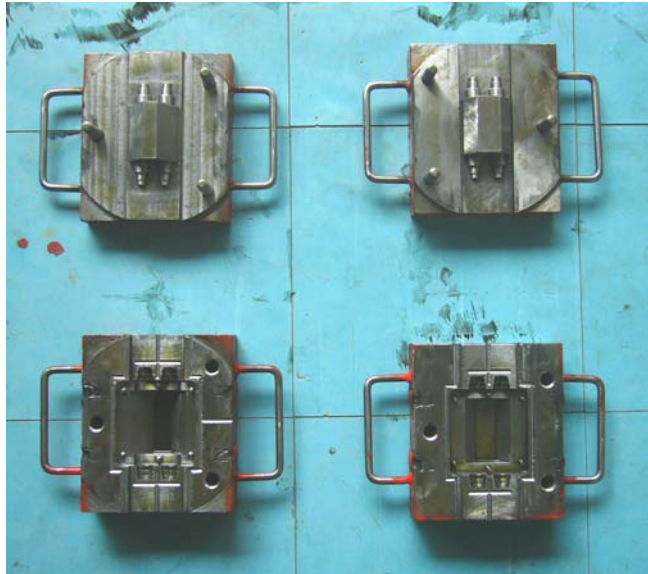
(ก) ส่วนประกอบของฉนวนข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจี



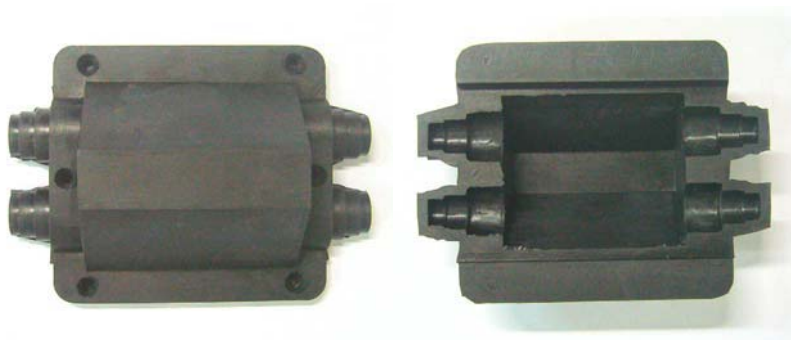
(ข) การประกอบฉนวนเข้ากับข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจี

รูปที่ 17 แบบจำลอง 3 มิติของฉนวนข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจี

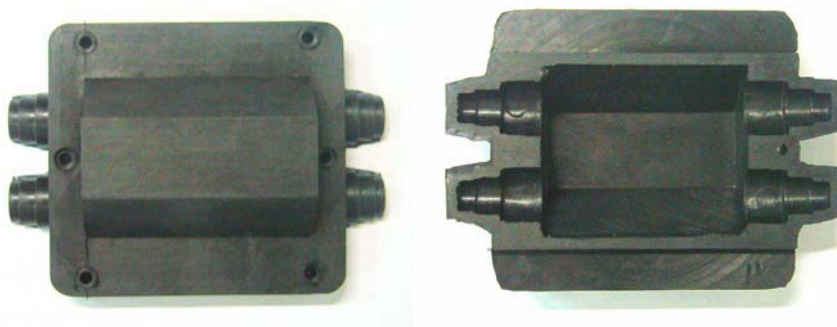
จากแบบพิมพ์เขียว 2 มิติและ 3 มิติที่ได้ทำการออกแบบ จะถูกนำไปจัดทำแม่พิมพ์โลหะ 2 ชุด สำหรับการขึ้นรูปฉนวนข้อรัดสายไฟฟ้าทั้งสองชิ้น โดยงานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ในการจัดทำแม่พิมพ์โลหะ การขึ้นรูปฉนวนทั้งสองชิ้นใช้วิธีการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แบบกดอัด รูปที่ 18 แสดงลักษณะของแม่พิมพ์โลหะสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงาน และรูปที่ 19 แสดงชิ้นงานสำเร็จของฉนวนข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจี ซึ่งประกอบด้วยฉนวน 2 ชิ้น คือ ชิ้นบนและชิ้นล่าง โดยทั้งนี้ ขั้นตอนการออกแบบและผลิตชิ้นงานฉนวนข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีโดยสรุปแสดงดังรูปที่ 20



รูปที่ 18 แม่พิมพ์โลหะสำหรับขึ้นรูปชิ้นงาน

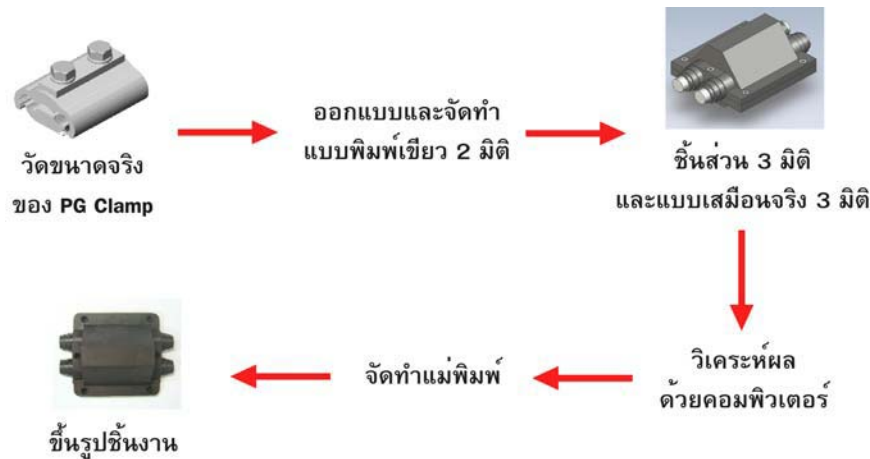


(ก) จนวนขั้วรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีขึ้นบน



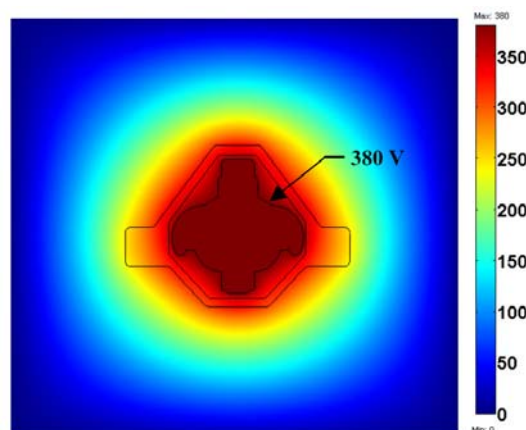
(ข) จนวนขั้วรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีขึ้นล่าง

รูปที่ 19 จนวนขั้วรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีจากยางพาราผสมยางอีพียูเอ็ม

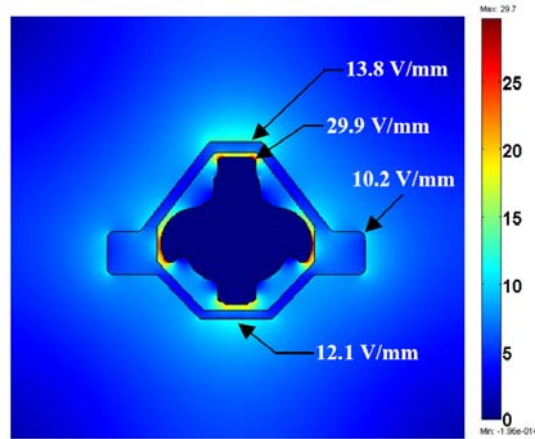


รูปที่ 20 สรุปขั้นตอนการออกแบบและผลิตชิ้นงานนวนหุ้มข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจี

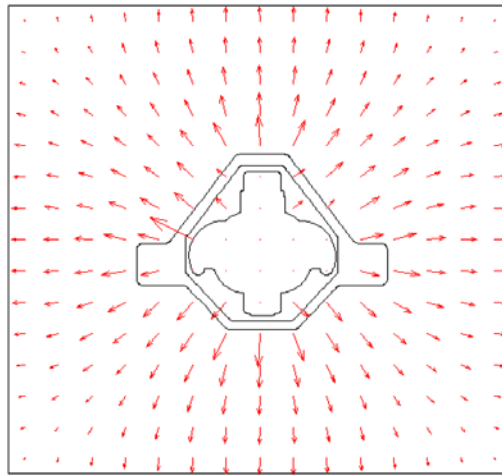
ในส่วนของการจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ ได้นำแบบพิมพ์เขียว 2 มิติและ 3 มิติไปใช้ร่วมกับโปรแกรมประยุกต์ไฟในเอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าบริเวณนนวน แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ ประกอบด้วยข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีและนนวนด้านตัดขวาง การคำนวณกำหนดให้ข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีและสายไฟฟ้าเป็นตัวนำไฟฟ้า (ไม่คิดรอยต่อต่างๆที่เกิดขึ้นจากตัวข้อรัดสายไฟฟ้ากับ สายไฟฟ้า และ สลักยึด) มีค่าความนำไฟฟ้า (σ) เท่ากับ 3.774×10^7 และมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 380 โวลต์ นนวนห่อหุ้ม (ไม่คิดรอยต่อของนนวน) กำหนดมีค่าที่เปอร์มิตติวิตี (ϵ_r) เท่ากับ 2.2 มีค่าความนำไฟฟ้า (σ) เท่ากับ 0.507×10^{-9} โดยมีอากาศล้อมรอบตัวข้อรัดสายไฟฟ้าและตัวนนวนยาง ในการคำนวณไม่คิดประจุต่าง (ρ_0) ที่เกิดขึ้นบริเวณตัวนำ นนวนและอากาศโดยรอบ การคำนวณด้วยวิธีไฟในเอลิเมนต์กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนยินยอมของผลเฉลยเท่ากับ 1×10^{-6} เปอร์เซ็นต์ ผลการจำลองศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 21 และ รูปที่ 22 ตามลำดับ



รูปที่ 21 ลักษณะการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าบริเวณโดยรอบนนวน



(ก) ความเครียดสนามไฟฟ้า



(ข) ทิศทางของสนามไฟฟ้า

รูปที่ 22 ลักษณะการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบริเวณโดยรอบนวน

จากผลการจำลองศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้า จะเห็นได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดบริเวณขั้วรัศยไฟฟาที่อยู่ใกล้กับนวนมีค่าเท่ากับ 29.9 V/mm ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของยางคงรูปที่ทำการทดสอบคือ 2 kV/mm หรือ 2000 V/mm ดังนั้นความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นไม่สามารถที่จะให้นวนเกิดความเสียหายขึ้นได้ จึงยืนยันได้ว่านวนที่ออกแบบและวัสดุนวนที่เลือกใช้สามารถทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้เป็นอย่างดี

การประกอบนวนขั้วรัศยไฟฟาเข้ากับขั้วรัศยไฟฟาแบบพีจีแสดงดังรูปที่ 23 การประกอบใช้งานขั้วรัศยไฟฟาแบบพีจี 2 สลักจะถูกนวนหัวไว้ภายใน ในลักษณะการประกบนวนทั้งสองชิ้นเข้าหากัน จากนั้นยึดด้วยสกรูสแตนเลสที่ไม่เป็นสนิม ในส่วนของสายไฟฟาจะถูกร้อยออกมาตามขั้วรองรับสายไฟ ซึ่งถูกเจียนตัดให้มีขนาดพอเหมาะกับสายไฟฟาที่ใช้งาน

จากนวนขั้วรัศยไฟฟาแบบพีจีที่ผลิตเป็นชิ้นงานตัวอย่าง ได้นำไปทดลองติดตั้งใช้งานจริงกับขั้วรัศยไฟฟาแบบพีจีในระบบจำหน่ายแรงต่ำ $220/380 \text{ V}$ ของการไฟฟาสวนภูมิภาค ณ หมู่บ้านชมฟ้า-วารงกุล

รังสิต คลอง 2 ดังแสดงในรูปที่ 24 โดยได้รับความอนุเคราะห์จากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคอำเภอธัญบุรี และโครงการพัฒนาระบบบริหารจัดการหม้อแปลงและระบบจำหน่ายแรงต่ำแบบอัตโนมัติ[9]



รูปที่ 23 ลักษณะการติดตั้งฉนวนเข้ากับข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจี 2 สลัก



รูปที่ 24 การติดตั้งใช้งานฉนวนข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีในระบบจำหน่ายของ กฟภ.

5. สรุป

งานวิจัยนี้ได้พัฒนานวนสำหรับข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจี 2 สลักขนาด 25 – 95 ตร.มม ซึ่งเป็นข้อรัดสายไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่ายแรงต่ำ 220/380V ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีดังกล่าวใช้สำหรับต่อแยกสายไฟจากระบบจำหน่ายไปยังมิเตอร์ผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละราย โดยนวนสำหรับข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีที่พัฒนาขึ้นจะช่วยให้การต่อสายไฟมีความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน ป้องกันการเกิดการลัดวงจร อันไม่พึงประสงค์ รวมถึงป้องกันการชำรุดเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับข้อรัดสายไฟฟ้าอันเนื่องจากความชื้นและละอองน้ำได้

วัสดุที่นำมาใช้ทำนวนเป็นยางพาราผสมยางอีพีดีเอ็มในอัตราส่วน 60:40 นั่นคือประกอบด้วยยางพารา 60 phr และยางอีพีดีเอ็ม 40 phr จากการทดสอบคุณสมบัติยางคงรูปที่นำมาทำนวน พบว่า ยางคงรูปดังกล่าวมีค่าความแข็ง(Shore A) ก่อนและหลังบ่มแรงเท่ากับ 62.2 ± 0.3 ซอร์เอและ 65.9 ± 0.3 ซอร์เอตามลำดับ ก่อนบ่มแรงสามารถรับแรงดึงได้เท่ากับ 10.09 ± 0.58 MPa และหลังจากบ่มแรงสามารถรับแรงดึงได้เท่ากับ 7.77 ± 1.20 MPa ยางคงรูปมีความต้านทานเชิงปริมาตรสูงสุดเท่ากับ $1.97 \times 10^9 \Omega\text{-cm}$ ความต้านทานเชิงผิวเท่ากับ $0.56 \times 10^{10} \Omega/\text{square}$ และมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่กำลังเท่ากับ 2 kV/mm

นวนข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีที่ได้ออกแบบมีลักษณะเป็นนวนสองชั้นที่สามารถประกบยึดติดเข้าหากันได้ การประกบเข้าหากันจะยึดติดด้วยสกรูสแตนเลสผ่านรูเจาะที่ทะลุถึงกันระหว่างนวนทั้งสองชั้น บริเวณส่วนปลายทั้งสองของนวนมีช่องสำหรับรองรับสายไฟฟ้าทั้งสองด้าน ลักษณะเป็นครึ่งวงกลมประกบเข้าหากันและมีเส้นรัศมีที่แตกต่างกันสามระดับ นวนชั้นบนและชั้นล่างจะมีปลั๊กคอกสูงขึ้นมาสำหรับป้องกันการเคลื่อนตัว ป้องกันความชื้นและละอองน้ำ การประกอบนวนชั้นบนและนวนชั้นล่างเข้ากับข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจี ทำโดยการประกบด้านล่างและบนเข้าหากัน ข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีจะถูกห่อหุ้มอยู่ภายในและสายไฟฟ้าจะต่อยื่นออกมาผ่านช่องรองรับสายไฟฟ้าที่ถูกตัดให้มีขนาดเหมาะสมกับสายไฟฟ้า

6. ข้อเสนอแนะ

- ควรทำการทดสอบการใช้งานจริงในระยะยาว ณ ระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าเพิ่มเติม เพื่อหาข้อบกพร่องของนวนที่ทำการออกแบบ และนำมาปรับปรุงสูตรยาง รูปร่าง ให้มีความเหมาะสมยิ่งขึ้น
- ยางธรรมชาติผสมยางอีพีดีเอ็มมีค่าความแข็งที่จำกัดจึงทำให้การออกแบบระบบล๊อคของนวนเป็นไปได้ยาก ดังนั้นควรมีการวิจัยและพัฒนาเพื่อปรับปรุงสูตรยางให้วัสดุมีความแข็งเพิ่มขึ้นแต่ไม่แตกหักง่าย หรือปรับปรุงรูปแบบของนวน เพื่อให้ระบบล๊อคของนวนสามารถยึดติดด้วยตัวนวนเองไม่จำเป็นต้องใช้นอตหรือสกรูยึดติดแต่อย่างใด
- การนำนวนไปใช้กับระดับแรงดันสูงขึ้น(มากกว่า 1kV) อาจจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนสูตรยางและสารตัวเติมบางตัว เพื่อเพิ่มคุณสมบัติความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้น

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Guo-Ping Luo, Laing-Jun, and Xu i-Gao Zhang, **Analysis of Parallel Groove Clamp with Finite Element Method**, Beijing University of Posts & Telecommunications, 2001.
- [2] วิวรรณ มั่นคงวิวัฒน์, สมศักดิ์ แก้วบุญมา, สุทัศน์ กลมเกลียว, และเอกชัย สุวรรณชาติ, **การศึกษาและพัฒนา Connectors สำหรับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549.

- [3] ต่อศักดิ์ เลิศศรีสกุลรัตน์, ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล, และศิริชัย ขำสุวรรณ, การพัฒนาน้ำยาธรรมชาติสำหรับเคลือบผิวโลหะเหล็ก เพื่อป้องกันการกัดกร่อน, มหาวิทยาลัยสยาม, 2548.
- [4] พงษ์ธร แซ่ฮ้อย และชาคริต สิริสิงห์, การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล ความทนทานต่อความร้อนและความต้านทานต่อไอโซนของยางผสม NR/EPDM, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2548.
- [5] R.S. Timsit and J.D. Sprecher, **Energy Losses in Power Tap-Connectors**, Proceeding of the 8th International Conference Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance, pp.285-296, 1998.
- [6] J.J. Schindler, R.T. Axon and R.S. Timsit, **Mechanical and Electrical Contact Properties of Wedge-Connectors**, IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology-Part A Vol.19 No.3, September 1996.
- [7] Kennedy Space Center, **Galvanic Corrosion**, Available from <http://corrosion.ksc.nasa.gov/html/galcorr.htm>, [Online].
- [8] พงษ์ธร แซ่ฮ้อย, ยาง : ชนิด สมบัติ และการใช้งาน, พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพฯ : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2548.
- [9] โครงการพัฒนาระบบบริหารจัดการหม้อแปลงและระบบจำหน่ายแรงต่ำแบบอัตโนมัติ, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2550.

ภาคผนวก

การออกแบบฉนวนสำหรับข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีจากยางธรรมชาติ

PG-Clamp Insulation Design from Natural Rubber

พุดพิงษ์ เรืองพิศาล สมชาย เป็นสูงเนิน และ นิตพิงษ์ ปานกลาง

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

เลขที่ 39 หมู่ 1 ถ.รังสิต-นครนายก ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

โทรศัพท์: 0-2549-3429 Email: p.nitipong@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้ นำเสนอการออกแบบฉนวนสำหรับข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีสำหรับขนาดสาย 25-95 ตร.มม. ซึ่งใช้ในระบบจำหน่ายแรงดันของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค วัสดุฉนวนที่ใช้เป็นยางธรรมชาติผสมยางอีพียีเอ็มเพื่อเพิ่มคุณสมบัติความทนทานต่อสภาพแวดล้อม อาทิเช่น แสงแดด ความร้อน และโอโซน เป็นต้น วัสดุฉนวนประกอบด้วยส่วนผสมของยางพารา 60% กับยางอีพียีเอ็ม 40% จากการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุฉนวน จากกรมวิทยาศาสตร์บริการและศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย ตามมาตรฐาน ASTM D149, ASTM D257-99 และ ASTM D412 พบว่า ยางพาราผสมยางอีพียีเอ็มในอัตราส่วน 60:40 มีค่าสภาพต้านทานเชิงปริมาตร (Volume Resistivity) ประมาณ $1.97 \times 10^9 \Omega\text{-cm}$, สภาพต้านทานเชิงผิว (Surface Resistivity) ประมาณ $5.6 \times 10^{10} \Omega/\text{square}$ รวมถึงสามารถทนแรงดึง (Tensile Strength) ได้สูงสุด 10.09 Mpa ทั้งนี้ ฉนวนข้อรัดสายไฟฟ้าที่ออกแบบ เมื่อนำไปใช้กับระบบจำหน่ายจะช่วยป้องกันการลัดวงจรที่อาจเกิดขึ้นและลดการชำรุดเสียหายบริเวณจุดต่อได้ รวมถึงทำให้พนักงานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคมีความปลอดภัยในการปฏิบัติงานเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: ข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจี, ยางธรรมชาติ, ยางอีพียีเอ็ม

Abstract

This paper presents the 25 – 95 sq. mm. PG-Clamp insulator design. PG-Clamp is a popular wire connector that used in low-voltage distribution system of Provincial Electricity Authority (PEA). Insulator material has been used is natural rubber and EPDM rubber, composed between a Para rubber about 60% and EPDM rubber about 40% for increasing a weather resistance properties such as sunlight, ozone, heat etc. From physical testing found that, Insulator material has a volume resistivity and surface resistivity about $1.97 \times 10^9 \Omega\text{-cm}$ and $5.6 \times 10^{10} \Omega/\text{square}$, consequently. In addition, Insulator material has a maximum tensile strength equal to 10.09 MPa. An insulator has been design can be protected an undesirable short-circuit and reduced a damage of wire connection. Additionally, PG-Clamp insulator could be increasing a safety in operation of PEA officers.

Keywords: Parallel Groove Clamp, Natural Rubber, EPDM Rubber.

1. บทนำ

การต่อสายไฟฟ้าในระบบจำหน่ายแรงดัน 220/380V ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค นิยมใช้ข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจี (Parallel Groove Clamp: PG Clamp) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การต่อแยกสายไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายไปยังมิเตอร์รับไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าตามบ้านพักอาศัย การต่อสายในลักษณะดังกล่าว บริเวณจุดต่อจะไม่มีฉนวนป้องกันหรือใช้เพียงเทปพันสายไฟฟ้าพันทับ ณ จุดต่อสายเท่านั้น เมื่อใช้งานไปเป็นระยะเวลานานๆ จะพบปัญหาด้านสภาพแวดล้อม ไม่ว่าจะเป็น การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ความชื้น แสงแดด แสงอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet: UV) บริเวณจุดต่อสายไฟฟ้าจะเกิดฟิล์มออกไซด์ ส่งผลต่อความต้านทานที่จุดสัมผัสระหว่างสายไฟฟ้ากับข้อรัดสายไฟฟ้าสูงขึ้น อีกทั้งยังทำให้เกิดการลัดไฟฟ้าสูญเสียและความร้อน จนก่อความเสียหายให้กับจุดต่อสายดังกล่าวได้ในที่สุด[1]

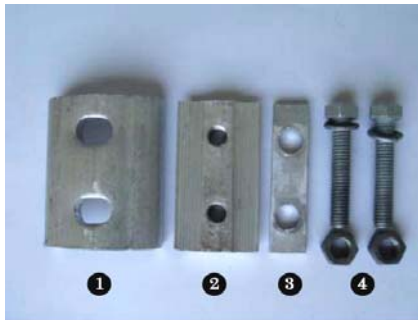
บทความนี้ นำเสนอการออกแบบฉนวนสำหรับข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีสำหรับการต่อสายไฟฟ้าขนาด 25-95 ตร.มม. ฉนวนที่ออกแบบทำจากยางธรรมชาติผสมกับยางสังเคราะห์ในอัตราส่วนที่เหมาะสม[2, 3] เพื่อให้ฉนวนมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อม อาทิเช่น แสงแดด ความร้อน เป็นต้น รวมถึงยังได้มีการทดสอบคุณสมบัติของฉนวนตามมาตรฐาน ASTM D149, ASTM D257-99 และ ASTM D412 จากกรมวิทยาศาสตร์บริการและศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย (Research and Development Center for Thai Rubber Industry: RDCTRI) เพื่อมั่นใจได้ว่าวัสดุที่ใช้ทำฉนวน มีความทนทานและเหมาะสมต่อการใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าภายนอกอาคารได้เป็นอย่างดี

2. ข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจี

ข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการต่อสายไฟฟ้าเพื่อส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าระหว่างตัวนำที่เชื่อมต่อกันอยู่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบจำหน่ายแรงดันของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค มักใช้ข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีในการเชื่อมต่อสายไฟฟ้า อาทิเช่น การต่อแยกสายจากระบบจำหน่ายไปยังมิเตอร์ผู้ใช้ไฟฟ้าและต่อไปยังบ้านพักอาศัย ฯลฯ ข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจี 2 สลักขนาด 25 - 95 ตร.มม. มีลักษณะดังรูปที่ 1 (ก) โดยประกอบด้วยส่วนสำคัญๆ 4 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 1 (ข)



(ก) ลักษณะของข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจี

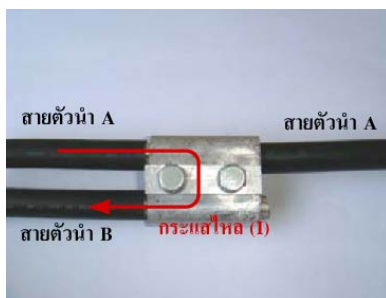


หมายเหตุ 1. ข้อรัดสายไฟฟ้าขึ้นบน
2. ข้อรัดสายไฟฟ้าขึ้นล่าง
3. แผ่นโลหะรองนอตและสลักเกลียว
4. นอตและสลักเกลียว

(ข) ส่วนประกอบต่างๆ ของข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจี
รูปที่ 1 ข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีขนาด 25 - 95 ตร.มม.



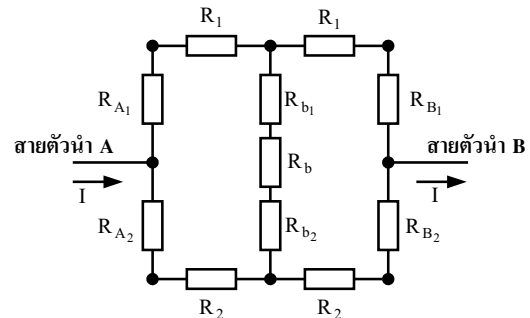
รูปที่ 2 การใช้ข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีในระบบจำหน่าย



รูปที่ 3 ลักษณะการต่อสายไฟฟ้าด้วยข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจี

รูปที่ 2 แสดงถึงตัวอย่างการใช้งานของข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีในระบบจำหน่ายแรงต่ำ การต่อสายไฟฟ้าเข้ากับข้อรัดสายไฟฟ้ามีลักษณะดังรูปที่ 3 โดยสายไฟฟ้าทั้งสองเส้นจะถูกประกบติดด้วยข้อรัดสายไฟฟ้า

ขึ้นบนและขึ้นล่าง แล้วยึดด้วยนอตและสลักเกลียวสองตัว เมื่อมีกระแสไหลผ่านบริเวณจุดต่อ ข้อรัดสายไฟฟ้าจะเป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อวงจรระหว่างสายตัวนำ A กับสายตัวนำ B โดยทิศทางการไหลของกระแส (I) จะไหลจากสายตัวนำ A ไปยังสายตัวนำ B เมื่อกำหนดให้สายตัวนำ A เป็นสายเฟสในระบบจำหน่ายแรงต่ำแบบ 3 เฟส 4 สาย ส่วนสายตัวนำ B เป็นสายที่ต่อแยกไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละราย จากการต่อในลักษณะดังกล่าว และทิศทางการไหลของกระแสที่เกิดขึ้น เราสามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลทางไฟฟ้าที่จุดต่อระหว่างสายทั้งสองเส้นได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 วงจรสมมูลการต่อสายไฟฟ้าด้วยข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจี

จากรูปที่ 4 วงจรสมมูลที่ได้มีลักษณะเป็นวงจรบริดจ์สมดุลที่ประกอบด้วยความต้านทานในแต่ละส่วน คือ R_1 และ R_2 เป็นความต้านทานรวมของข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีขึ้นบนและล่าง, R_{A1} และ R_{A2} เป็นความต้านทานรวม ณ จุดสัมผัสระหว่างสายตัวนำ A กับข้อรัดสายไฟฟ้าขึ้นบนและขึ้นล่าง, R_{B1} และ R_{B2} เป็นความต้านทานรวม ณ จุดสัมผัสระหว่างสายตัวนำ B กับข้อรัดสายไฟฟ้าขึ้นบนและขึ้นล่าง, R_{b1} และ R_{b2} เป็นความต้านทานรวม ณ จุดสัมผัสระหว่างนอตและสลักเกลียวกับข้อรัดสายไฟฟ้าขึ้นบนและขึ้นล่าง ตามลำดับ และ R_b เป็นความต้านทานรวมของนอตทั้งสองตัว จากวงจรสมมูลจะเห็นว่า สายตัวนำ A และสายตัวนำ B จะถูกเชื่อมต่อด้วยค่าความต้านทาน เมื่อมีการใช้งานไปเป็นเวลานาน จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทาน ณ จุดดังกล่าว จากฟิล์มออกไซด์ที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากความชื้น

3. การออกแบบฉนวน

การออกแบบฉนวนสำหรับข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีชนิด 2 สลัก ขนาด 25 - 95 ตร.มม. ใช้วัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางสังเคราะห์ในอัตราส่วน 60:40 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการผสมยางทั้งสองชนิดเข้าด้วยกัน[3, 4] ยางธรรมชาติที่ใช้ได้แก่ยางพารา ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่สามารถหาได้ง่ายภายในประเทศ เนื่องจากประเทศไทยเป็นผู้ผลิตและส่งออกยางพาราอันดับ 1 ของโลก โดยมีพื้นที่ปลูกยางพารามากกว่า 20 ล้านไร่[5] ในส่วนของยางสังเคราะห์ที่ใช้เป็นยางเอทิลีน โพรพิลีน ไดอีนหรืออีพีดีเอ็ม(Ethylene Propylene Diene Rubber: EPDM) การผสมยางอีพีดีเอ็มกับยางพาราเพื่อเป็นการเพิ่มคุณสมบัติความทนทานต่อ

สภาพแวดล้อม วัสดุและสารเคมีที่จำเป็นประกอบด้วย ยางธรรมชาติ (เกรด STR 5L), ยางอีพิดีเอ็ม (Nordel IP 2340), ซิงค์ออกไซด์ (ZnO), กรดสเตียริก, ไดโซลโคเลอซิลเบนโซโทอะโซลซัลฟีนามิด (TBBS), เทพระเมทิลไทอูเรมไดซัลไฟด์ (TMTD), ผงกำมะถัน (S) และผงเขม่าดำ (Carbon-black:CB N330) โดยมีปริมาณแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 วัตถุดิบที่ใช้ในการทำฉนวน

วัตถุดิบ	ปริมาณ(phr)
ยางธรรมชาติ (STR 5L)	60.0
ยางเอทรีลีนโพรพิลีนไดอินโมโนเมอร์ (EPDM)	40.0
ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)	5.0
กรดสเตียริก (Stearic acid)	2.0
ไดโซลโคเลอซิลเบนโซโทอะโซลซัลฟีนามิด (TBBS)	1.0
เทพระเมทิลไทอูเรมไดซัลไฟด์ (TMTD)	0.2
กำมะถัน (Sulphur : S)	1.8
ผงเขม่าดำ (Carbon-black:CB N330)	3.0

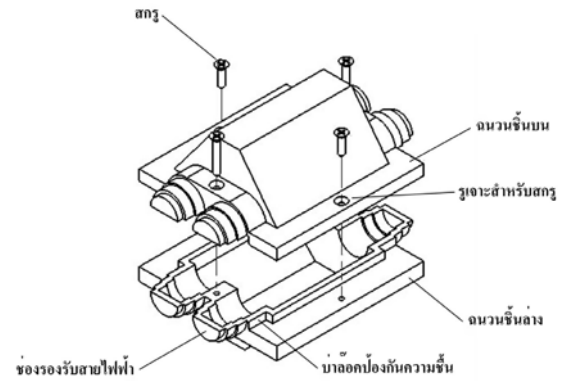
การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของยางตามสูตรในตารางที่ 1 ผู้วิจัยได้ส่งตัวอย่างชิ้นวัสดุขนาด $200 \times 200 \times 2.5$ มิลลิเมตรไปทดสอบ ณ กรมวิทยาศาสตร์บริการ และศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย ตามมาตรฐาน ASTM D149, ASTM D257-99 และ ASTM D412 ประกอบด้วย การทดสอบการคงรูปของยาง, การทดสอบความแข็ง, การทดสอบสมบัติการรับแรงดึง, การทดสอบสภาพต้านทานเชิงผิวและเชิงปริมาตร รวมถึงการทดสอบความคงทนของฉนวนทางไฟฟ้า โดยผลการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุฉนวนตามสูตรยาง

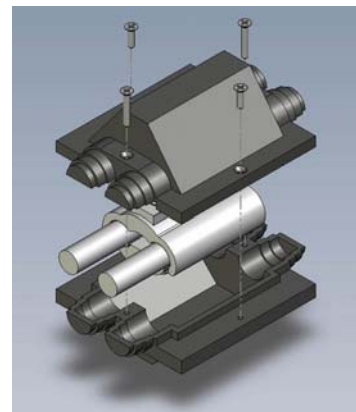
คุณสมบัติของฉนวน	
การคงรูป(Tc90, min)	12.36
ความแข็ง(Shore A, IRHD)	62.2
การรับแรงดึง(MPa)	10.09
สภาพต้านทานเชิงผิว(Ω /square)	0.56×10^{10}
สภาพต้านทานเชิงปริมาตร(Ω -cm)	$> 1.97 \times 10^9$
ความคงทนของฉนวนทางไฟฟ้า(kV/mm)	2.5

ฉนวนสำหรับข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีที่ออกแบบมีลักษณะดังรูปที่ 5 ประกอบด้วยฉนวนชั้นบนและฉนวนชั้นล่างที่สามารถประกบยึดติดเข้าหากันได้ การประกบเข้าหากันจะยึดติดด้วยสกรูสแตนเลสหัวฝัง M2.5 $\times$ 8 DIN964-48 ที่ด้านทั้งสี่ โดยฉนวนชั้นบนและชั้นล่างมีรูเจาะทะลุสำหรับขันสกรูถึงกัน บริเวณส่วนปลายทั้งสองของฉนวน มีช่องสำหรับรองรับสายไฟฟ้าทั้งสองด้านลักษณะเป็นครึ่งวงกลมประกบเข้าหากันและมีเส้นรศมีที่แตกต่างกันสามระดับ ซึ่งสามารถเลื่อนตัดให้มีขนาดเหมาะสมกับสายไฟฟ้าได้ ที่ฉนวนชั้นบนและชั้นล่างจะมีบอลล็อกสูงขึ้นมา สำหรับป้องกันการเคลื่อนตัว ป้องกันความชื้นและองน้ำ

เข้าสู่ภายใน การประกอบฉนวนชั้นบนและฉนวนชั้นล่างเข้ากับข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจี แสดงดังรูปที่ 6 โดยการประกบด้านล่างและบนเข้าหากัน ข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจีจะถูกห่อหุ้มอยู่ภายในและสายไฟฟ้าจะต่อยื่นออกมาผ่านช่องรองรับสายไฟฟ้า



รูปที่ 5 ส่วนประกอบของฉนวนข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจี



รูปที่ 6 แบบจำลอง 3 มิติแสดงการประกอบฉนวนเข้ากับข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจี

4. สรุป

จากฉนวนสำหรับข้อรัดสายไฟฟ้าแบบพีจี 2 สลักขนาด 25 - 95 ตร.มม. ที่ได้ทำการออกแบบจะทำให้การต่อสายไฟฟ้าในระบบจำหน่ายมีความปลอดภัย ป้องกันการลัดวงจรที่อาจเกิดขึ้นและลดการชำรุดเสียหายบริเวณจุดต่อสายไฟฟ้าได้ รวมถึงทำให้พนักงานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคมีความปลอดภัยในการปฏิบัติงานเพิ่มขึ้น จากการออกแบบ วัสดุที่ใช้ทำฉนวนข้อรัดสายไฟฟ้าเป็นยางธรรมชาติผสมยางอีพิดีเอ็มในอัตราส่วน 60:40 เพื่อเพิ่มคุณสมบัติความทนทานต่อสภาวะแวดล้อม โดยจากการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ พบว่า ฉนวนมีคุณสมบัติการคงรูปอยู่ที่ 12.36 นาที ความแข็งเท่ากับ 62.2 IRHD และสามารถรับแรงดึงสูงสุดได้เท่ากับ 10.09 MPa นอกจากนั้นวัสดุที่ใช้ทำฉนวนยังมีสภาพต้านทานเชิง

ผิวและสภาพต้านทานเชิงปริมาตรเท่ากับ $5.6 \times 10^{10} \Omega/\text{square}$ และ $1.97 \times 10^9 \Omega\text{-cm}$ ตามลำดับ และมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่กำลังอยู่ที่ 2.5 kV/mm โดยทั้งนี้ ปัจจุบันฉนวนขี้อัดสายไฟฟ้าแบบพีจีกำลังอยู่ในขั้นตอนการผลิตต้นแบบและทดสอบใช้งานจริง รวมถึงอยู่ระหว่างการยื่นขอจดอนุสิทธิบัตรจากกรมทรัพย์สินทางปัญญา

5. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการการพัฒนาฉนวนขี้อัดสายไฟฟ้าแบบพีจีจากยางพารา ภายใต้โครงการวิจัยขนาดเล็กเรื่องยางพารา (small Projects on Rubber: SPR) ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย(สกว.) ผู้วิจัยจึงขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย(สกว.) มา ณ โอกาสนี้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] ณัฐพล นิพันธ์ไพศาล, “การศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นกับคอนเนคเตอร์ต่อแยกสายที่ติดตั้งในระบบจำหน่ายไฟฟ้า”, วิทยานิพนธ์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [2] R.C.C. Rocha, L.A. da Costa, M.R. Soares, R.P. Leme and J.A. La Salvia, “New Electrical Connection Technology for Covered Overhead Distribution Lines”, 1999 IEEE Transmission and Distribution Conference Vol.2, pp.623-629, April 1999.
- [3] พงษ์ธร แซ่ฮุย และชาคริต สิริสิงห, “การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล ความทนทานต่อความร้อนและความต้านทานโอโซนของยางผสม NR/EPDM”, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2548.
- [4] นพิตา ทัญธิระนันท์ และคณะ, “วัลคาไนเซชันของยางผสมยางอีพดีเอ็มและยางธรรมชาติโดยใช้เปอร์ออกไซด์เป็นสารวัลคาไนเซชันร่วม”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17, 2550.
- [5] ชวลิต หุ่นแก้ว, “การปลูกยางพารา”, กองส่งเสริมพืชสวน, <http://www.yupparaj.ac.th>.

ประวัติผู้เขียน



พุฒิ พงษ์ เรืองพิศาล จบการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง(ปวส.) จากวิทยาลัยเทคนิคธนบุรี พ.ศ. 2544 ปัจจุบันเป็นนักศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



สมชาย เปียนสูงเนิน วศ.บ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี พ.ศ. 2540 วศ.ม. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2548 ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สาขางานวิจัยที่สนใจ ได้แก่ ระบบไฟฟ้ากำลัง การประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์กับระบบไฟฟ้ากำลัง



นิติพงศ์ ปานกลาง วศ.บ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี พ.ศ. 2542 วศ.ม. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2547 ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สาขางานวิจัยที่สนใจ ได้แก่ วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าด้วยวิธีเชิงตัวเลข