รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์จากยางพารา

โดย นิติพงศ์ ปานกลางและคณะ

มกราคม 2557

สัญญาเลขที่ RDG5550078

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์จากยางพารา

คณะผู้วิจัย	สังกัด
1. นายนิติพงศ์ ปานกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
2. นายชาคริต อาคนเคน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
3. นายดิลก ถิ่นพังงา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ชุดโครงการทุนวิจัยขนาดเล็กเรื่องยางพารา(Small Project on Rubber: SPR)

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย วช. สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปรายงานสำหรับผู้บริหาร

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) ฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์จากยางพารา

(ภาษาอังกฤษ) Fuse Cut-Out Terminal Insulator from Para Rubber

ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานสังกัด ที่อยู่

ชื่อ-สกุล นายนิติพงศ์ ปานกลาง

หน่วยงาน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ที่อยู่ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

โทรศัพท์/โทรสาร 0 2549 3420/0 2549 3422

E-mail p.nitipong@gmail.com

นักศึกษา/ผู้ร่วมทำวิจัย

ชื่อ-สกุล นายชาคริต อาคนเคน

โทรศัพท์/โทรสาร 0 8 0265 6861

ชื่อ-สกุล นายดิลก ถิ่นพังงา

โทรศัพท์/โทรสาร 0 8 4446 8301

ระยะเวลาดำเนินการ 12 เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 สิงหาคม 2555 ถึงวันที่ 31 กรกฎาคม 2556

ปัญหาที่ทำวิจัยและความสำคัญ

ฟิวส์คัทเอาท์(Fuse Cutout) เป็นอุปกรณ์ในระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้าแรงสูงทำหน้าที่ป้องกันการลัดวงจรทางด้านแรงสูงและเป็นสวิตช์สำหรับตัดต่อวงจรไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงระบบจำหน่าย ฟิวส์คัทเอาท์ที่ใช้งานในปัจจุบัน บริเวณจุดต่อสายของฟิวส์คัทเอาท์ทั้งด้านบนและด้านล่างจะไม่มีฉนวนป้องกัน จึงทำให้มีโอกาสเกิดการลัดวงจรอันเนื่องมากจากสัตว์ปีกและสัตว์เลื้อยคลานต่างๆ ได้ อีกทั้งในกรณีที่มีการติดตั้งหม้อแปลงระบบจำหน่ายในเขตชุมชนใกล้กับอาคารบ้านเรือน ถึงแม้ว่าจะมีการใช้สายไฟฟ้าหุ้มฉนวนในการเชื่อมต่อวงจรไฟฟ้า แต่การที่ไม่มีฉนวนหุ้มจุดต่อสายบริเวณฟิวส์คัทเอาท์ก็ยังคงทำให้เกิดความรู้สึกไม่ปลอดภัยต่อผู้ใช้ไฟฟ้าขึ้นได้

โครงการวิจัยนี้ จึงออกแบบและพัฒนาฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ เพื่อป้องกันการชำรุดเสียหายและการลัดวงจรบริเวณจุดต่อสายของฟิวส์คัทเอาท์ วัสดุฉนวนที่ใช้ทำจากยางพาราเป็นวัสดุหลัก โดยผลผลิตจากการวิจัยเป็นต้นแบบฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ที่สามารถนำไปติดตั้งใช้งานจริงในระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้าได้ และมีความเป็นไปได้ที่นำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์ต่อไปในอนาคต

วัตถุประสงค์

ออกแบบและพัฒนาฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ชนิด MC ระดับแรงดันใช้งานสูงสุด 33 kV ตามมาตรฐาน ANSI C37.42 โดยใช้ยางพาราเป็นวัตถุดิบหลักในการทำฉนวน

ผลการดำเนินงาน

ฟิวส์คัทเอาท์ หรือเรียกอีกอย่างว่าดรอปเอาท์ฟิวส์(Drop Out Fuse) เป็นอุปกรณ์ป้องกันและตัดต่อวงจรทางด้านระบบจำหน่ายแรงสูง โดยทำหน้าที่ป้องกันการลัดวงจรและป้องกันกระแสเกินให้กับหม้อแปลงระบบจำหน่าย ฟิวส์คัทเอาท์ที่ใช้ในระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้าเกิดการชำรุดเสียหายได้จากหลายสาเหตุ อาทิเช่น การชำรุดเนื่องจากสัตว์และภัยธรรมชาติ ฯลฯ ส่วนประกอบของฟิวส์คัทเอาท์ที่เสียหายบ่อยครั้ง ได้แก่ ลูกถ้วยฉนวนปอร์ซเลน(Porcelain Insulator), จุดต่อสายไฟฟ้า, กระบังหน้าสัมผัสบน-ล่าง กระบอกฟิวส์และหน้าสัมผัสของกระบอกฟิวส์ จุดต่อสายไฟฟ้ามีตัวเลขความเสียหายอยู่ที่ประมาณร้อยละ 18

สูตรยางที่ใช้ทำฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ทำจากยางพาราผสมยางอีพีดีเอ็มในอัตราส่วน 60:40 และได้เติมสารป้องกันการติดไฟ รวมถึงสารป้องกันการเสื่อมสภาพ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติความทนทานต่อสภาพแวดล้อมและปรับปรุงสมบัติการติดไฟของยางธรรมชาติ การทดสอบคุณสมบัติทางกลและทางไฟฟ้าของฉนวนยางคงรูปอ้างอิงข้อกำหนดคุณสมบัติของวัสดุฉนวนของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ประกอบด้วย การทดสอบสมบัติการรับแรงดึง (ASTM D412) ทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่ง, การทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่กำลัง (IEC60243-1) ทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต และการทดสอบการทนต่อการลามไฟ (IEC 60695-11-10 หรือ UL94) จากการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุฉนวน พบว่า วัสดุฉนวนที่ใช้สำหรับทำฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์มีสมบัติการรับแรงดึงเป็นไปตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ก่อนการบ่มเร่งวัสดุฉนวนสามารถรับแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 5.62 MPa และมีระยะยืด ณ จุดขาดเท่ากับ 370.28% ซึ่งมีค่ามากกว่า 3.92 MPa และ 300% ตามลำดับ หลังบ่มเร่งวัสดุฉนวนสามารถรับแรงดึงสูงสุดลดลงเหลือ 3.23 MPa และมีระยะยืด ณ จุดขาดลดลงเหลือ 285.64% สมบัติรับแรงดึงที่ลดลงจากการบ่มเร่งยังคงมีค่ามากกว่า 0.31 MPa และ 240%

สำหรับความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของวัสดุฉนวน ก่อนการบ่มเร่งด้วยรังสียูวี วัสดุฉนวนมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า 20.1 kV/mm หลังจากการบ่มเร่งด้วยรังสียูวีเป็นเวลา 420 ชั่วโมง ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของวัสดุฉนวนลดลงเหลือ 17.6 kV/mm หรือลดลงคิดเป็น 12.44% แต่ทั้งนี้ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของวัสดุฉนวนลดลงยังคงมีค่ามากกว่า 10 kV/mm นอกจากนั้น ผลของการเติมสารป้องกันการลามไฟ ทำให้วัสดุฉนวนมีสมบัติการทนต่อการลามไฟผ่านมาตรฐาน UL94 จากการทดสอบชิ้นฉนวนทดสอบจำนวน 10 ชิ้น ฉนวนทุกชิ้นสามารถทนต่อการลามไฟได้ในระดับ V-0 นอกจากนั้น ฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ที่ขึ้นรูปเป็นชิ้นงานแล้ว ฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ต้องทำการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าความถี่กำลังในสภาวะแห้งที่ระดับแรงดัน 40 kV จากการทดสอบฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ทั้งหมด 5 ชุด ฉนวน 1 ชุดประกอบด้วยฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ด้านบนและด้านล่าง ผลปรากฏว่า ฉนวนทุกชุดสามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้มากกว่า 40 กิโลโวลต์ ไม่มีฉนวนชุดใดเกิดการเบรกดาวน์และเกิดวาบไฟตามผิวที่ระดับแรงดันทดสอบแต่อย่างใด

การออกแบบฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ได้นำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการสร้างแบบจำลองสองมิติและสามมิติเพื่อใช้สำหรับจัดทำแม่พิมพ์โลหะและการวิเคราะห์ศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอิลเมนต์ การจำลองผลด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์บนคอมพิวเตอร์ ผู้วิจัยสร้างแบบจำลองสองมิติสำหรับการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่เกิดบริเวณโดยรอบของฟิวส์คัทเอาท์ จุดประสงค์ของการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าเพื่อดูผลของความเครียดสนามไฟฟ้าที่กระทำต่อฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ภายใต้ระดับแรงดันใช้งาน

จากผลการวิเคราะห์ศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้า พบว่า บริเวณฉนวนหุ้มจุดต่อด้านบน ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดมีค่าเท่ากับ 2.19 kV/mm สำหรับฉนวนหุ้มจุดต่อด้านล่าง ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 1.38 kV/mm ในกรณีที่มีวัตถุลงกราวด์มาสัมผัสบริเวณฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ ซึ่งเป็นการจำลองเหตุ

การณ์ที่มีกิ่งไม้ สัตว์เลื้อยคลานหรือสัตว์ปีกมาสัมผัสบริเวณฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ จากผลการจำลอง พบว่า บริเวณฉนวนจุดต่อด้านบน เมื่อมีวัตถุลงกราวด์มาสัมผัสกับพื้นผิวทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 9.02 kV/mm การสัมผัสของวัตถุลงกราวด์บริเวณฉนวนจุดต่อด้านล่างทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 12.64 kV/mm จากผลการจำลองสนามไฟฟ้าทั้งหมด ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นบริเวณจุดต่อด้านบนและด้านล่างมีค่าต่ำกว่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนที่ได้จากการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60243-1 ด้วยเหตุนี้ ฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ที่ออกแบบและพัฒนาขึ้น จึงสามารถทนต่อสภาพการใช้งาน ณ ระดับแรงดันไฟฟ้า 33 kV ได้โดยที่ไม่เกิดการเบรกดาวน์ของฉนวนขึ้น

นอกจากนั้น ประเด็นเรื่องความหนาของฉนวนที่มีต่อความเครียดสนามไฟฟ้าจากการสัมผัสของวัตถุลงกราวด์ การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าได้กำหนดให้ฉนวนมีความหนาเท่ากับ 1 mm, 2 mm, 3 mm และ 4 mm ตามลำดับ จากผลการจำลอง พบว่า ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ความหนาของฉนวนเท่ากับ 2 mm, 3 mm และ 4 mm มีค่าต่ำกว่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของฉนวน แต่เมื่อลดความหนาของฉนวนลงเหลือ 1 mm ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดมีค่าเท่ากับ 22.41 kV/mm ความเครียดสนามไฟฟ้าดังกล่าวมีค่าสูงกว่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของฉนวน จึงมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดการเบรกดาวน์ของฉนวนขึ้นได้ถ้าฉนวนมีความหนาเพียง 1 mm

สำหรับการติดตั้งใช้งานในระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้า ผู้วิจัยได้นำฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ไปทดสอบติดตั้งใช้งานจริงในระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้าแรงสูง 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคอำเภอธัญบุรี ในสองลักษณะคือ แบบแรกเป็นการติดตั้งฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์กับฟิวส์คัทเอาท์บริเวณต้นสายส่ง โดยฟิวส์คัทเอาท์ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ตัดตอนและอุปกรณ์ป้องกันสายส่ง ส่วนแบบที่สองเป็นการติดตั้งฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์กับฟิวส์คัทเอาท์ที่ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ตัดตอนและอุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลงระบบจำหน่ายที่ติดตั้งแบบเสาต้นเดียว

สรุปผลการวิจัย

ฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์พัฒนาจากวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางอีพีดีเอ็มเพื่อเพิ่มคุณสมบัติความทนทานต่อสภาพแวดล้อม รวมถึงการใช้อะลูมิเนียมไทรไฮเดรตเพื่อทำให้วัสดุฉนวนมีความทนต่อการลามไฟได้ดี จากการทดสอบสมบัติการรับแรงดึง(ASTM D412), การทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่กำลัง(IEC60243-1) และการทดสอบการทนต่อการลามไฟ (UL94) พบว่า วัสดุฉนวนมีคุณสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยก่อนการบ่มเร่ง วัสดุฉนวนสามารถรับแรงดึงและมีระยะยืด ณ จุดขาดได้มากกว่า 3.92 MPa และ 300 % ตามลำดับ หลังจากการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 96 ชั่วโมง วัสดุฉนวนรับแรงดึงและมีระยะยืด ณ จุดขาดลดลง แต่ทั้งนี้ สมบัติการรับแรงดึงที่ลดลงยังคงมีค่ามากกว่า 0.31 MPa และ 240% การทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของวัสดุฉนวนก่อนการบ่มเร่งด้วยรังสียูวีและหลังจากการบ่มเร่งด้วยรังสียูวีเป็นเวลา 420 ชั่วโมง ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของวัสดุฉนวนมีค่ามากกว่า 10 kV/mm นอกจากนั้น ชิ้นงานฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ยังผ่านการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่กำลังในสภาวะแห้ง ณ ระดับแรงดัน 40 kV โดยไม่มีฉนวนชิ้นใดเกิดการเบรกดาวน์และเกิดวาบไฟตามผิวที่ระดับแรงดันทดสอบแต่อย่างใด

การวิเคราะห์ศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ พบว่า บริเวณฉนวนจุดต่อด้านบนความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดมีค่าเท่ากับ 2.19 kV/mm ส่วนฉนวนหุ้มจุดต่อด้านล่างความเครียด

สนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 1.38 kV/mm นอกจากนั้น ในกรณีที่มีวัตถุลงกราวด์มาสัมผัสบริเวณฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ ซึ่งเป็นการจำลองเหตุการณ์ที่มีกิ่งไม้ สัตว์เลื้อยคลานหรือสัตว์ปีกมาสัมผัสบริเวณฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ จากผลการจำลอง พบว่า บริเวณฉนวนจุดต่อด้านบน เมื่อมีวัตถุลงกราวด์มาสัมผัสกับพื้นผิวทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 9.02 kV/mm การสัมผัสของวัตถุลงกราวด์บริเวณฉนวนจุดต่อด้านล่างทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 12.64 kV/mm จากผลการจำลองสนามไฟฟ้าทั้งหมด สรุปได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นบริเวณจุดต่อด้านบนและด้านล่างมีค่าต่ำกว่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนคือ 20.1 kV/mm จึงไม่อาจทำให้ฉนวนเกิดการเบรกดาวน์ได้

ฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ที่ได้ผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน ผู้วิจัยได้นำไปติดตั้งใช้งานจริงในระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้าแรงสูง 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคอำเภอธัญบุรี ในสองลักษณะคือ แบบแรกเป็นการติดตั้งฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์กับฟิวส์คัทเอาท์บริเวณต้นสายส่ง ส่วนแบบที่สองเป็นการติดตั้งฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์กับฟิวส์คัทเอาท์ที่ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ตัดตอนและอุปกรณ์ป้องกันหม้อ การทดสอบใช้งานจริงของฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ในระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้ายังมีประเด็นที่ต้องมีการวิจัยและพัฒนาต่อไปในอนาคต เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุฉนวนให้เหมาะสมต่อสภาพการใช้งานมากยิ่งขึ้น

ข้อเสนอแนะ

- การติดตั้งใช้งานฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์จริงในระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้าแรงสูง ควรมีการวิจัยเพิ่มเติมในประเด็นการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุฉนวนหลังจากผ่านการใช้งาน เพื่อนำข้อมูลที่ได้จากการวิจัยมาปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุฉนวนให้เหมาะสมต่อการใช้งานมากขึ้น
- การขึ้นรูปชิ้นงานฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ ควรควบคุมส่วนผสมของยางคอมปาวด์ให้ได้คุณภาพตามที่กำหนด หากยางคอมปาวด์มีคุณสมบัติไม่เป็นไปตามกำหนดจะทำให้ชิ้นงานฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์มีคุณสมบัติทางกลและทางไฟฟ้าผิดไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติทางไฟฟ้า ฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์อาจไม่สามารถทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้
- การออกแบบฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ในโครงการวิจัยนี้ ยังมีจุดอ่อนในการออกแบบที่ควรทำการปรับปรุงอยู่บางประการ ได้แก่ การยึดรอยผ่าบริเวณด้านหลังของฉนวนที่ใช้เคเบิลไทร์ และฉนวนจุดต่อด้านล่างที่ไม่สามารถปกปิดส่วนที่มีไฟได้ทั้งหมด เนื่องจากฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์จะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของกระบอกฟิวส์ในขณะเกิดการลัดวงจรได้ ข้อจำกัดนี้ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคอาจพิจารณาเปลี่ยนชนิดของฟิวส์คัทเอาท์เป็นแบบฉนวนปอร์ซเลนปิดมิดชิดกับบริเวณที่เป็นชุมชน

ผลงานวิชาการที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

- บทความวิชาการเรื่อง **"การออกแบบฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์จากยางพารา"**
- สิทธิบัติ/อนุสิทธิบัติ **"ฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์จากยางพารา"**

บทคัดย่อ

ฟิวส์คัทเอาท์เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้าแรงสูงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และการไฟฟ้านครหลวง โดยจุดต่อสายไฟฟ้าด้านบนและด้านล่างของฟิวส์คัทเอาท์ไม่มีฉนวนป้องกัน ทำให้เกิดการชำรุดเสียหายและการลัดวงจรบริเวณจุดต่อสายไฟฟ้าได้ งานวิจัยนี้ จึงได้ออกแบบและพัฒนาฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว ฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์พัฒนาจากวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางอีพีดีเอ็ม รวมถึงใช้สารป้องกันการลามไฟเพื่อเพิ่มคุณสมบัติความทนทานต่อสภาพแวดล้อมและความทนต่อการลามไฟให้กับวัสดุฉนวน วัสดุฉนวนที่ใช้ทำฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ผ่านการทดสอบคุณสมบัติทางกลและทางไฟฟ้า ประกอบด้วย การทดสอบสมบัติการรับแรงดึง(ASTM D412), การทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่กำลัง(IEC60243-1) และการทดสอบการทนต่อการลามไฟ (UL94) จากการทดสอบคุณสมบัติตามมาตรฐานพบว่า วัสดุฉนวนมีคุณสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยก่อนการบ่มเร่งวัสดุฉนวนสามารถรับแรงดึงและมีระยะยืด ณ จุดขาดเท่ากับ 5.62 MPa และ 370.28 % ตามลำดับ หลังจากการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 96 ชั่วโมง วัสดุฉนวนรับแรงดึงได้ลดลงเหลือ 3.23 MPa และมีระยะยืด ณ จุดขาดลดลงเหลือ 285.64 % สมบัติการรับแรงดึงที่ลดลงยังคงมีค่ามากกว่า 0.31 MPa และ 240% ตามมาตรฐานที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคกำหนด การทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของวัสดุฉนวนก่อนการบ่มเร่งด้วยรังสียูวี วัสดุฉนวนมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า 20.1 kV/mm หลังจากการบ่มเร่งด้วยรังสียูวีเป็นเวลา 420 ชั่วโมง ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของวัสดุฉนวนลดลงเหลือ 17.6 kV/mm หรือลดลง 12.44% นอกจากนั้น หลังจากการขึ้นรูปชิ้นงานฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ ฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ได้ผ่านการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่กำลังในสภาวะแห้ง ณ ระดับแรงดัน 40 kV เป็นเวลา 1 นาที จากการทดสอบฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์สามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้มากกว่า 40 kV ไม่มีฉนวนชิ้นใดเกิดการเบรกดาวน์และเกิดวาบไฟตามผิว ด้วยเหตุนี้จึงมั่นใจได้ว่าฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์สามารถนำไปใช้งานในระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้าแรงสูงที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 22 kV และ 33 kV ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ ฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ที่ผ่านการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกล ผู้วิจัยยังนำฉนวนหุ้มจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ไปทดสอบติดตั้งใช้งานจริงในระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้าแรงสูง 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคอำเภอธัญบุรีอีกด้วย

Abstract

Fuse cutout is electrical component used in the high voltage distribution system of Provincial Electricity Authority(PEA) and Metropolitan Electricity Authority(MEA). The upper and lower wire terminals of the fuse cutouts are not insulated, which can be causing damage and short circuits at the terminals. This research is about designing and developing fuse cutout insulator in order to address such issues. The fuse cutout insulator is produced from a composition of natural rubber and EDPM rubber with application of anti-flammable substance for increasing the material environmental tolerance and flammability. The insulating material for the fuse cutout pass various mechanical and electrical tests, including tensile test (ASTM D412), power frequency withstand voltage test (IEC60243-1), and flammability test (UL94). The test results have shown that properties of the insulating material comply with the PEA specification. Before aging, the material has tensile and elongation at break of 5.62 MPa and 370.28 % respectively. After aging at 100 °C for 96 hours, the material tensile is decreased to 3.23 MPa and elongation at break is decreased to 285.64 %. The decreased tensile properties are still higher than 0.31 MPa and 240% according to the PEA standard. In the withstand voltage test, the material before UV aging has withstand voltage of 20.1 kV/mm. After 420 hours of UV aging, the material withstand voltage is dropped to 17.6 kV/mm or 12.44% decreased. After the fuse cutout insulator parts get molded, they are also subjected to power frequency withstand voltage dry test at 40 kV for 1 minute. The test result is that all of the fuse cutout insulator samples can withstand voltage more than 40 kV without breakdown or flashover. Therefore, it is confident that the fuse cutout insulator should be working well in high voltage distribution system at 22 kV and 33 kV. Additionally, researchers also installed the fuse cutout insulators that pass the mechanical and electrical tests in the real 22-kV high voltage distribution system of Provincial Electricity Authority of Thanyaburi.

สารบัญ

เรื่อง	**หน้า**
บทสรุปรายงานสำหรับผู้บริหาร	I
บทคัดย่อ	V
Abstract	VI
1. ความสำคัญและที่มาของการวิจัย	1
2. วัตถุประสงค์	1
3. ทฤษฎีและแนวความคิดในการวิจัย	2
3.1 แนวความคิดในการวิจัย	2
3.2 ฟิวส์คัทเอาท์(Fuse Cut-Out)	3
3.3 ความเสียหายของฟิวส์คัทเอาท์	8
4. การออกแบบฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์	9
4.1 ข้อกำหนดคุณสมบัติของฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์	9
4.2 สูตรยางและการทดสอบคุณสมบัติ	10
4.3 การออกแบบและการติดตั้งใช้งาน	15
5. สรุป	25
6. ข้อเสนอแนะ	26
7. เอกสารอ้างอิง	27
ภาคผนวก	29

1. ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

ระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้าประกอบด้วยอุปกรณ์ไฟฟ้าที่สำคัญๆ หลายชนิด ทั้งทางด้านไฟฟ้าแรงสูงและไฟฟ้าแรงต่ำ ฟิวส์คัทเอาท์(Fuse Cutout) ถือเป็นอุปกรณ์ชิ้นหนึ่งที่มีความสำคัญ ซึ่งทำหน้าที่ป้องกันการลัดวงจรทางด้านแรงสูงและเป็นสวิตช์สำหรับตัดต่อวงจรไฟฟ้าทางด้านไฟฟ้าแรงสูงให้กับหม้อแปลงระบบจำหน่าย เมื่อจำเป็นต้องมีการดับไฟฟ้าเพื่อซ่อมแซมและบำรุงรักษา ฟิวส์คัทเอาท์ที่ใช้งานในปัจจุบัน จะถูกติดตั้งไว้บนคอนสายใกล้บริเวณที่ติดตั้งหม้อแปลงระบบจำหน่าย ดังแสดงในรูปที่ 1 จากรูปเราจะเห็นได้ว่า บริเวณจุดต่อสายของฟิวส์คัทเอาท์ที่ทั้งด้านบนและด้านล่างจะไม่มีฉนวนป้องกันแต่อย่างใด จึงทำให้มีโอกาสเกิดการลัดวงจรอันเนื่องมากจากสัตว์ปีกและสัตว์เลื้อยคลานต่างๆ ขึ้นได้ อีกทั้งในกรณีที่มีการติดตั้งหม้อแปลงระบบจำหน่ายในเขตชุมชนใกล้กับอาคารบ้านเรือน ถึงแม้ว่าจะมีการใช้สายไฟฟ้าหุ้มฉนวนในการเชื่อมต่อวงจรไฟฟ้า แต่การที่ไม่มีฉนวนหุ้มจุดต่อสายบริเวณฟิวส์คัทเอาท์ก็ยังคงทำให้เกิดความรู้สึกไม่ปลอดภัยต่อผู้ใช้ไฟฟ้าขึ้นได้

หากเราพิจารณาถึงศักยภาพของการผลิตและปริมาณวัตถุดิบจากยางพารา จะพบว่า นับตั้งแต่ปี 2534 เป็นต้นมาจนถึงปัจจุบัน ประเทศไทยได้ก้าวขึ้นเป็นผู้ผลิตและส่งออกยางพาราเป็นอันดับ 1 ของโลก จากข้อมูลการส่งออกในปี 2553 ของสถาบันวิจัยยาง[1] ประเทศไทยส่งออกผลิตภัณฑ์จากยางพารารวมทุกประเภทไปขายยังต่างประเทศถึง 2.73 ล้านตัน จากตัวเลขการผลิตและส่งออกยางของประเทศไทย และคุณสมบัติความเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีของยางพารา กอปรกับปัญหาที่เกิดขึ้นกับฟิวส์คัทเอาท์ โครงการวิจัยนี้ จึงออกแบบและพัฒนาฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ โดยวัสดุฉนวนที่ใช้ทำจากยางพาราเป็นวัสดุหลัก ทั้งนี้ ผลผลิตจากการวิจัยเป็นต้นแบบฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ที่สามารถนำไปติดตั้งใช้งานจริงในระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้าได้ และมีความเป็นไปได้ที่นำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์ สร้างมูลค่าผลผลิตทางการเกษตร พัฒนาศักยภาพในการแข่งขันและการพึ่งพาตนเองของสินค้าเกษตรและอุตสาหกรรมยางภายในประเทศ

รูปที่ 1 ตำแหน่งการติดตั้งฟิวส์คัทเอาท์ในระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้า

2. วัตถุประสงค์

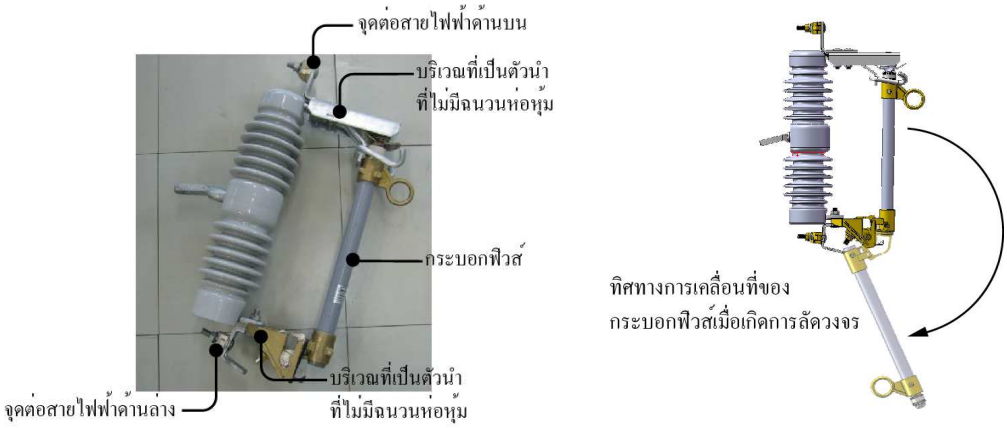
ออกแบบและพัฒนาฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ชนิด MC ระดับแรงดันใช้งานสูงสุด 33 kV ตามมาตรฐาน ANSI C37.42 โดยใช้ยางพาราเป็นวัตถุดิบหลักในการทำฉนวน

3. ทฤษฎีและแนวความคิดในการวิจัย

3.1 แนวความคิดในการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ ออกแบบและพัฒนาฉนวนหุ้มจุดต่อที่ใช้กับฟิวส์คัทเอาท์ในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยอาศัยยางพาราเป็นวัตถุดิบหลักในการพัฒนาเป็นฉนวนไฟฟ้า ด้วยเหตุที่ ยางพาราถือเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศ ประเทศไทยมีผลผลิตจากยางพาราเป็นอันดับหนึ่งของโลก การใช้ยางพาราจึงถือเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับสินค้าเกษตร สนองนโยบายรัฐบาลและสอดคล้องกับนโยบายและยุทธศาสตร์การวิจัยของชาติ (2555-2559) ฟิวส์คัทเอาท์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ป้องกันและอุปกรณ์ตัด-ต่อวงจรให้กับหม้อแปลงระบบจำหน่ายทางด้านไฟฟ้าแรงสูง เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้น ฟิวส์ลิ้งค์(Fuse Link) ภายในกระบอกฟิวส์ (Fuse Tube) ที่ทำหน้าที่เป็นสะพานไฟเชื่อมต่อระหว่างระบบไฟฟ้ากับหม้อแปลงระบบจำหน่ายจะหลอมละลายและขาด ตัดวงจรเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้น แต่ทั้งนี้ บริเวณจุดต่อของฟิวส์คัทเอาท์มิได้มีฉนวนห่อหุ้ม ทำให้ในบางครั้งเกิดการลัดวงจรขึ้นในบริเวณดังกล่าว อันเนื่องมาจากสัตว์ปีก สัตว์เลื้อยคลาน หรือแม้แต่กิ่งไม้ รูปที่ 2 (ก) แสดงลักษณะของฟิวส์คัทเอาท์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ซึ่งบริเวณจุดต่อสายไฟฟ้าด้านบนและด้านล่าง รวมถึงส่วนที่เป็นตัวนำที่ใช้รองรับกระบอกฟิวส์จะไม่มีฉนวนห่อหุ้ม รูปที่ 2 (ข) แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของกระบอกฟิวส์เมื่อเกิดการลัดวงจร ดังนั้นฉนวนจุดต่อที่จะออกแบบและพัฒนาต้องไม่ขัดขวางการทำงานของกระบอกฟิวส์ จากปัญหาการลัดวงจรบริเวณจุดต่อสายทำให้เกิดการแก้ไขปัญหาเบื้องต้น โดยการนำท่อพีวีซีมาทำฉนวนป้องกัน ณ จุดต่อสายเฉพาะด้านบน ดังแสดงในรูปที่ 3 แต่ทั้งนี้ ฉนวนจากท่อพีวีซีมีข้อจำกัดในเรื่องความสวยงามและมาตรฐานด้านวิศวกรรม อีกทั้งบริเวณด้านบนยังคงเปิดโล่งจึงมีโอกาสเกิดการลัดวงจรได้อยู่ ฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ที่พัฒนาขึ้นนี้ ใช้ยางพาราเป็นวัตถุดิบหลักในการทำฉนวน โดยมีจุดเด่นดังนี้

- น้ำหนักเบาสามารถติดตั้งใช้งานได้สะดวก
- ฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์จะไม่ขัดขวางการทำงานของกระบอกฟิวส์ เมื่อเกิดการลัดวงจร
- ลดการชำรุดเสียหายของฟิวส์คัทเอาท์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณจุดต่อสายไฟฟ้า
- สามารถทนแรงดันไฟฟ้า ณ ระดับใช้งานได้โดยไม่เกิดการเบรกดาวน์
- สามารถติดตั้งใช้งานกับฟิวส์คัทเอาท์เดิมได้ทันที
- ผ่านการทดสอบคุณสมบัติทางกลและทางไฟฟ้าตามมาตรฐานที่กำหนด



(ก) ลักษณะของฟิวส์คัทเอาท์ (ข) การเคลื่อนที่ของกระบอกฟิวส์เมื่อเกิดการลัดวงจร

รูปที่ 2 ฟิวส์คัทเอาท์ที่ใช้ ณ ปัจจุบันในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

รูปที่ 3 ฉนวนชั่วคราวบริเวณจุดต่อด้านบนของฟิวส์คัทเอาท์ที่ทำจากท่อพีวีซี

3.2 ฟิวส์คัทเอาท์(Fuse Cut-Out)

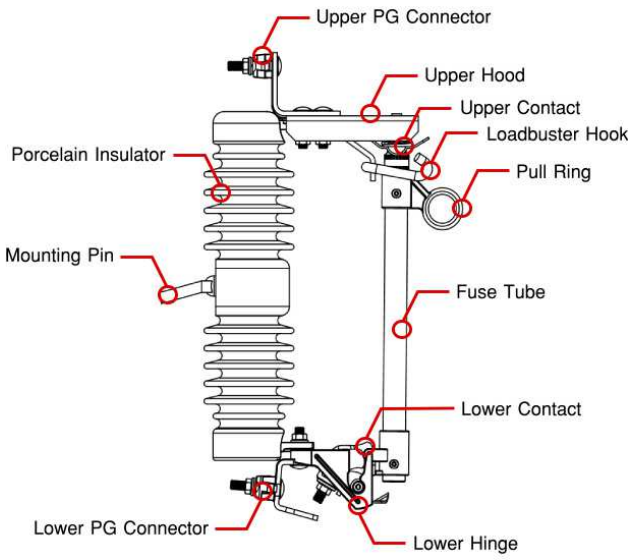
ฟิวส์คัทเอาท์ หรือเรียกอีกอย่างว่าดรอปเอาท์ฟิวส์(Drop Out Fuse) เป็นอุปกรณ์ป้องกันและตัดต่อวงจรทางด้านระบบจำหน่ายแรงสูง โดยทำหน้าที่ป้องกันการลัดวงจรและป้องกันกระแสเกินให้กับหม้อแปลงในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค(กฟภ.) และการไฟฟ้านครหลวง(กฟน.) นอกจากนั้น ฟิวส์คัทเอาท์ยังเป็นอุปกรณ์ตัดต่อวงจร เพื่อตัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า ในกรณีที่ต้องมีการซ่อมบำรุงหรือเปลี่ยนอุปกรณ์ในระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้า ในระบบจำหน่าย 22 kV ฟิวส์คัทเอาท์มีพิกัดแรงดันใช้งานสูงสุดเท่ากับ 27 kV พิกัดกระแสสูงสุดเท่ากับ 100 A ส่วนในระบบจำหน่าย 33 kV ฟิวส์คัทเอาท์มีพิกัดแรงดันใช้งานสูงสุดเท่ากับ 34.5 kV พิกัดกระแสสูงสุดเท่ากับ 100 A คุณสมบัติอื่นๆ ทางด้านไฟฟ้าของฟิวส์คัทเอาท์แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางเทคนิคของฟิวส์คัทเอาต์

Description	Nominal System Voltage	
	22kV	**33kV**
Rate Frequency, (Hz)	50	50
Rate Maximum Voltage, (kV_{rms})	27	34.5
Rate Continuous Current, (A)	100	100
Rate Asymmetrical Interrupting Current, (kA_{rms})	8	8
Basic Impulse Insulation Level(BIL), (kV_{peak})	125	150
Minimum Normal-Frequency Dry Test Voltage (kV_{rms})	42	70
Minimum Creepage Distance of Porcelain Insulator (mm)	320	650

ฟิวส์คัทเอาท์ที่ใช้ในระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้า จะอ้างอิงมาตรฐานการออกแบบและการทดสอบประกอบด้วยANSI/IEEE C37.40 Service Conditions and Definitions for High-Voltage Fuses, Distribution Enclosed Single-Pole Air Switches, Fuse Disconnecting Switches, and Accessories, ANSI/IEEE C37.41 Design Tests for High-Voltage (>1000 V) Fuses, Fuse and Disconnecting Cutouts, Distribution Enclosed Single-Pole

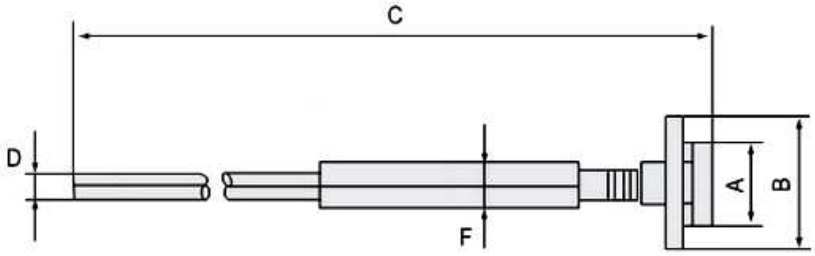
Air, Switches, Fuse Disconnecting Switches, and Fuse Links and Accessories และ ANSI C37.42 Specification for High-Voltage Expulsion Type Distribution Class Fuses, Cutouts, Fuse Disconnecting Switches and Fuse Links รูปที่ 4 แสดงส่วนประกอบต่างๆ ที่สำคัญของฟิวส์คัทเอาท์ตามมาตรฐาน อันประกอบด้วย Upper PG Connector, Upper Hood, Upper Contact, Loadbuster Hook, Pull Ring, Fuse Tube, Porcelain Insulator, Mounting Pin, Lower Contact, Lower Hing และ Lower PG Connect



รูปที่ 4 ส่วนประกอบสำคัญของฟิวส์คัทเอาท์

การใช้งานฟิวส์คัทเอาท์เพื่อเป็นอุปกรณ์ป้องกันและอุปกรณ์ตัดต่อวงจร จะใช้ร่วมกับฟิวส์แรงสูงหรือเรียกว่าฟิวส์ลิงค์(Fuse Link) สำหรับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและการไฟฟ้านครหลวง ฟิวส์ลิงค์ส่วนใหญ่ที่ใช้เป็นแบบหัวเห็ด(Button Head Fuse Link) ดังแสดงในรูปที่ 5 การใช้งานฟิวส์ลิงค์จะถูกบรรจุอยู่ในกระบอกฟิวส์ (Fuse Tube) ที่ทำจากไฟเบอร์กลาสส์(Fiberglass) ตามมาตรฐาน IEC 60282-1 และ DIN 43625 ฟิวส์ลิงค์มีขนาดพิกัดกระแส 1 A จนถึง 100 A และมีพิกัดแรงดันสูงสุดทั้ง 27 kV และ 38 kV มิติและขนาดของฟิวส์ลิงค์จะแตกต่างกันตามขนาดพิกัดกระแสของฟิวส์ลิงค์ มิติและขนาดของฟิวส์ลิงค์ที่ค่าพิกัดกระแสต่างๆ แสดงในรูปที่ 6 และตารางที่ 2

รูปที่ 5 ฟิวส์ลิงค์แบบหัวเห็ด Type K

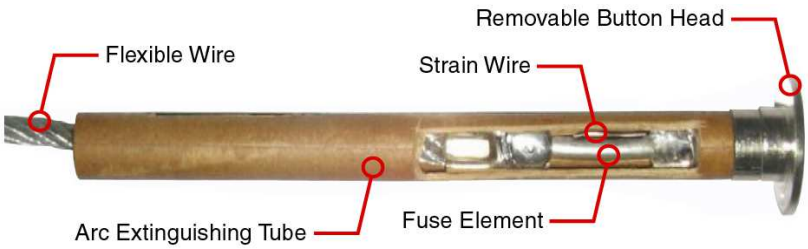


รูปที่ 6 มิติและขนาดของฟิวส์ลิงค์

ตารางที่ 2 มิติและขนาดของฟิวส์ลิงค์ตามรูปที่ 6

พิกัดกระแส(A)	**มิติและขนาด(mm)**				
	A	**B**	**C**	**D**	**F**
1 ถึง 25	12.5±0.2	19.0±0.2	533	2.0	6.5
30 ถึง 40	12.5±0.2	19.0±0.2	533	3.0	8.0
50 ถึง 100	19.0±0.3	N.A.	533	5.0	10.0

ฟิวส์ลิงค์มีส่วนประกอบแสดงดังรูปที่ 7 การทำงานของฟิวส์ลิงค์จะเกิดการหลอมละลายและเผาไหม้ตัวฟิวส์ที่อยู่ภายในกระบอกดับอาร์ก(Arc Extinguishing Tube) เมื่อกระแสที่ไหลผ่านฟิวส์ลิงค์มีค่าเกิดพิกัดของฟิวส์ลิงค์ ฟิวส์ลิงค์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามระยะเวลาการหลอมละลายของฟิวส์ภายในกระบอกดับอาร์ก ได้แก่ Type K และ Type T ฟิวส์ลิงค์แบบ Type K เมื่อมีกระแสเกินฟิวส์จะหลอมละลายและขาดโดยทันที ส่วนฟิวส์ลิงค์แบบ Type T ฟิวส์จะไม่หลอมละลายโดยทันทีเมื่อกระแสเกิน แต่จะค่อยๆ หลอมละลายและขาดในที่สุด ระยะเวลาที่ฟิวส์ลิงค์หลอมละลายและขาดจะเป็นอัตราส่วนกับกระแสที่ไหลผ่านฟิวส์ ซึ่งสามารถดูได้จากกราฟคุณสมบัติของฟิวส์แต่ละชนิด



รูปที่ 7 ส่วนประกอบของฟิวส์ลิงค์

รูปที่ 8 อุปกรณ์สำหรับปลดสับฟิวส์ลิงค์หรือเรียกว่าไม้ชักฟิวส์แรงสูง

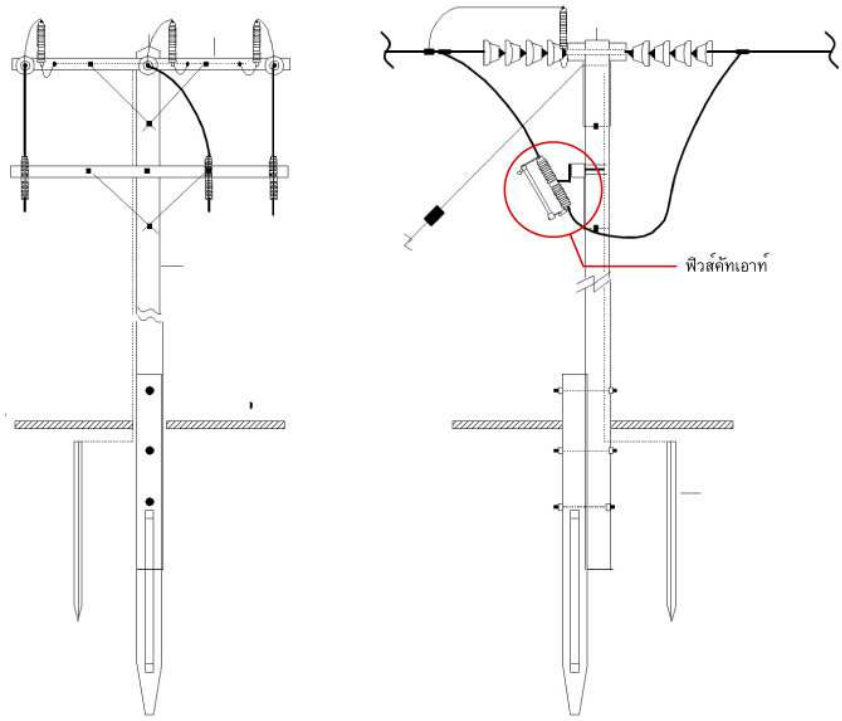
การปลดสับหรือตัดต่อวงจรของฟิวส์คัทเอาท์จะใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า Hook Stick หรือไม่ชักฟิวส์แรงสูง ดังแสดงในรูปที่ 8 การปลดสับจะอาศัยไม้ชักฟิวส์เกี่ยวบริเวณห่วงด้านบนของกระบอกฟิวส์ โดยมีข้อควรปฏิบัติและข้อควรระวังดังนี้

- การปลดสับฟิวส์คัทเอาท์ต้องปลดที่สภาวะไม่มีโหลด(No Load) โดยให้ปลดสับโหลดทางไฟฟ้าทั้งหมดออกก่อน
- ผู้ปฏิบัติงานต้องสวมถุงมือยางแรงสูงทุกครั้ง ยืนในที่มั่นคงและใช้ไม้ชักฟิวส์ทำการปลดสับเท่านั้น
- การปลดฟิวส์คัทเอาท์ให้ปลดเฟสริมทั้งสองข้างก่อน จากนั้นจึงปลดเฟสกลาง(ปลด A-C-B หรือ C-A-B)
- การสับฟิวส์คัทเอาท์ให้สับเฟสกลางก่อนแล้วจึงสับเฟสริมทั้งสองข้าง(สับเฟส B-C-A หรือ B-A-C)
- การสับกระบอกฟิวส์ลิงค์ ให้สับกระบอกฟิวส์ให้แน่นภายในครั้งเดียว หากสับกระบอกฟิวส์ลิงค์เข้าไปแล้วยังไม่แน่นให้ดึงกระบอกฟิวส์ลงมาในตำแหน่งเดิมแล้วทำการสับเข้าไปใหม่
- ขณะฝนตกมีลมพายุห้ามทำการปลดสับฟิวส์คัทเอาท์เป็นอันขาด
- อุปกรณ์สำหรับปลดสับฟิวส์คัทเอาท์ ประกอบด้วย ไม้ชักฟิวส์แรงสูงชนิด 2 ท่อนหรือ 3 ท่อน, ถุงมือยางแรงสูง Class-C และอุปกรณ์ Loadbuster ใช้สำหรับประกอบไม้ชักฟิวส์เพื่อปลดฟิวส์คัทเอาท์ขณะมีโหลด อุปกรณ์ Loadbuster ที่ต่อกับไม้ชักฟิวส์มีลักษณะดังรูปที่ 9

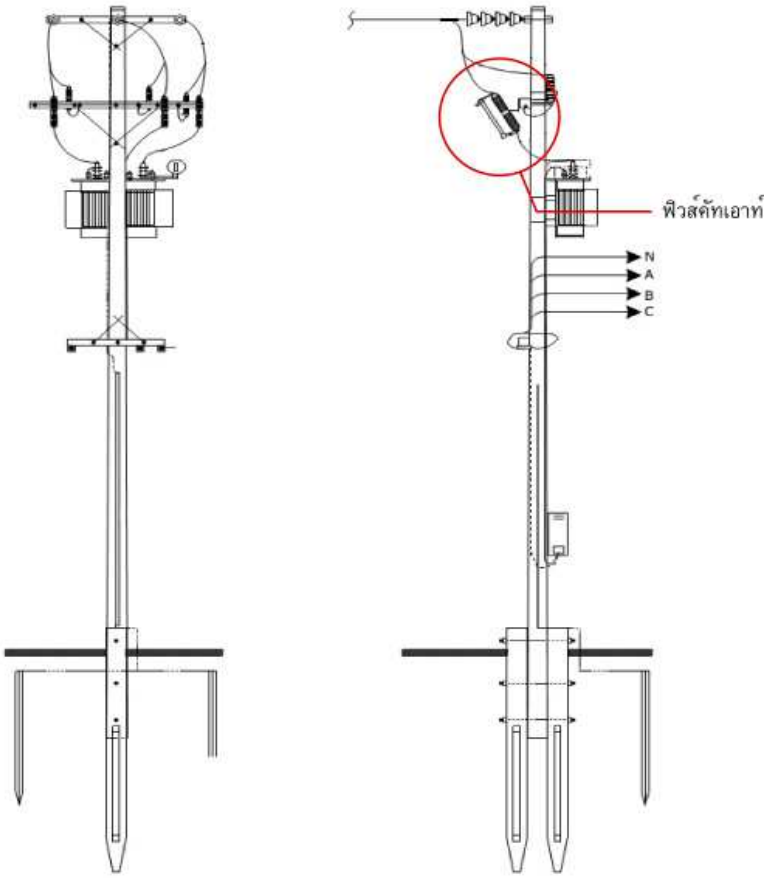
ฟิวส์คัทเอาท์ส่วนใหญ่จะใช้งานเป็นอุปกรณ์ป้องกันและอุปกรณ์ตัดต่อวงจรให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้า แต่ในบางกรณีฟิวส์คัทเอาท์ยังถูกใช้เป็นอุปกรณ์ป้องกันและตัดต่อวงจรสำหรับสายส่งในระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้า โดยจะถูกติดตั้งไว้บริเวณต้นสายส่ง ณ จุดต่อแยกสาย ดังแสดงในรูปที่ 10

การติดตั้งฟิวส์คัทเอาท์จะติดตั้งบนคอนสายบริเวณเดียวกับที่ติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้า ตำแหน่งการติดตั้งฟิวส์คัทเอาท์จะแตกต่างกันตามลักษณะของการติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้า โดยการติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้าสามารถจำแนกออกเป็น การติดตั้งหม้อแปลงแบบเสาต้นเดียว, การติดตั้งหม้อแปลงบนนั่งร้านตามแนวขวางสายส่ง, การติดตั้งหม้อแปลงบนนั่งร้านตามแนวยาวสายส่ง และการติดตั้งหม้อแปลงแบบตั้งพื้น สำหรับในเขตชุมชนและหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก การติดตั้งหม้อแปลงมักเป็นแบบเสาต้นเดียวเพื่อประหยัดพื้นที่ การติดตั้งหม้อแปลงแบบเสาต้นเดียวตำแหน่งการติดตั้งฟิวส์คัทเอาท์แสดงดังรูปที่ 11

รูปที่ 9 การใช้อุปกรณ์ Loadbuster สำหรับปลดฟิวส์คัทเอาท์ขณะมีโหลด



รูปที่ 10 การติดตั้งฟิวส์คัทเอาท์ ณ ต้นสายบริเวณจุดต่อแยกสายส่งในระบบจำหน่าย

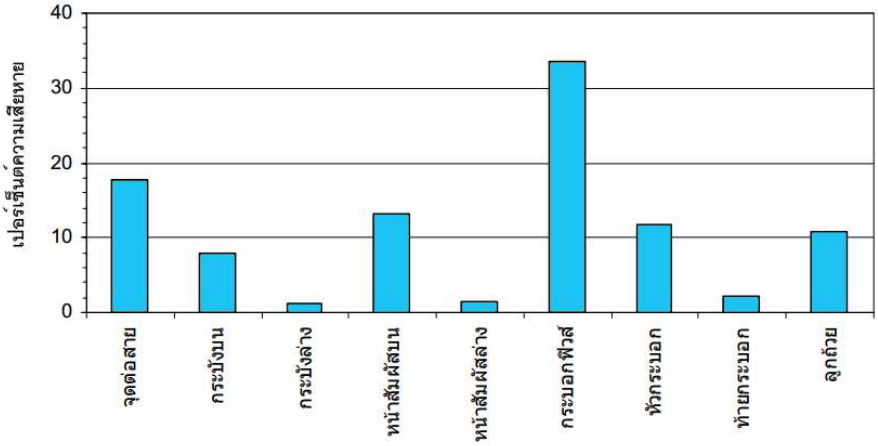


รูปที่ 11 ตำแหน่งติดตั้งฟิวส์คัทเอาท์ เมื่อติดตั้งหม้อแปลงแบบเสาต้นเดียว

3.3 ความเสียหายของฟิวส์คัทเอาท์[2]

ฟิวส์คัทเอาท์ที่ใช้ในระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้าเกิดการชำรุดเสียหายได้จากหลายสาเหตุ อาทิเช่น การชำรุดเนื่องจากสัตว์และภัยธรรมชาติ ฯลฯ ข้อมูลจากกองวิจัยฯ ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค พบว่า ส่วนประกอบของฟิวส์คัทเอาท์ที่เสียหายบ่อยครั้ง ได้แก่ ลูกถ้วยฉนวนปอร์ชเลน(Porcelain Insulator), จุดต่อสายไฟฟ้า, กระบังหน้าสัมผัสบน-ล่าง กระบอกฟิวส์และหน้าสัมผัสของกระบอกฟิวส์ ส่วนประกอบของฟิวส์คัทเอาท์ที่เสียหายบ่อยมากที่สุดได้แก่กระบอกฟิวส์ กระบอกฟิวส์มีตัวเลขความเสียหายอยู่ที่ประมาณร้อยละ 35 ของจำนวนฟิวส์คัทเอาท์ที่เสียหายทั้งหมด ส่วนประกอบที่เสียหายรองลงมาคือ จุดต่อสายไฟฟ้า ซึ่งมีตัวเลขความเสียหายอยู่ที่ประมาณร้อยละ 18 รูปที่ 12 แสดงลักษณะความเสียหายของฟิวส์คัทเอาท์บริเวณจุดต่อสายไฟฟ้า เนื่องจากการลัดวงจร นอกจากนั้น การชำรุดเสียหายของจุดต่อสายไฟฟ้ายังมีสาเหตุมาจากจุดต่อสายหลวมและขาดการบำรุงรักษา การสึกกร่อนเนื่องจากปฏิกิริยาจากโลหะสองชนิดที่มีขั้วทางไฟฟ้าที่ต่างกันระหว่างสายไฟฟ้าอะลูมิเนียมกับข้อรัดสายไฟฟ้าที่ทำจากโลหะผสม การที่จุดต่อสายไฟฟ้าหลวมหรือเกิดการสึกกร่อนทำให้ความต้านทานของหน้าสัมผัสสูงขึ้น เป็นผลให้เกิดความร้อนสะสมบริเวณจุดต่อสายและจุดต่อสายเกิดหลอมละลายได้ รูปที่ 13 สัดส่วนความเสียหายที่เกิดขึ้นกับส่วนประกอบต่างๆ ของฟิวส์คัทเอาท์

รูปที่ 12 ความเสียหายที่จุดต่อสายไฟฟ้าของฟิวส์คัทเอาท์



รูปที่ 13 เปอร์เซ็นต์ความเสียหายของส่วนประกอบต่างๆ ของฟิวส์คัทเอาท์

หนึ่งในสาเหตุที่ทำให้ฟิวส์คัทเอาท์เสียหายมาจากสัตว์ เช่น งู นก หนู กระรอก และลิง เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณจุดต่อสายไฟฟ้าที่ไม่มีฉนวนป้องกัน จากรายงานการวิเคราะห์สาเหตุของความเสียหายที่เกิดขึ้นต่อดรอปเอาท์ฟิวส์คัทเอาท์ในระบบจำหน่ายของ กฟภ.[2] ซึ่งได้ทำแบบสอบถามไปยังการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคในแต่ละภูมิภาค สรุปความเห็นที่มีต่อความเสียหาย ณ จุดต่อสายไฟฟ้าได้ว่า

- จุดต่อสายไฟฟ้าควรมีพลาสติกครอบ
- จุดต่อสายไฟฟ้าควรมีการป้องกันสัตว์
- ควรมีฉนวนหุ้มจุดต่อสายไฟฟ้าป้องกันการลัดวงจรจากสัตว์ปีก

4. การออกแบบฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์

4.1 ข้อกำหนดคุณสมบัติของฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคกำหนดคุณสมบัติของวัสดุฉนวนสำหรับใช้ทำเป็นฉนวนไฟฟ้า เพื่อป้องกันส่วนที่มีไฟบริเวณจุดต่อสายของอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้า และบริเวณจุดเชื่อมต่อระหว่างสายไฟฟ้า

ตามเอกสาร Specification No. RHOT-099/2552 [3] ฉนวนป้องกันส่วนที่มีไฟ(Live Part Insulation Covers) ประกอบด้วย

- Strain clamp insulation cover
- Compression splicing sleeve insulation cover
- Distribution transformer bushing insulation cover
- Current transformer bushing insulation cover
- Voltage transformer bushing insulation cover
- Dropout fuse cutout insulation cover
- Lightning arrester insulation cover

งานวิจัยนี้ การออกแบบฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ใช้คุณสมบัติของวัสดุฉนวนตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเป็นเกณฑ์ คุณสมบัติของวัสดุฉนวนสำหรับฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์แสดงดังตารางที่ 3 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุฉนวนอ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60695-11-10, ASTM D412, TIS-293 และ IEC 60243 -1

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของวัสดุฉนวนสำหรับฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์

คุณสมบัติ		
Before heat aging test	Tensile strength	มากกว่า 0.4kgf/mm^2(3.92 MPa)
	Elongation at break	มากกว่า 300%
After heat aging test	Tensile strength	มากกว่า 0.32kgf/mm^2(0.31 MPa)
	Elongation at break	มากกว่า 240%
Before UV aging test	Withstand voltage	10kV/mm
After UV aging test		
Power Frequency Withstand Voltage Test(Dry)		40kV/mm
Flammability		ผ่านการทดสอบ IEC 60695-11-10, UL94

4.2 สูตรยางและการทดสอบคุณสมบัติ

ยางธรรมชาติมีคุณสมบัติการเป็นฉนวนที่ดี โดยยางธรรมชาติมีค่าความต้านทานจำเพาะอยู่ระหว่าง $10^{15} - 10^{16}$ Ω.cm เราจึงสามารถนำยางธรรมชาติมาทำเป็นฉนวนไฟฟ้าได้ แต่ทั้งนี้ ยางธรรมชาติเสื่อมสภาพได้ง่าย อันเนื่องมาจากความร้อน แสงแดด และโอโซน รวมถึงยางธรรมชาติยังติดไฟได้ง่าย ดั้งนั้น งานวิจัยนี้จึงนำยางเอทธิลีนโพรพิลีนไดอีนหรือยางอีพีดีเอ็มมาผสมกับยางธรรมชาติในอัตราส่วน 60:40 เพื่อเพิ่มคุณสมบัติความทนทานต่อสภาพแวดล้อม[4] และเติมสารป้องกันการติดไฟเพื่อปรับปรุงสมบัติการติดไฟของยางคอมปาวด์ การผสมยางธรรมชาติกับยางอีพีดีเอ็มในอัตราส่วนดังกล่าว ยางคอมปาวด์ที่ได้จะมีสมบัติการทนทานต่อสภาพแวดล้อม ความร้อน โอโซนและสมบัติการรับแรงดึงที่ดี[5] สูตรยางคอมปาวด์แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ส่วนผสมและสารเคมีที่ใช้ในการผสมยางคอมปาวด์

วัตถุดิบ	ปริมาณ(phr)
ยางธรรมชาติ (STR 5L)	60.0
ยางเอทธิลีนโพรพิลีนไดอีนโมโนเมอร์ (EPDM)	40.0
ซิงก์ออกไซด์ (ZnO)	5.0
กรดสเตียริก (Stearic acid)	2.0
ไดไซโคลเฮกซีลเบนโซไทอะโซลซัลฟีนาไมด์ (TBBS)	1.0
เททระเมทีลไทยูแรมไดซัลไฟด์ (TMTD)	0.2
อะลูมิเนียมไทรไฮเดรต(ATH)	120
สารป้องกันการเสื่อมสภาพ(BHT)	1.0
กำมะถัน (Sulphur : S)	1.8
ผงเขม่าดำ (Carbon-black:CB N330)	3.0

จากสูตรยางในตารางที่ 2 ผู้วิจัยทำการผสมสูตรยางเพื่อให้ได้ยางคอมปาวด์ที่จะนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฉนวนสำหรับทดสอบคุณสมบัติทางกลและทางไฟฟ้า แผ่นฉนวนสำหรับการทดสอบคุณสมบัติมีขนาด $150\times150\times2$ มิลลิเมตร โดยฉนวน 1 แผ่นใช้ยางคอมปาวด์ประมาณ 50 กรัม การผสมยางคอมปาวด์ตามสูตรยางเริ่มจากนำยางธรรมชาติมาบดด้วยเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นจึงนำยางอีพีดีเอ็มมาบดผสมกับยางธรรมชาติและทำการบดผสมต่อเนื่องเป็นเวลา 3 นาที เติมสารกระตุ้นการผสมยางระหว่างยางธรรมชาติกับยางอีพีดีเอ็ม ได้แก่ ซิงก์ออกไซด์ (ZnO), กรดสเตียริก(Stearic Acid), ไดไซโคลเฮกซีลเบนโซไทอะโซลซัลฟีนาไมด์ (TBBS) และเททระเมทีลไทยูแรมไดซัลไฟด์ (TMTD) ตามลำดับ โดยการเติมสารเคมีแต่ละตัวจะใช้เวลาเติมห่างกันประมาณ 2-4 นาทีขึ้นอยู่กับชนิดของสารกระตุ้น และในการผสมยางคอมปาวด์ต้องตัดแล้วก็พับยางคอมปาวด์ที่กำลังบดอยู่ตลอดเวลา ซึ่งต้องอาศัยความชำนาญและประสบการณ์เป็นพิเศษ เพื่อให้สารเคมีผสมเข้ากับยางคอมปาวด์เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพ(Butylated Hydroxytoluene, BHT) และอะลูมิเนียมไทรไฮเดรต(ATH) แล้วทำการบดยางเป็นเวลา 50 นาที เพื่อให้อะลูมิเนียมไทรไฮเดรตผสมเป็นเนื้อเดียวกับยางคอมปาวด์ ข้อควรระวังอย่างหนึ่งของการผสมอะลูมิเนียมไทรไฮเดรตคือ ต้องบดผสมยางกับอะลูมิเนียมไทรไฮเดรตให้เป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุดและไม่มีการจับตัวเป็นก้อน ตลอดการบดยางต้องให้ความร้อนอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้ หากการบดผสมอะลูมิเนียมไทรไฮเดรตไม่ดีพอ จะส่งผลโดยตรงต่อสมบัติการรับแรงดึงของยางคอมปาวด์ได้ ในขั้นตอนสุดท้ายของการผสมยางคอมปาวด์ทำการเติมเขม่าดำกับกำมะถัน แล้วบดผสมต่อเนื่องเป็นเวลาประมาณ 7 นาที โดยเมื่อเติมเขม่าดำจะทำให้ยางคอมปาวด์ที่ได้เป็นสีดำ ดังแสดงในรูปที่ 14

จากการผสมยางตามสูตรทำให้ได้ยางคอมปาวด์สีดำดังแสดงในรูปที่ 15 (ก) ยางคอมปาวด์จะถูกนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฉนวนขนาด $150\times150\times2$ มิลลิเมตร เพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติทางกลและทางไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 15 (ข) ทั้งนี้ ก่อนการขึ้นรูปยางคอมปาวด์ ยางคอมปาวด์ถูกนำไปหาระยะเวลาสกอร์ช(Scorch Time, ts_2) และระยะเวลาในการคงรูปของยางคอมพาวด์ที่เหมาะสมด้วยเครื่อง Moving Die Rheometer(GT-M2000) ที่อุณหภูมิ 150°C แล้วจึงนำยางคอมพาวด์ไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก (Compression Moulding Machine) ที่อุณหภูมิ 150°c และใช้เวลาในการวัลคาไนซ์ประมาณ 12.51 นาที ข้อมูลจากการทดสอบด้วยเครื่อง Moving Die Rheometer มีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 5

(ก) ก่อนการเติมเขม่าดำ

(ข) หลังการเติมเขม่าดำ

รูปที่ 14 การเติมเขม่าดำลงในส่วนผสมยางคอมปาวด์

(ก) ยางคอมปาวด์

(ข) ฉนวนยางคงรูปขนาด $150 \times 150 \times 2$ มิลลิเมตร

รูปที่ 15 ยางคอมปาวด์และฉนวนยางคงรูปตามสูตรยางในตารางที่ 1

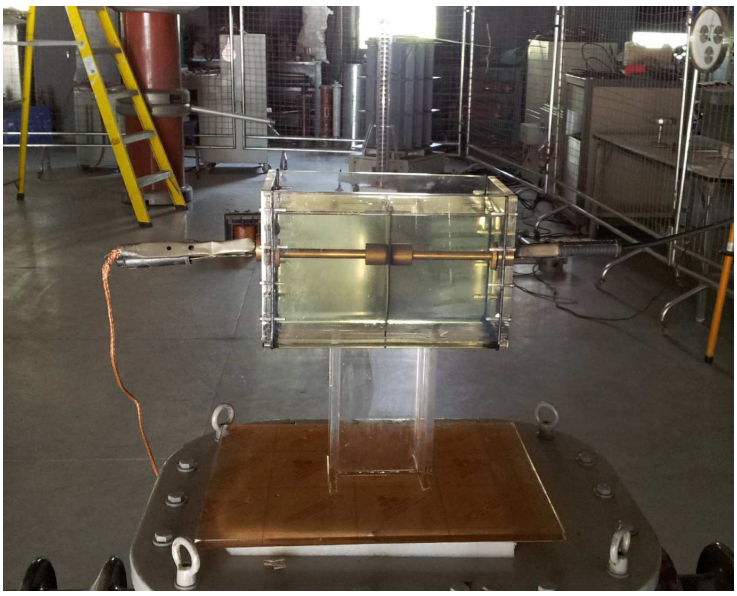
ตารางที่ 5 คุณสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์

คุณสมบัติ					
Testing Time (ms)	20.00	**Temperatur (°c)**	150	**MH (N-m)**	6.9074
ML (N-m)	0.5854	**Ts_1 (m:s)**	3:28	**Ts_2 (m:s)**	3:43
Tc_{90} (m:s)	5:57	**Tc_{100} (m:s)**	12:51	**Tmin (N-m)**	0.5848
Tmax (N-m)	6.9074	**CRmax (dN-m/sec)**	0.667		
S*max (kg-cm)	71.863	**S*min (kg-cm)**	11.768		

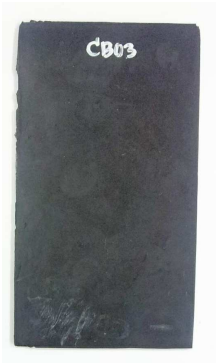
การทดสอบคุณสมบัติทางกลและทางไฟฟ้าของฉนวนยางคงรูปอ้างอิงข้อกำหนดคุณสมบัติของวัสดุฉนวนของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ประกอบด้วย การทดสอบสมบัติการรับแรงดึง(ASTM D412) ทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่ง, การทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่กำลัง(IEC60243-1) ทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต และการทดสอบการทนต่อการลามไฟ(IEC 60695-11-10 หรือ UL94) โดยการทดสอบแต่ละรายการมีรายละเอียดการทดสอบพอสังเขปดังนี้

การทดสอบสมบัติการรับแรงดึงประกอบด้วยการทดสอบความทนต่อแรงดึง(Tensile Strength) และการยืดตัว ณ จุดขาด(Elongation at Break) ของวัสดุฉนวน การทดสอบอ้างอิงมาตรฐาน ASTM D412 การทดสอบสมบัติการรับแรงดึงทำโดยการดึงชิ้นงานทดสอบมาตรฐานจนขาดด้วยอัตราเร็วคงที่ ชิ้นฉนวนทดสอบเป็น Dumbbell Type 4 จำนวน 10 ตัวอย่างทดสอบ การทดสอบในขั้นตอนแรกจะนำชิ้นฉนวนทดสอบจำนวน 5 ตัวอย่างไปทดสอบความทนต่อแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาด ที่อุณหภูมิในการทดสอบ 20 - 30 °C อัตราเร็วของการดึงทดสอบ 500±5 mm/min จากนั้นนำชิ้นฉนวนทดสอบที่เหลืออีก 5 ชิ้นไปบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 96 ชั่วโมง ระยะเวลาเย็นตัว(Cooling Time) อยู่ระหว่าง 12 - 48 ชั่วโมง เมื่อผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนแล้ว ชิ้นฉนวนทดสอบ 5 ชิ้นดังกล่าว จะถูกนำไปทดสอบความทนต่อแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาดอีกครั้งหนึ่ง

การทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่กำลัง(Power Frequency Withstand Voltage Test) ชิ้นฉนวนทดสอบมีขนาด 80±0.8×150±1.5×≤4 มิลลิเมตร จำนวนตัวอย่างทดสอบ 2 ชุด ชุดละ 5 ตัวอย่าง การทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ชุด ได้แก่ ชิ้นฉนวนทดสอบชุดที่ 1 นำไปทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC60243-1 ตัวอย่างการทดสอบแสดงดังรูปที่ 16 โดยชิ้นฉนวนทดสอบจะถูกแช่ลงในน้ำมันหม้อแปลงเพื่อป้องกันการเกิดวาบไฟตามผิว ส่วนชิ้นฉนวนทดสอบชุดที่ 2 นำไปผ่านการบ่มเร่งด้วยรังสียูวีเป็นระยะเวลา 420 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน TIS-293 การทดสอบกระทำทั้งหมด 210 วัฏจักร ในแต่ละวัฏจักรชิ้นฉนวนทดสอบถูกพ่นละอองน้ำต่อเนื่องเป็นเวลา 18 นาที และหยุดพ่นละอองน้ำเป็นเวลา 102 นาที โดยมีซีนอนอาร์คยูวีทำงานตลอดวัฏจักร จากนั้น ชิ้นฉนวนทดสอบชุดที่ 2 ที่ผ่านการบ่มเร่งด้วยรังสียูวีจะถูกนำไปทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า เพื่อเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์กับชิ้นฉนวนทดสอบชุดที่ 1 โดยทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยรังสียูวี วัสดุฉนวนต้องมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 10kV/mm รูปที่ 17 แสดงตัวอย่างชิ้นฉนวนทดสอบก่อนและหลังบ่มเร่งด้วยรังสียูวี



รูปที่ 16 ขณะทำการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่กำลัง

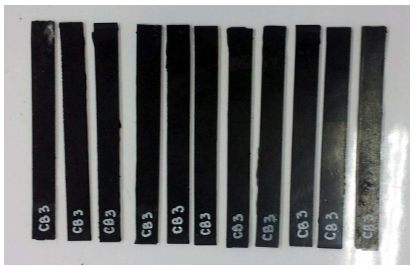


(ก) ก่อนการบ่มเร่ง

(ข) หลังการบ่มเร่ง

รูปที่ 17 ชิ้นฉนวนทดสอบก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยรังสียูวี

การทดสอบการทนต่อการลามไฟ(Flammability Testing) การทดสอบอ้างอิงมาตรฐาน UL 94-Vertical Testing ชิ้นฉนวนทดสอบมีขนาด 125×13×≤13 mm การทดสอบประกอบด้วยตัวอย่างทดสอบ 2 ชุด ชุดละ 5 ตัวอย่าง รูปที่ 18 แสดงลักษณะของชิ้นฉนวนทดสอบ ในการทดสอบเปลวไฟทดสอบมีขนาด 20 mm ตามแนวตั้งและเวลาที่ลนเปลวไฟกับชิ้นงานทดสอบเท่ากับ 10 วินาที



รูปที่ 18 ชิ้นฉนวนทดสอบการทนต่อการลามไฟ

จากการทดสอบคุณสมบัติทางกลและทางไฟฟ้าของวัสดุฉนวนที่ได้กล่าวมาข้างต้น ผลการทดสอบที่ได้แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุฉนวนสำหรับฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์

คุณสมบัติ		ข้อกำหนดของ กฟภ.[3]	ผลการทดสอบ
Before heat aging test	Tensile strength	มากกว่า 3.92 Mpa	5.62 MPa
	Elongation at break	มากกว่า 300%	370.28%
After heat aging test	Tensile strength	มากกว่า 0.31 MPa	3.23 MPa
	Elongation at break	มากกว่า 240%	285.64%
Before UV aging test	Withstand voltage	10kV/mm	20.1 kV/mm
After UV aging test		10kV/mm	17.6 kV/mm
Power Frequency Withstand Voltage Test(Dry)*		40kV/mm	40kV/mm
Flammability Test		ผ่าน IEC 60695-11-10, UL94	ผ่าน UL94 V-0

*ทดสอบหลังจากขึ้นรูปวัสดุฉนวนเป็นชิ้นงานเรียบร้อยแล้ว

จากตารางที่ 6 พบว่า วัสดุฉนวนที่ใช้สำหรับทำฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์มีสมบัติการรับแรงดึงเป็นไปตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ก่อนการบ่มเร่งวัสดุฉนวนสามารถรับแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 5.62 MPa และมีระยะยืด ณ จุดขาดเท่ากับ 370.28% ซึ่งมีค่ามากกว่า 3.92 MPa และ 300% ตามลำดับ หลังบ่มเร่งวัสดุฉนวนสามารถรับแรงดึงสูงสุดลดลงเหลือ 3.23 MPa และมีระยะยืด ณ จุดขาดลดลงเหลือ 285.64% สมบัติรับแรงดึงที่ลดลงจากการบ่มเร่งยังคงมีค่ามากกว่า 0.31 MPa และ 240% ตามที่กำหนดในตารางที่ 3

สำหรับความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของวัสดุฉนวน ก่อนการบ่มเร่งด้วยรังสียูวี วัสดุฉนวนมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า 20.1 kV/mm หลังจากการบ่มเร่งด้วยรังสียูวีเป็นเวลา 420 ชั่วโมง ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของวัสดุฉนวนลดลงเหลือ 17.6 kV/mm หรือลดลงคิดเป็น 12.44% แต่ทั้งนี้ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของวัสดุฉนวนลดลงยังคงมีค่ามากกว่า 10 kV/mm นอกจากนั้น ผลของการเติมสารป้องกันการลามไฟ ทำให้วัสดุฉนวนมีสมบัติการทนต่อการลามไฟผ่านมาตรฐาน UL94 จากการทดสอบชิ้นฉนวนทดสอบจำนวน 10 ชิ้น ฉนวนทุกชิ้นสามารถทนต่อการลามไฟได้ในระดับ V-0

4.3 การออกแบบและการติดตั้งใช้งาน

งานวิจัยนี้ อาศัยคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบและการวิเคราะห์ทางไฟฟ้า เพื่อให้การออกแบบสะดวกรวดเร็ว มีความยืดหยุ่นในการปรับเปลี่ยนหรือปรับปรุงรูปแบบของฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ รวมถึงเพื่อความสะดวกในการจัดทำแม่พิมพ์เพื่อขึ้นรูปชิ้นงาน ในส่วนการออกแบบบนคอมพิวเตอร์ได้ใช้โปรแกรมเขียนแบบสร้างแบบพิมพ์เขียวทั้ง 2 มิติและ 3 มิติ รวมถึงใช้โปรแกรมประยุกต์ไฟไนเอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์ความเครียดสนามไฟฟ้าแรงสูงและศักย์ไฟฟ้าแรงสูง การออกแบบฉนวนในทางวิศวกรรมไฟฟ้า คุณสมบัติที่ต้องการของวัสดุฉนวนที่ดี เราสามารถพิจารณาจากคุณสมบัติดังต่อไปนี้[6]

<u>คุณสมบัติทางไฟฟ้า</u>

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

<u>คุณสมบัติทางกลของฉนวน</u> ฉนวนจะต้องมีความทนทานต่อแรงกล เนื่องจากในทางปฏิบัติวัสดุฉนวนนอกจากต้องทำหน้าที่ป้องกันการลัดวงจรแล้ว ยังต้องรับน้ำหนัก แรงกด แรงบิด หรือแรงดึง

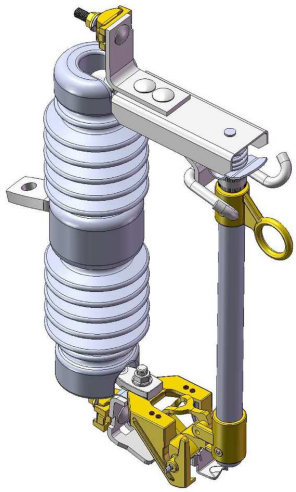
<u>คุณสมบัติทางความร้อนของฉนวน</u> ฉนวนที่ดีต้องทนความร้อนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้า รวมถึงสามารถระบายความร้อนได้ดี ไม่ติดไฟ มีสัมประสิทธิขยายตัวทางความร้อนต่ำ

<u>คุณสมบัติความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมีได้ดี</u> ฉนวนต้องไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมี และไม่เป็นพิษ

<u>คุณสมบัติความทนทานต่อสภาพแวดล้อม</u> ณ สถานที่ที่ติดตั้งใช้งาน ฉนวนต้องทนต่อน้ำมัน โอโซน ไม่ดูดซึมน้ำหรือความชื้น ทนต่อการแผ่รังสี

การออกแบบเริ่มต้นด้วยการสร้างแบบจำลอง 3 มิติของฟิวส์คัทเอาท์ตามมาตรฐาน ANSI/IEEE C37.40 แบบจำลอง 3 มิติดังกล่าวใช้ในการออกแบบฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์บริเวณจุดต่อด้านบนและจุดต่อด้านล่าง รวมถึงแบบจำลองจะถูกใช้สำหรับการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าแรงสูงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์(Finite Elements Method) การสร้างแบบจำลอง 3 มิติทำโดยการวัดขนาดและมิติของส่วนประกอบทุกชิ้นของฟิวส์คัทเอาท์ จากนั้น

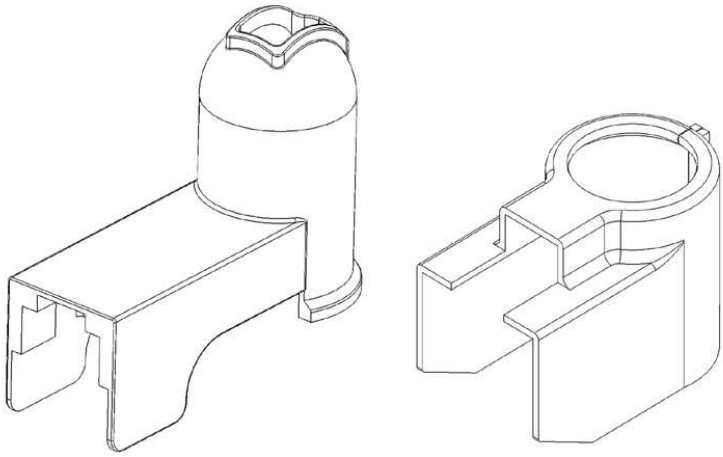
นำขนาดที่วัดได้มาสร้างเป็นชิ้นส่วนประกอบต่างๆ เพื่อนำมาประกอบกันเป็นแบบจำลองที่สมบูรณ์ รูปที่ 19 แสดงลักษณะของแบบจำลอง 3 มิติของฟิวส์คัทเอาท์ เมื่อนำชิ้นส่วนประกอบต่างๆ รวมกันเรียบร้อยแล้ว



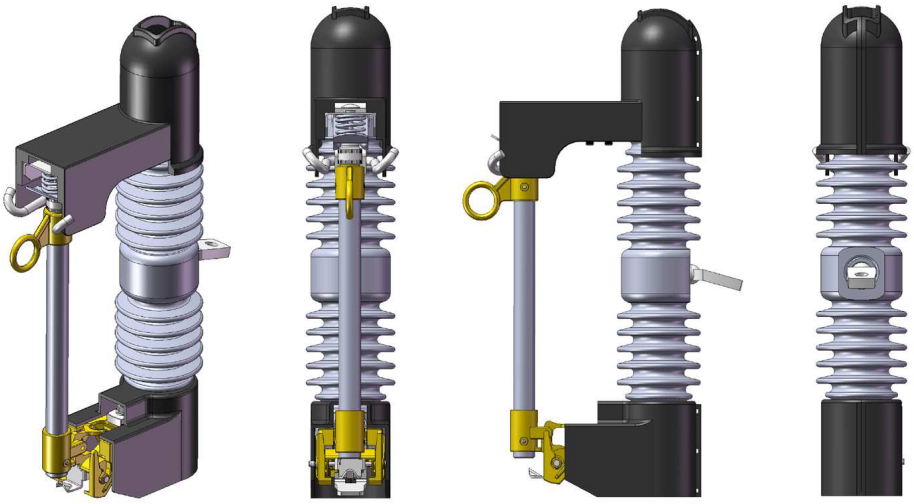
รูปที่ 19 แบบจำลอง 3 มิติของฟิวส์คัทเอาท์

การออกแบบฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์เริ่มจากการสร้างแบบจำลองจากดินเหนียวญี่ปุ่น ดังแสดงในรูปที่ 20 แบบจำลองดังกล่าวถูกใช้เป็นแบบในการวัดขนาดสำหรับนำไปสร้างต้นแบบฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์อีกครั้งหนึ่ง เหตุที่ต้องทำการสร้างแบบจำลองจากดินเหนียวญี่ปุ่นก่อน เนื่องมากจากต้องการทราบรูปแบบและขนาดของฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ที่สามารถติดตั้งได้พอดีกับฟิวส์คัทเอาท์ จากนั้น เราจะทำการวัดขนาดแบบจำลองจากดินเหนียวญี่ปุ่นของฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์และนำไปสร้างแบบจำลองสามมิติต่อไป รูปที่ 21 แสดงลักษณะของแบบจำลองสามมิติของฉนวนหุ้มจุดต่อด้านบนและด้านล่างของฟิวส์คัทเอาท์ ข้อสำคัญของการออกแบบฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์คือ การติดตั้งฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ไม่จำเป็นต้องดัดแปลงอุปกรณ์เดิมและไม่ต้องถอดประกอบสายไฟฟ้าแต่อย่างใด โดยบริเวณด้านหลังของฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์จะมีรอยผ่าเพื่อให้ง่ายและสะดวกต่อการติดตั้งใช้งาน

รูปที่ 20 แบบจำลองดินเหนียวของฉนวนหุ้มจุดต่อด้านบนและด้านล่างของฟิวส์คัทเอาท์



(ก) ฉนวนหุ้มจุดต่อด้านบนและด้านล่าง



(ข) แบบจำลองการติดตั้งฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์

รูปที่ 21 แบบจำลองสามมิติของฉนวนหุ้มจุดต่อด้านบนและด้านล่างของฟิวส์คัทเอาท์

การสร้างแม่พิมพ์โลหะจะใช้แบบจำลองสามมิติของฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ แม่พิมพ์โลหะประกอบด้วยแม่พิมพ์ 2 ชุด ได้แก่ แม่พิมพ์โลหะสำหรับฉนวนหุ้มจุดต่อด้านบนและแม่พิมพ์โลหะสำหรับหุ้มจุดต่อด้านล่าง แม่พิมพ์โลหะทั้งสองชุด แสดงดังรูปที่ 22 การขึ้นรูปชิ้นงานของฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ใช้วิธีการกดอัดด้วยความร้อน ซึ่งเป็นวิธีการขึ้นรูปที่เหมาะสมกับชิ้นงานที่มีลักษณะไม่ซับซ้อน ฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ที่ผ่านการออกแบบและขึ้นรูปเป็นชิ้นงานจริงแสดงดังรูปที่ 23 (ก) และลักษณะการติดตั้งฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์กับฟิวส์คัทเอาท์ แสดงดังรูปที่ 23 (ข)

(ก) แม่พิมพ์โลหะสำหรับฉนวนหุ้มจุดต่อด้านบน

(ข) แม่พิมพ์โลหะสำหรับฉนวนหุ้มจุดต่อด้านล่าง

รูปที่ 22 แม่พิมพ์โลหะสำหรับขึ้นรูปฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์

(ก) ฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์

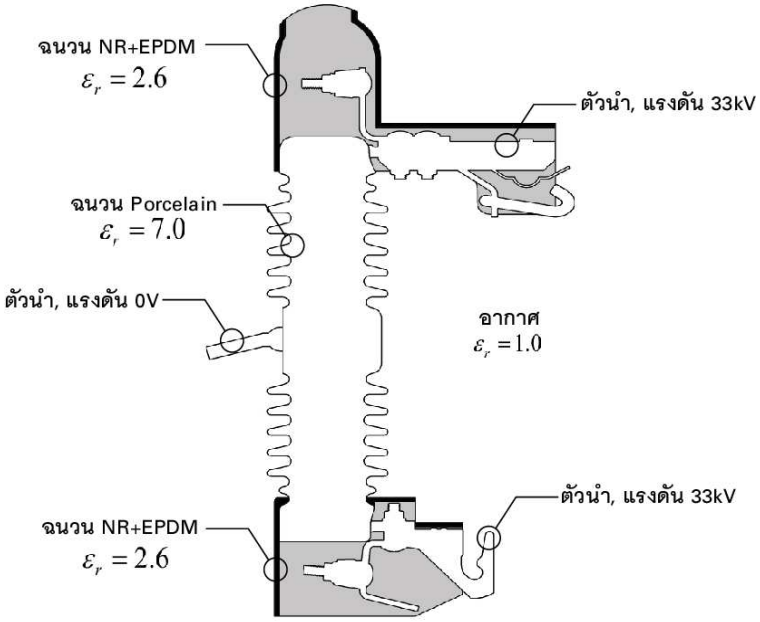
(ข) การติดตั้งฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์

รูปที่ 23 ชิ้นงานฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์และลักษณะการติดตั้ง

จากฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ที่ทำการขึ้นรูปแล้ว ฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ต้องทำการทดสอบ ภายในห้องปฏิบัติการ เพื่อแน่ใจได้ว่าฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์จะสามารถทนระดับแรงดันที่จะนำไปใช้งานได้เป็นอย่างดี การทดสอบอ้างอิงมาตรฐาน IEC 60243 -1 การทดสอบจะป้อนแรงดันทดสอบให้กับฉนวน โดยการเพิ่มแรงดันทดสอบจากศูนย์โวลต์จนถึง 40 kV ในอัตรา 1 kV/Sec. และป้อนแรงดันค้างไว้ 1 นาที ฉนวนที่ผ่านการทดสอบต้องไม่เกิดการเบรกดาวน์และวาบไฟตามผิว จากการทดสอบฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ทั้งหมด 5 ชุด ฉนวน 1 ชุดประกอบด้วยฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ด้านบนและด้านล่าง ผลปรากฏว่า ฉนวนทุกชุดสามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้มากกว่า 40 kV ไม่มีฉนวนชุดใดเกิดการเบรกดาวน์และเกิดวาบไฟตามผิวที่ระดับแรงดันทดสอบแต่อย่างใด รูปที่ 24 แสดงการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนที่ระดับแรงดัน 40 kV ในสภาวะแห้ง

รูปที่ 24 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนที่ระดับแรงดัน 40 kV

สำหรับการจำลองผลด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ผู้วิจัยสร้างแบบจำลองสองมิติสำหรับการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่เกิดบริเวณโดยรอบของฟิวส์คัทเอาท์ เมื่อมีการติดตั้งฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ จุดประสงค์ของการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าเพื่อดูผลของความเครียดสนามไฟฟ้าที่กระทำต่อฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ภายใต้ระดับแรงดันใช้งาน แบบจำลองสองมิติแสดงดังรูปที่ 25

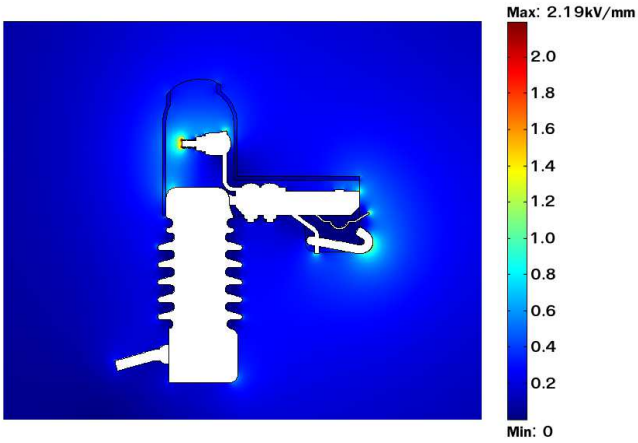


รูปที่ 25 แบบจำลอง 2 มิติสำหรับการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า

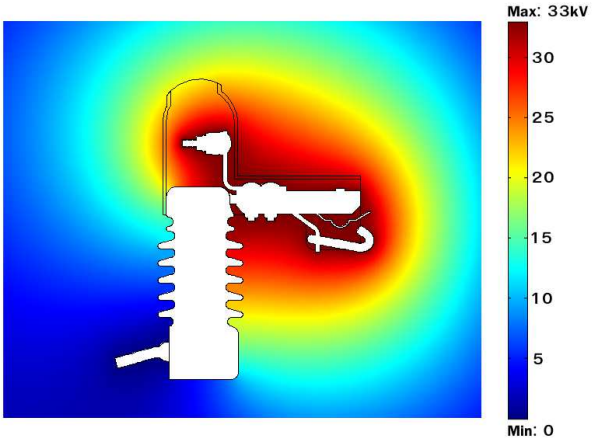
จากแบบจำลองในรูปที่ 25 เพื่อให้การวิเคราะห์สะดวกและแบบจำลองไม่มีความซับซ้อน แบบจำลองจะละเลยในส่วนของกระบอกฟิวส์ จุดเชื่อมต่อต่างๆ บริเวณ Upper Hood และ Lower Hinge สำหรับเงื่อนไขขอบเขตการวิเคราะห์มีดังนี้

- ตัวนำไฟฟ้ากำหนดให้มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 33 kV
- ฉนวนปอร์ซเลนกำหนดให้มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 7.0
- ฉนวนยางพาราผสมยางอีพีดีเอ็มกำหนดให้มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 2.6 ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดสอบจากห้องปฏิบัติการ
- บริเวณโดยรอบฉนวนและตัวนำกำหนดให้เป็นอากาศ และมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 1.0
- การแก้สมการเพื่อหาผลเฉลยใช้วิธี GMRES ร่วมกับตัวปรับสภาพล่วงหน้าแบบ SSOR และกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนยินยอม(Tolerance) ของผลเฉลยเท่ากับ 1×10^{-6}
- บริเวณที่เป็นฉนวนไฟฟ้าและตัวนำทั้งหมดกำหนดให้ไม่มีประจุค้าง(Space Charge, $\rho_S = 0$)
- ฉนวนยางพาราผสมยางอีพีดีเอ็มเป็นฉนวนสมบูรณ์แบบ(Perfect Dielectric) ไม่มีค่าความนำไฟฟ้า(Electrical Conductivity) และมีความหนาเท่ากับ 4 mm

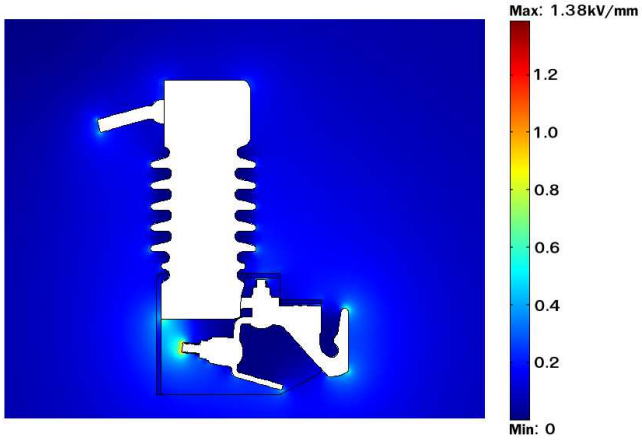
ผลการวิเคราะห์ศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 26 ถึงรูปที่ 27 ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณฉนวนหุ้มจุดต่อด้านบนแสดงดังรูปที่ 26 ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดมีค่าเท่ากับ 2.19 kV/mm และเกิดบริเวณน็อตของข้อรัดสายไฟฟ้า รูปที่ 27 แสดงการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้ารอบฉนวนหุ้มจุดต่อด้านบน ฉนวนไฟฟ้าบริเวณ Upper Hood เป็นจุดที่ได้รับศักย์ไฟฟ้าสูงสุด ฉนวนจุดดังกล่าวได้รับศักย์ไฟฟ้าประมาณ 32.8 kV สำหรับฉนวนหุ้มจุดต่อด้านล่าง ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 1.38 kV/mm และเกิดบริเวณน็อตของข้อรัดสายไฟฟ้าเช่นเดียวกับด้านบน ดังแสดงในรูปที่ 28 ฉนวนหุ้มจุดต่อด้านล่างได้รับศักย์ไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 32.9 kV ณ บริเวณ Lower Hinge ของฟิวส์คัทเอาท์ดังรูปที่ 29 ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นบริเวณจุดต่อด้านบนและด้านล่างมีค่าต่ำกว่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนที่ได้จากการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60243-1 ดังแสดงในตารางที่ 6 ด้วยเหตุนี้ ฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ที่ออกแบบและพัฒนาขึ้น จึงสามารถทนต่อสภาพการใช้งาน ณ ระดับแรงดันไฟฟ้า 33 kV ได้โดยที่ไม่เกิดการเบรกดาวน์ของฉนวนขึ้นแต่อย่างใด



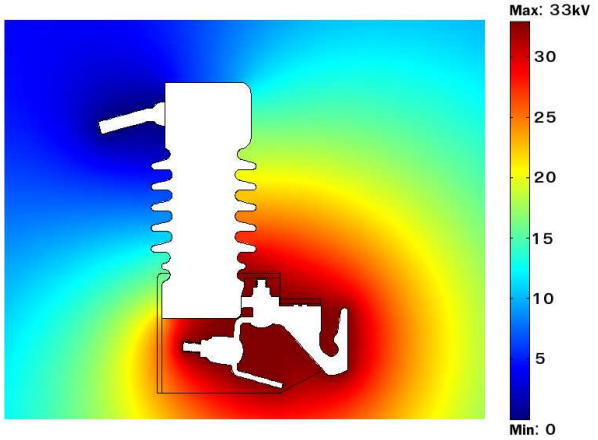
รูปที่ 26 ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณโดยรอบฉนวนหุ้มจุดต่อด้านบนของฟิวส์คัทเอาท์



รูปที่ 27 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าบริเวณโดยรอบฉนวนหุ้มจุดต่อด้านบนของฟิวส์คัทเอาท์

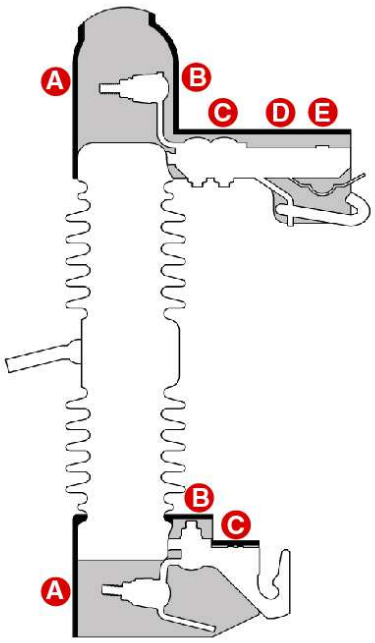


รูปที่ 28 ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณโดยรอบฉนวนหุ้มจุดต่อด้านล่างของฟิวส์คัทเอาท์



รูปที่ 29 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าบริเวณโดยรอบฉนวนหุ้มจุดต่อด้านล่างของฟิวส์คัทเอาท์

ฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์มีหน้าที่สำคัญในการป้องกันการลัดวงจรที่เกิดขึ้นบริเวณจุดต่อสายด้านบนและด้านล่าง ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงทำการวิเคราะห์ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการสัมผัสของวัตถุที่มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับศูนย์โวลต์หรือวัตถุลงกราวด์ วัตถุลงกราวด์จะสัมผัสตรงจุดต่อสายด้านบนและด้านล่าง แสดงดังรูปที่ 30 วัตถุที่มาสัมผัสในแต่ละจุดกำหนดให้เป็นทรงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10 mm และเป็นตัวนำที่มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับศูนย์โวลต์

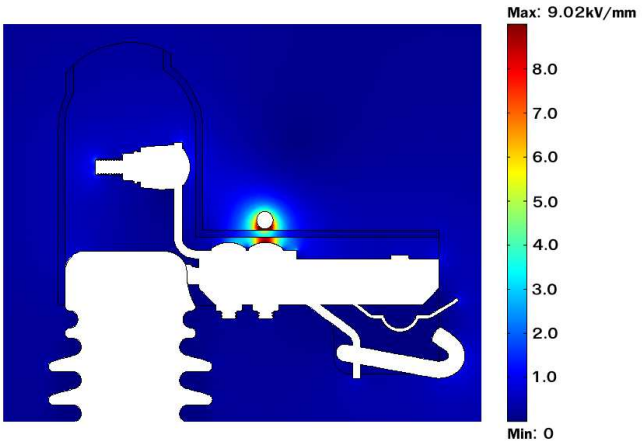


รูปที่ 30 ตำแหน่งการจำลองการสัมผัสของวัตถุลงกราวด์กับฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์

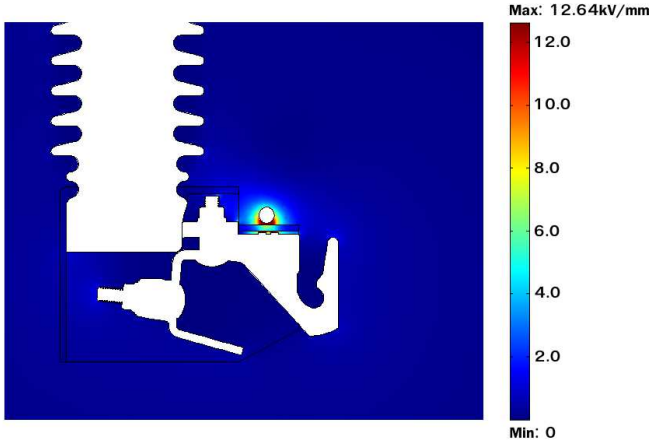
จากการจำลองการสัมผัสของตัวนำลงกราวด์กับฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ ณ ตำแหน่งต่างๆ พบว่าฉนวนหุ้มจุดต่อด้านบนที่จุด C มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด เมื่อเทียบกับจุดสัมผัสอื่นๆ บริเวณด้านบนความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุด C มีค่าเท่ากับ 9.02 kV/mm สำหรับฉนวนหุ้มจุดต่อด้านล่าง จุดสัมผัสที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดคือจุด C โดยความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 12.64 kV/mm ทั้งนี้ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดดังกล่าวยังคงมีค่าต่ำกว่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนที่มีค่าเท่ากับ 20 kV/mm ดังนั้นความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการสัมผัสของวัตถุลงกราวด์จึงไม่ทำให้เกิดการเบรกดาวน์ของฉนวนขึ้น รูปที่ 31 และรูปที่ 32 แสดงความเครียดสนามไฟฟ้าที่ฉนวนหุ้มจุดต่อด้านบนและด้านล่าง ณ จุดสัมผัส C ตามลำดับ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดต่างๆ ทั้งด้านบนและด้านล่าง แสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดสัมผัสต่างๆ

จุดสัมผัส	ความเครียดสนามไฟฟ้า(kV/mm)				
	A	B	C	D	E
ฉนวนจุดต่อด้านบน	5.41	8.75	9.02	5.89	5.94
ฉนวนจุดต่อด้านล่าง	3.75	11.76	12.64	-	-



รูปที่ 31 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ฉนวนหุ้มจุดต่อด้านบน ณ จุดสัมผัส C



รูปที่ 32 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ฉนวนหุ้มจุดต่อด้านล่าง ณ จุดสัมผัส C

จากผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณจุดสัมผัสของวัตถุจะเห็นว่า จุดสัมผัส C บริเวณฉนวนด้านล่างมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงที่สุด เมื่อเทียบกับจุดสัมผัสอื่นๆ ทั้งด้านบนและด้านล่าง ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงทดลองลดความหนาของฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ เพื่อดูผลของความหนาของฉนวนที่มีต่อความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดสัมผัส C ซึ่งเป็นจุดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงที่สุดเมื่อมีวัตถุลงกราวด์มาสัมผัส การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดสัมผัส C กำหนดให้ฉนวนมีความหนาเท่ากับ 1 mm, 2 mm, 3 mm และ 4 mm ตามลำดับ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดสัมผัส C ที่ความหนาของฉนวนค่าต่างๆ แสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดสัมผัส C ที่ความหนาของฉนวนค่าต่างๆ

	ความหนาฉนวน(mm)			
ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด(kV/mm)	1	2	3	4
	22.41	18.78	16.06	12.64
ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของฉนวน(kV/mm)*	20.10			

*จากความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของฉนวนที่ได้จากการทดสอบดังตารางที่ 6

จากตารางที่ 8 พบว่า ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ความหนาของฉนวนเท่ากับ 2 mm, 3 mm และ 4 mm มีค่าต่ำกว่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของฉนวน แต่เมื่อลดความหนาของฉนวนลงเหลือ 1 mm ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดมีค่าเท่ากับ 22.41 kV/mm ความเครียดสนามไฟฟ้าดังกล่าวมีค่าสูงกว่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของฉนวน จึงมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดการเบรกดาวน์ของฉนวนขึ้นได้ถ้าฉนวนมีความหนาเพียง 1 mm การออกแบบฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ในงานวิจัยนี้ กำหนดให้ฉนวนมีความหนาเท่ากับ 4 mm ดังนั้น จึงมั่นใจได้ว่าฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์จะไม่เกิดการเบรกดาวน์ของฉนวนและเกิดการวาบไฟตามผิว เมื่อนำไปใช้งานภายใต้แรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่าย 22 kV และ 33 kV

จากฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ที่ผ่านการขึ้นรูปและทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ผู้วิจัยได้นำฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ไปทดสอบติดตั้งใช้งานจริงในระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้าแรงสูง 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคอำเภอธัญบุรี รูปที่ 33 แสดงลักษณะการติดตั้งฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์กับฟิวส์คัทเอาท์บริเวณต้นสายส่ง โดยฟิวส์คัทเอาท์ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ตัดตอนและอุปกรณ์ป้องกันสายส่ง สำหรับรูปที่ 34 เป็นการติดตั้งฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์กับฟิวส์คัทเอาท์ที่เป็นอุปกรณ์ตัดตอนและอุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลงระบบจำหน่ายที่ติดตั้งแบบเสาต้นเดียว

รูปที่ 33 การติดตั้งฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์กับฟิวส์คัทเอาท์ ณ บริเวณต้นสายส่ง

รูปที่ 34 การติดตั้งฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์กับฟิวส์คัทเอาท์ของหม้อแปลงระบบจำหน่าย

5. สรุป

จากปัญหาการชำรุดเสียหายและการลัดวงจรบริเวณจุดต่อสายไฟฟ้าของฟิวส์คัทเอาท์ที่ใช้อยู่ในระบบจำหน่ายแรงสูงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค งานวิจัยนี้ จึงได้ออกแบบและพัฒนาฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว ฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์พัฒนาจากวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางอีพีดีเอ็มเพื่อเพิ่มคุณสมบัติความทนทานต่อสภาพแวดล้อม รวมถึงการใช้อะลูมิเนียมไทรไฮเดรตเพื่อทำให้วัสดุฉนวนมีความทนต่อการลามไฟได้ดี วัสดุฉนวนที่ใช้ทำฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ผ่านการทดสอบคุณสมบัติทางกลและทางไฟฟ้าประกอบด้วย การทดสอบสมบัติการรับแรงดึง(ASTM D412), การทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่กำลัง(IEC60243-1) และการทดสอบการทนต่อการลามไฟ (UL94) จากการทดสอบคุณสมบัติตามมาตรฐานพบว่า วัสดุฉนวนมีคุณสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยก่อนการบ่มเร่ง วัสดุฉนวนสามารถรับแรงดึงและมีระยะยืด ณ จุดขาดเท่ากับ 5.62 MPa และ 370.28 % ตามลำดับ สมบัติการรับแรงดึงก่อนการบ่มเร่งดังกล่าวมีค่ามากกว่า 3.92 MPa และ 300 % ตามที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคกำหนด หลังจากการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 96 ชั่วโมง วัสดุฉนวนรับแรงดึงได้ลดลงเหลือ 3.23 MPa และมีระยะยืด ณ จุดขาดลดลงเหลือ 285.64 % แต่ทั้งนี้ สมบัติการรับแรงดึงที่ลดลงยังคงมีค่ามากกว่า 0.31 MPa และ 240% ตามที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคกำหนด การทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของวัสดุฉนวนก่อนการบ่มเร่งด้วยรังสียูวี วัสดุฉนวนมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า 20.1 kV/mm หลังจากการบ่มเร่งด้วยรังสียูวีเป็นเวลา 420 ชั่วโมง ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของวัสดุฉนวนลดลงเหลือ 17.6 kV/mm หรือลดลง 12.44% อย่างไรก็ตาม ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของวัสดุฉนวนที่ลดลงยังคงมีค่ามากกว่า 10 kV/mm นอกจากนั้น หลังจากการขึ้นรูปชิ้นงานฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ด้วยแม่พิมพ์แบบกดอัดด้วยความร้อน ชิ้นงานฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ต้องผ่านการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่กำลังในสภาวะแห้ง ณ ระดับแรงดัน 40 kV เป็นเวลา 1 นาที จากการทดสอบฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์จำนวน 5 ชุด ผลทดสอบปรากฏว่า ฉนวนทุกชุดสามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้มากกว่า 40 kV ไม่มีฉนวนชุดใดเกิดการเบรกดาวน์และเกิดวาบไฟตามผิวที่ระดับแรงดันทดสอบแต่อย่างใด ด้วยเหตุนี้ จึงมั่นใจได้ว่าฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์สามารถนำไปใช้งานในระบบจำหน่ายแรงสูงที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 22 kV และ 33 kV ได้เป็นอย่างดี

สำหรับการวิเคราะห์ผลของศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ โดยใช้แบบจำลองสองมิติร่วมกับวิธีไฟไนเอลิเมนต์ พบว่า บริเวณฉนวนจุดต่อด้านบนมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดมีค่าเท่ากับ 2.19 kV/mm ส่วนฉนวนหุ้มจุดต่อด้านล่าง ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 1.38 kV/mm นอกจากนั้น ผู้วิจัยได้จำลองผลของการสัมผัสผิวฉนวนด้วยวัตถุลงกราวด์ ซึ่งเป็นการจำลองเหตุการณ์ในกรณีที่มีกิ่งไม้ สัตว์เลื้อยคลานหรือสัตว์ปีกมาสัมผัสบริเวณฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ จากผลการจำลอง พบว่า บริเวณฉนวนจุดต่อด้านบน เมื่อมีวัตถุลงกราวด์มาสัมผัสกับพื้นผิวฉนวนบริเวณ Upper Hood จะทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าจุดอื่นๆ โดยความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 9.02 kV/mm การสัมผัสของวัตถุลงกราวด์บริเวณฉนวนจุดต่อด้านล่างทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 12.64 kV/mm ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดดังกล่าวเกิดขึ้นบริเวณ Lower Hinge ใกล้กับจุดรองรับกระบอกฟิวส์ จากผลการจำลองสนามไฟฟ้าทั้งหมด สรุปได้ว่า ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นบริเวณจุดต่อด้านบนและด้านล่างมีค่าต่ำกว่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนคือ 20.1 kV/mm จึงไม่อาจทำให้ฉนวนเกิดการเบรกดาวน์ได้

จากวัสดุฉนวนที่ผ่านการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกล รวมถึงชิ้นงานฉนวนจุดต่อฟิวส์คัท-เอาท์ที่ผ่านการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่กำลังในห้องปฏิบัติการ ผู้วิจัยได้นำฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ไปทดสอบติดตั้งใช้งานจริงในระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้าแรงสูง 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคอำเภอธัญบุรี ในสองลักษณะคือ แบบแรกเป็นการติดตั้งฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์กับฟิวส์คัทเอาท์บริเวณต้นสายส่ง โดยฟิวส์คัทเอาท์ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ตัดตอนและอุปกรณ์ป้องกันสายส่ง ส่วนแบบที่สองเป็นการติดตั้งฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์กับฟิวส์คัทเอาท์ที่ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ตัดตอนและอุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลงระบบจำหน่ายที่ติดตั้งแบบเสาต้นเดียว แต่ทั้งนี้ การทดสอบใช้งานจริงของฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ในระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้ายังต้องมีการวิจัยและพัฒนาต่อไปในอนาคต เพื่อศึกษาและเก็บข้อมูลการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุฉนวนหลังจากผ่านการเป็นระยะๆ และนำข้อมูลที่ได้มาปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุฉนวนให้เหมาะสมต่อสภาพการใช้งานภายใต้สภาพแวดล้อมของประเทศไทย

6. ข้อเสนอแนะ

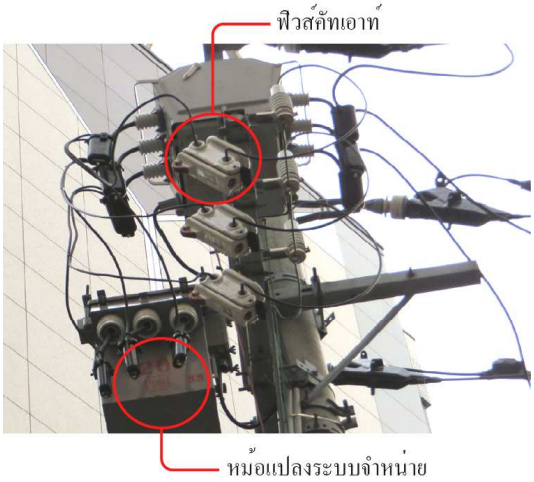
- การติดตั้งใช้งานฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์จริงในระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้าแรงสูง ควรมีการวิจัยเพิ่มเติมในประเด็นการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุฉนวนหลังจากผ่านการใช้งาน เพื่อนำข้อมูลที่ได้จากการวิจัยมาปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุฉนวนให้เหมาะสมต่อการใช้งานมากขึ้น
- การขึ้นรูปชิ้นงานฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ ควรควบคุมส่วนผสมของยางคอมปาวด์ให้ได้คุณภาพตามที่กำหนด หากยางคอมปาวด์มีคุณสมบัติไม่เป็นไปตามกำหนดจะทำให้ชิ้นงานฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์มีคุณสมบัติทางกลและทางไฟฟ้าผิดไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติทางไฟฟ้า ฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์อาจไม่สามารถทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้ ดังรูป 35 แสดงการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนเมื่อวัสดุฉนวนมีคุณสมบัติไม่เป็นไปตามมาตรฐาน

รูปที่ 35 การเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ในการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า

- การออกแบบฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ในโครงการวิจัยนี้ ยังมีจุดอ่อนในการออกแบบที่ควรทำการปรับปรุงอยู่บางประการ ได้แก่ การยึดรอยผ่าบริเวณด้านหลังของฉนวนที่ใช้เคเบิลไทร์ และฉนวนจุดต่อด้านล่างที่ไม่สามารถปกปิดส่วนที่มีไฟได้ทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 36 เนื่องจากฉนวนจุดต่อฟิวส์

คัทเอาท์จะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของกระบอกฟิวส์ในขณะเกิดการลัดวงจรได้ ข้อจำกัดนี้ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคอาจพิจารณาเปลี่ยนชนิดของฟิวส์คัทเอาท์เป็นแบบฉนวนปอร์ชเลนปิดมิดชิดกับบริเวณที่เป็นชุมชน ดังแสดงในรูปที่ 37 ซึ่งเป็นตัวอย่างฟิวส์คัทเอาท์ที่ใช้กับหม้อแปลงระบบจำหน่ายในประเทศญี่ปุ่น

รูปที่ 36 บริเวณฉนวนจุดต่อด้านล่างที่ไม่สามารถออกแบบให้มีฉนวนป้องกันได้



รูปที่ 37 ฟิวส์คัทเอาท์สำหรับหม้อแปลงระบบจำหน่ายในประเทศญี่ปุ่น

7. เอกสารอ้างอิง

[1] สถาบันวิจัยยาง, สถิติยางไทย:ปริมาณการส่งออกยางแยกตามประเภท, http://www.rubberthai.com/statistic/stat_index.htm.

[2] คมสัน เพ็ชรรักษ์ และคณะ, การวิเคราะห์สาเหตุของความเสียหายที่เกิดขึ้นต่อดรอปเอาท์ฟิวส์คัทเอาท์ในระบบจำหน่ายของ กฟภ., รายงานวิจัย, ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

[3] Liver Part Insulation Covers, Power System Standard Division, Provincial Electricity Authority, Specification No. RHOT-099/2552.

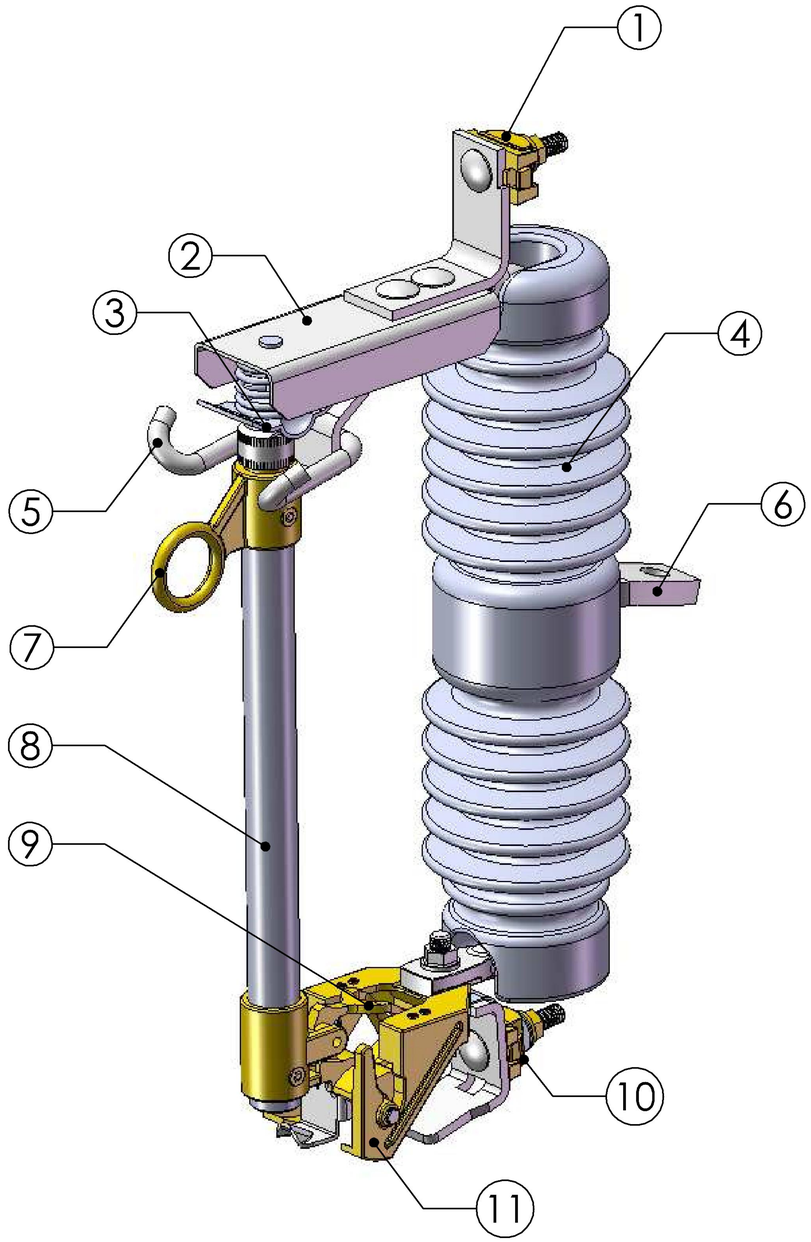
[4] พงษ์ธร แซ่อุย, ยาง : ชนิด สมบัติ และการใช้งาน, พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพฯ : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2548.

[5] พงษ์ธร แซ่อุย และชาคริต สิริสิงห, "การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล ความทนทานต่อความร้อนและความต้านทานโอโซนของยางผสม NR/EPDM", ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2548.

[6] สำรวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528.

ภาคผนวก

แบบฟิวส์คัทเอาท์

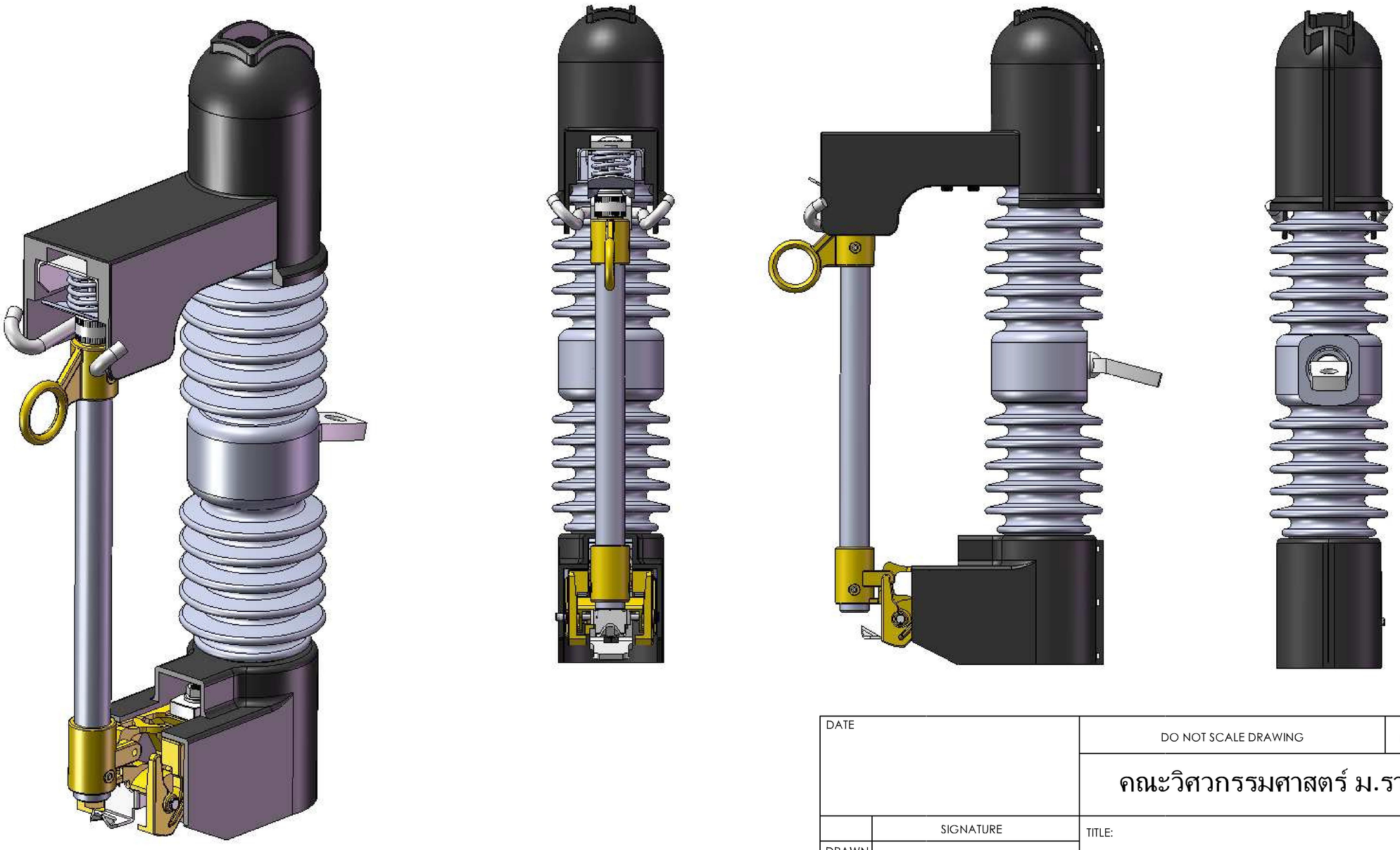


รายละเอียดส่วนประกอบ

1. Upper PG Connector
2. Upper Hood
3. Upper Contact
4. Porcelain Insulator
5. Loadbuster Hook
6. Mounting Pin
7. Pull Ring
8. Fuse Tube
9. Lower Contact
10. Lower PG Connector
11. Lower Hinge

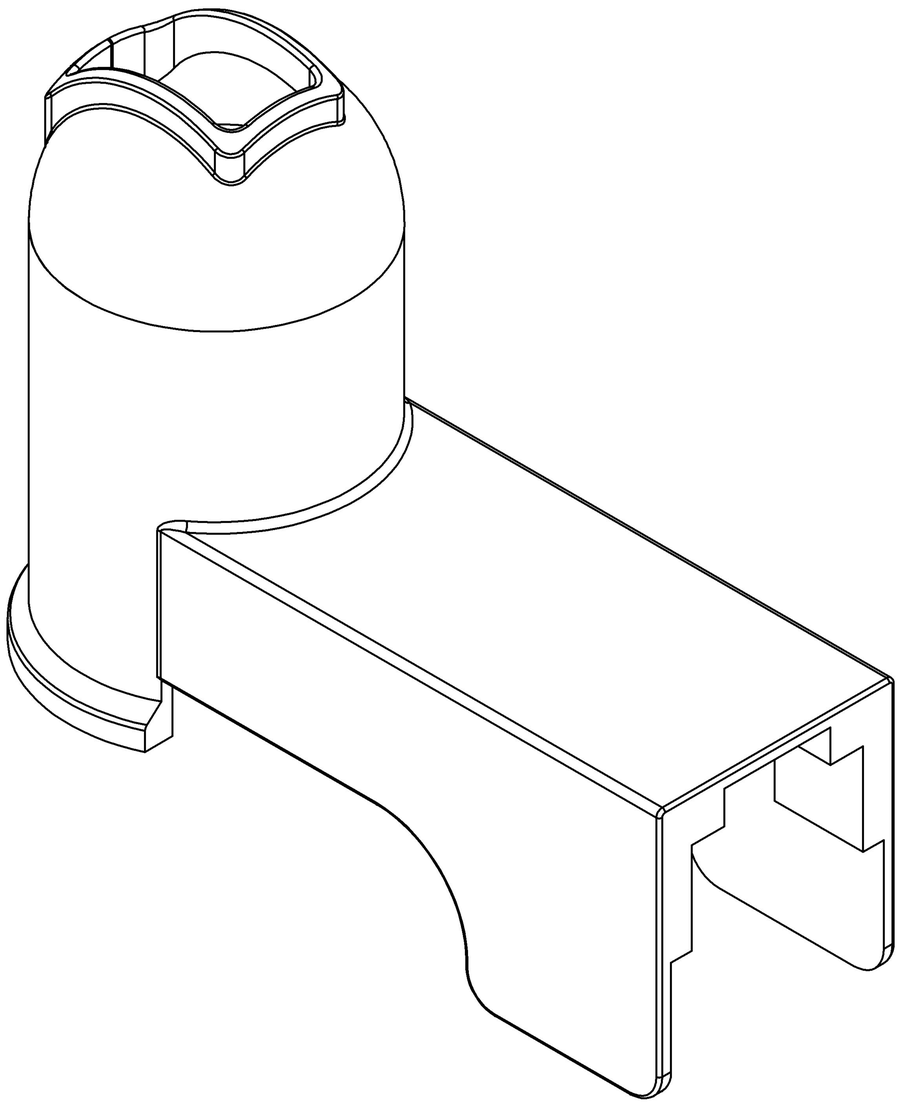
DATE		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
		คณะวิศวกรรมศาสตร์ ม.ราชมงคลธัญบุรี	
	SIGNATURE	TITLE: RDG5550078	
DRAWN			
CHK'D			
APPV'D			
MFG			
MATERIAL: Fuse Cut-Out		DWG NO. DWG-A4-001	A4
WEIGHT:		SCALE: 1:4	SHEET 1 OF 1

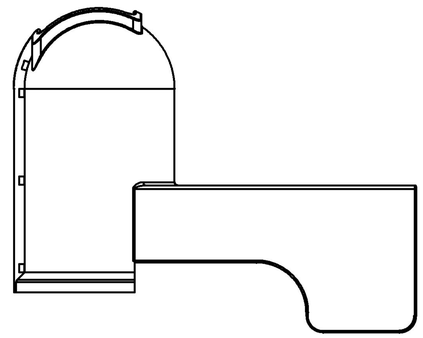
ภาพประกอบฉนวนด้านบนและด้านล่าง



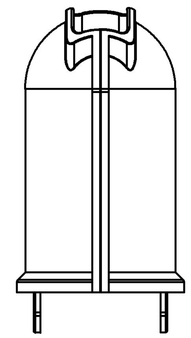
DATE	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
	คณะวิศวกรรมศาสตร์ ม.ราชมงคลธัญบุรี	
SIGNATURE	TITLE: RDG5550078	
DRAWN		
CHK'D		
APPV'D		
MFG		
MATERIAL: NR+EPDM	DWG NO. DWG-A4-002	A4
WEIGHT:	SCALE: 1:4, 1:5	SHEET 1 OF 1

แบบฉนวนหุ้มจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ด้านบน

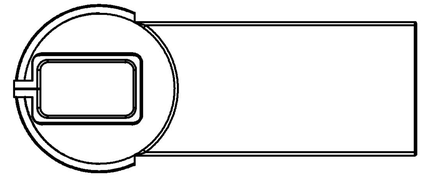




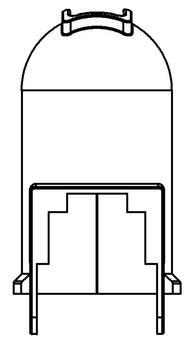
ด้านข้าง



ด้านหลัง



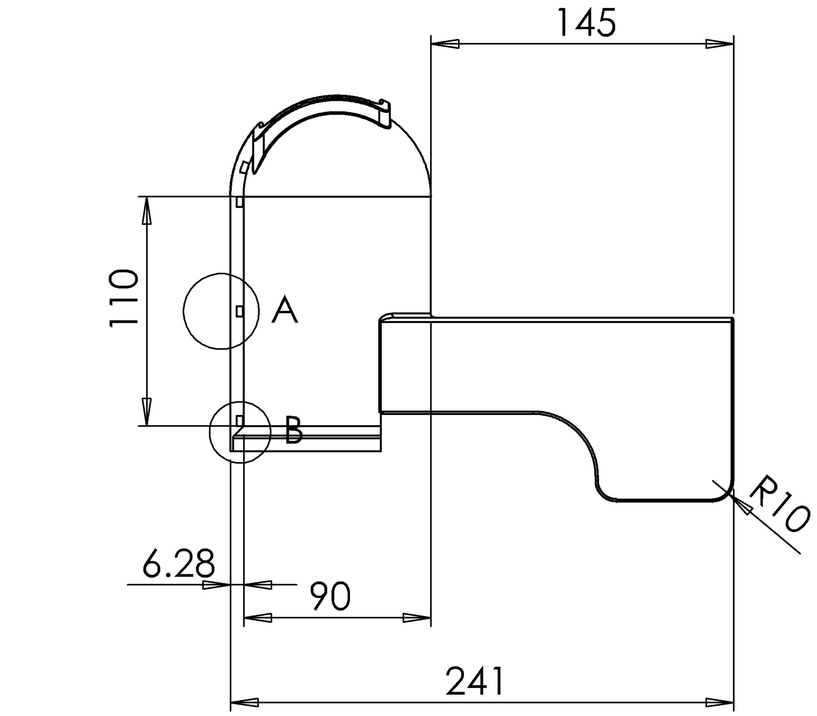
ด้านบน

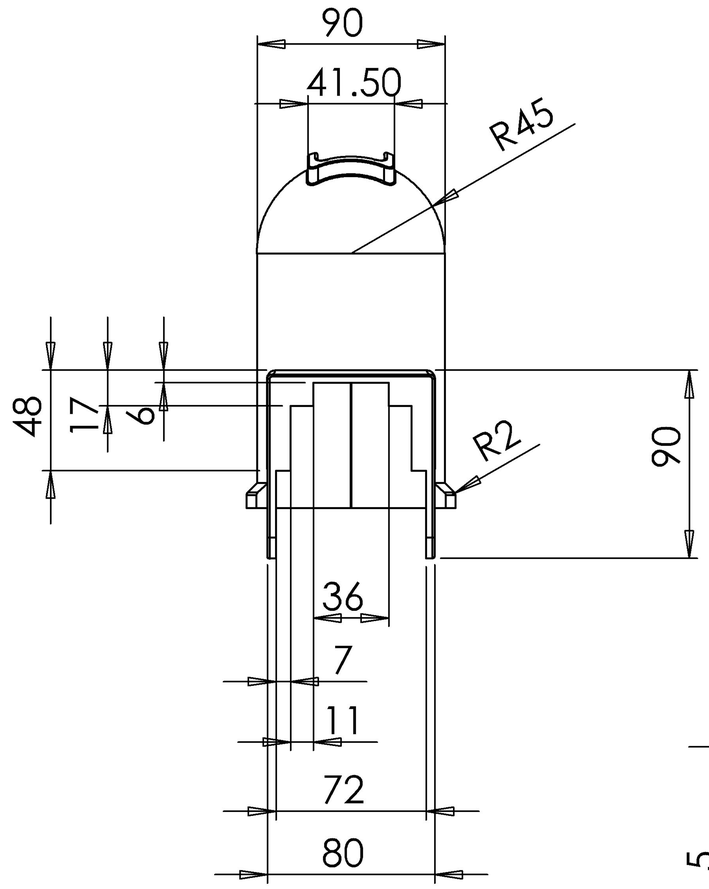


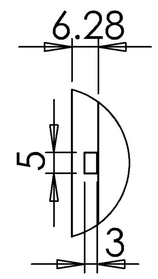
ด้านหน้า

หมายเหตุ SCALE: 1:5

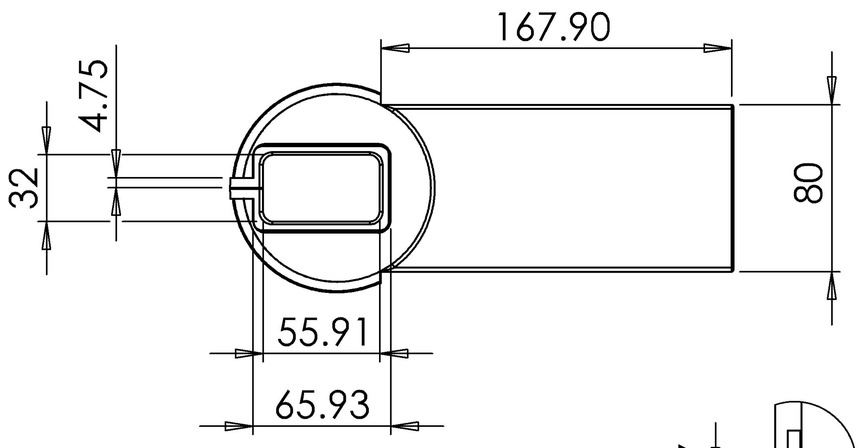
DATE		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
		คณะวิศวกรรมศาสตร์ ม.ราชมงคลธัญบุรี	
	SIGNATURE	TITLE: RDG5550078	
DRAWN			
CHK'D			
APPV'D			
MFG			
MATERIAL: NR+EPDM		DWG NO. DWG-A4-003	A4
WEIGHT:		SCALE: 1:2, 1:5	SHEET 1 OF 3

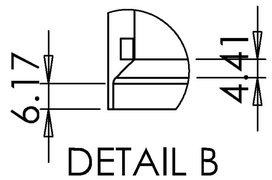






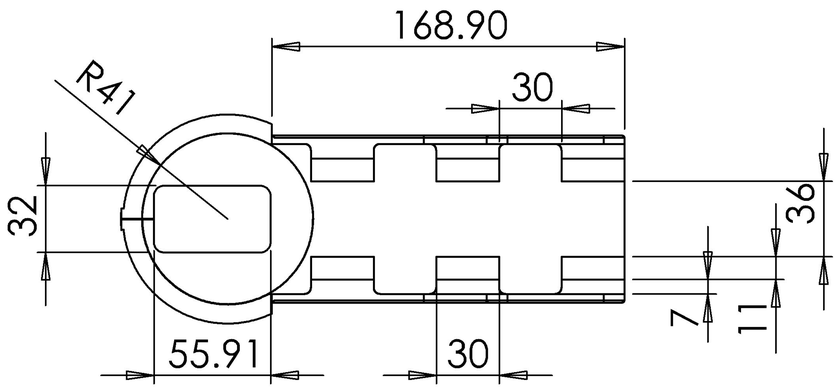
DETAIL A
SCALE 1 : 2

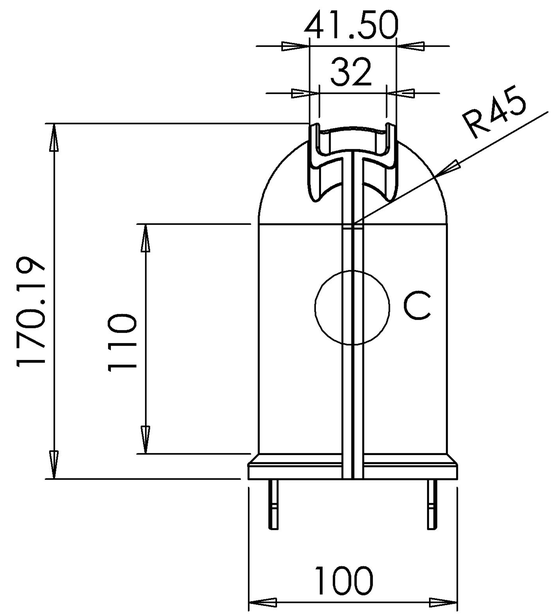


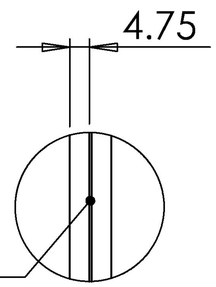


DETAIL B
SCALE 1 : 2

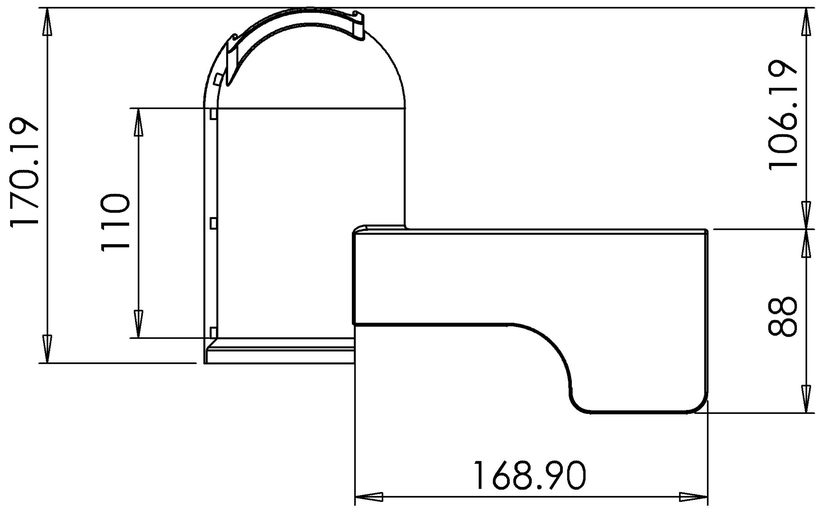
DATE		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
		คณะวิศวกรรมศาสตร์ ม.ราชมงคลธัญบุรี	
	SIGNATURE	TITLE: RDG5550078	
DRAWN			
CHK'D			
APPV'D			
MFG			
MATERIAL: NR+EPDM		DWG NO. DWG-A4-003	A4
WEIGHT:		SCALE: 1:4	SHEET 2 OF 3





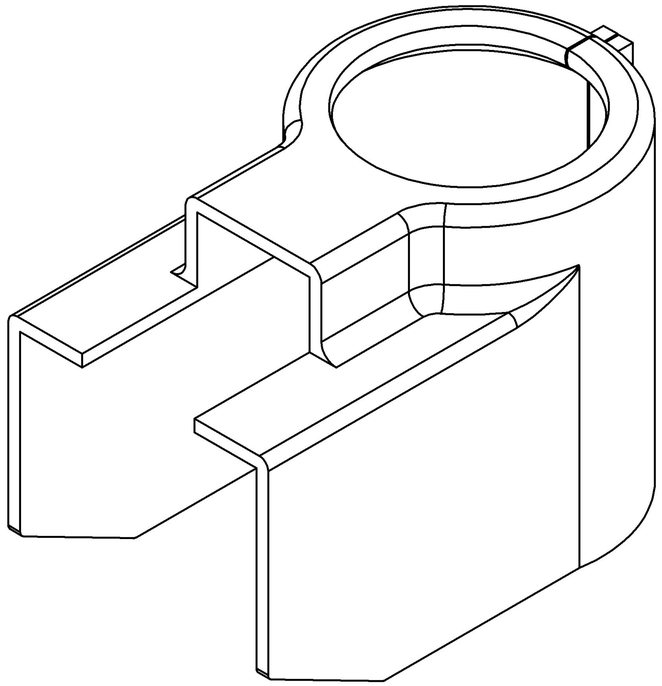


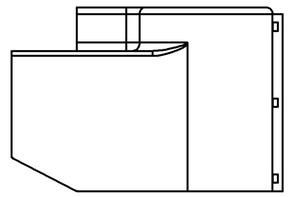
DETAIL C
SCALE 1 : 2



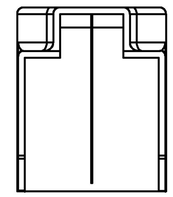
DATE		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
		คณะวิศวกรรมศาสตร์ ม.ราชมงคลธัญบุรี	
	SIGNATURE	TITLE: RDG5550078	
DRAWN			
CHK'D			
APPV'D			
MFG			
MATERIAL: NR+EPDM		DWG NO. DWG-A4-003	A4
WEIGHT:		SCALE: 1:4	SHEET 3 OF 3

แบบฉนวนหุ้มจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ด้านล่าง

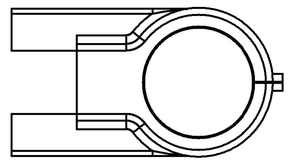




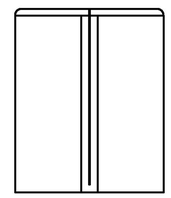
ด้านข้าง



ด้านหน้า



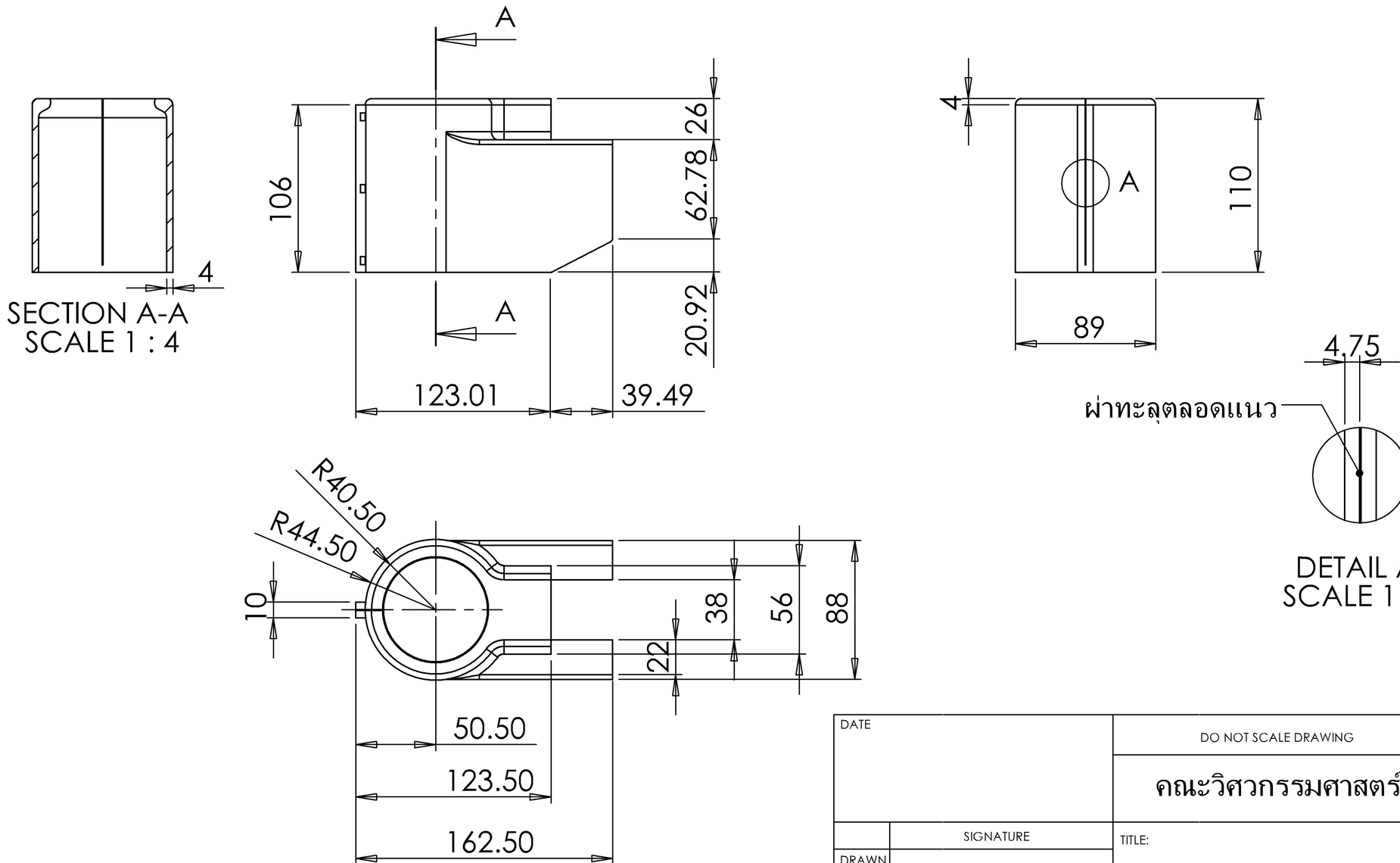
ด้านบน



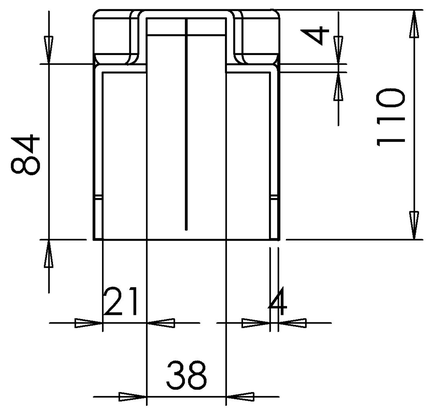
ด้านหลัง

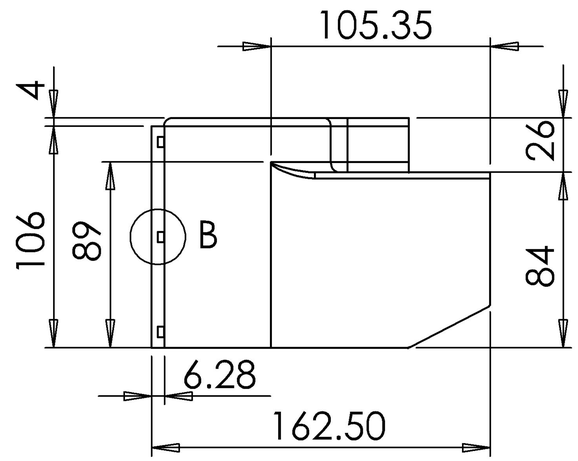
หมายเหตุ SCALE: 1:5

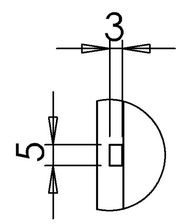
DATE		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
		คณะวิศวกรรมศาสตร์ ม.ราชมงคลธัญบุรี	
	SIGNATURE	TITLE: RDG5550078	
DRAWN			
CHK'D			
APPV'D			
MFG			
MATERIAL: NR+EPDM		DWG NO. DWG-A4-004	A4
WEIGHT:		SCALE: 1:2, 1:5	SHEET 1 OF 3



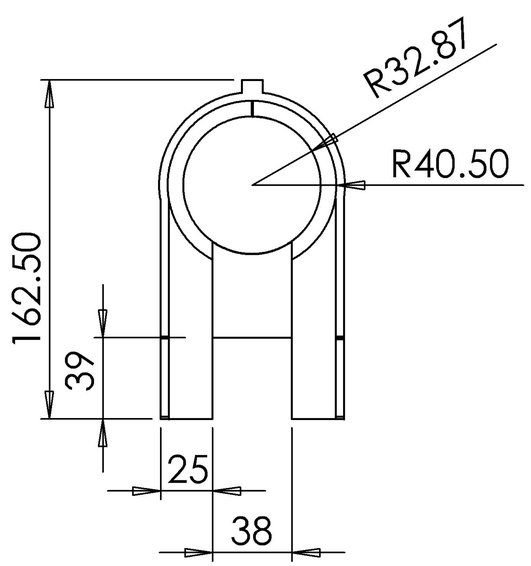
DATE		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
		คณะวิศวกรรมศาสตร์ ม.ราชมงคลธัญบุรี	
	SIGNATURE	TITLE: RDG5550078	
DRAWN			
CHK'D			
APPV'D			
MFG			
MATERIAL: NR+EPDM		DWG NO. DWG-A4-004	A4
WEIGHT:		SCALE: 1:4	SHEET 2 OF 3







DETAIL B
SCALE 1 : 2



DATE		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
		คณะวิศวกรรมศาสตร์ ม.ราชมงคลธัญบุรี	
	SIGNATURE	TITLE: RDG5550078	
DRAWN			
CHK'D			
APPV'D			
MFG			
MATERIAL: NR+EPDM		DWG NO. DWG-A4-004	A4
WEIGHT:		SCALE: 1:4	SHEET 3 OF 3

สำเนา

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY
มท.๕๓๐๕.๕๕/ธญ. ๘๑๙

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคอำเภอธัญบุรี
เลขที่ ๔๑/๕ หมู่ ๒ ถนนรังสิต-นครนายก
ตำบลบึงยี่โถ อำเภอธัญบุรี
จังหวัดปทุมธานี ๑๒๑๓๐

๑๖ มกราคม ๒๕๕๗

เรื่อง การใช้ประโยชน์จากผลงานวิจัย
เรียน คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ตามที่ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคอำเภอธัญบุรี ได้นำผลงานวิจัยเรื่อง **"ฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์จากยางพารา"** ดำเนินการโดย อาจารย์นิติพงศ์ ปานกลาง อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีไปใช้ประโยชน์ ก่อให้เกิดผลดีแก่หน่วยงาน ดังนี้

- [x] การนำไปใช้ประโยชน์เชิงสาธารณะ
- [ ] การนำไปใช้ประโยชน์เชิงนโยบาย
- [ ] การนำไปใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์
- [ ] การนำไปใช้ประโยชน์ทางอ้อมของการวิจัย

นำไปใช้ประโยชน์โดย

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคอำเภอธัญบุรีได้นำฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ที่พัฒนาขึ้นภายใต้โครงการวิจัยไปทดสอบติดตั้งใช้งานจริงในระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้าแรงสูง

วัน/เดือน/ปี ที่นำไปใช้ประโยชน์

ตุลาคม ๒๕๕๖ – ธันวาคม ๒๕๕๖

ผลที่คาดว่าจะได้รับ

การติดตั้งฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์กับฟิวส์คัทเอาท์ในระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้าแรงสูง ช่วยป้องกันการลัดวงจรบริเวณจุดต่อสายไฟฟ้า ช่วยเพิ่มเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้ายิ่งขึ้น

(นายภควัชร สุคันธนาค)
ผู้ช่วยผู้จัดการการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคอำเภอธัญบุรี
ปฏิบัติงานแทนผู้จัดการการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคอำเภอธัญบุรี

สำนักงานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคอำเภอธัญบุรี
โทร ๐๒ ๙๙๐ ๙๑๔๖-๘ โทรสาร ๐๒ ๕๓๓ ๑๐๔๔

เอกสารชี้แจงข้อคิดเห็นจากผู้ทรงคุณวุฒิ

ความเห็นผู้ทรงคุณวุฒิ ท่านที่ 1

1. ควรมีการรายงานการใช้งานจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค อ.ธัญบุรี ด้วย
2. เนื่องจากความเป็นฉนวนนั้นขึ้นอยู่กับสูตรยาง แต่งานวิจัยนี้ใช้สูตรยางเดียวมาผลิตฉนวนและทดสอบเลย ทำให้การทดลองภาคสนามพบจุดด้อยที่ต้องเอามาปรับปรุงสูตรยางอีก
3. ควรมีข้อมูลเรื่องราคาด้วย เพื่อเป็นจุดตั้งต้นในการขยายผลต่อไป โดยอาจเริ่มจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและบริษัทเอกชนที่เป็น supplier ฉนวนให้กับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

คำชี้แจง

1. ผู้วิจัยได้แนบสำเนาหนังสือรับรองการใช้ประโยชน์จากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค อ.ธัญบุรี ไว้ในภาคผนวกของรายการวิจัยฉบับสมบูรณ์
2. วัสดุฉนวนที่ใช้พัฒนาฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ในโครงการวิจัยนี้ ได้ผ่านการทดสอบคุณสมบัติทางกลและทางไฟฟ้าตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค(ตามเอกสารอ้างอิงหมายเลข 3) ด้วยเหตุนี้ ไม่ว่าจะใช้วัสดุฉนวนหรือสูตรยางอื่นๆ หากวัสดุฉนวนดังกล่าว ผ่านการทดสอบคุณสมบัติทางกลและทางไฟฟ้า ก็สามารถใช้ทำเป็นฉนวนไฟฟ้าสำหรับป้องกันส่วนที่มีไฟบนอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้าได้ อีกประการหนึ่ง โครงการวิจัยนี้ มิได้มีจุดประสงค์และขอบเขตในการวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับสูตรยางแต่ประการใด ดังนั้น ในการวิจัยจึงใช้สูตรยางเพียงสูตรเดียว แต่ได้มีการเพิ่มสารเคมีต่างๆ เพื่อให้วัสดุฉนวนมีคุณสมบัติตามต้องการ โดยอาศัยข้อมูลสูตรยางที่เคยวิจัยมาในอดีตของผู้วิจัย
3. โครงการวิจัยนี้ มิได้จัดทำรายละเอียดทางการเงินเกี่ยวกับการวิเคราะห์ต้นทุนในการพัฒนาฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ เนื่องจากไม่อยู่ในขอบเขตการศึกษาวิจัย กอปรกับข้อจำกัดของงบประมาณที่ได้รับของโครงการวิจัยเพียง 157,000 บาท การดำเนินงานบางประการจำเป็นต้องขอความอนุเคราะห์ไปยังหน่วยงานอื่นให้ดำเนินการให้ เช่น การจัดทำแม่พิมพ์โลหะที่ต้องใช้งบประมาณหลักแสนบาท การใช้ยางและสารเคมีบางชนิด ฯลฯ ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้การดำเนินงานพัฒนาฉนวนจุดต่อฟิวส์คัทเอาท์ใช้งบประมาณที่มิได้สะท้อนต้นทุนการพัฒนาที่แท้จริง

ความเห็นผู้ทรงคุณวุฒิ ท่านที่ 2

1. ควรเพิ่มเติมเหตุผลประกอบ ว่าเพราะเหตุใดจึงเลือกสูตรยาง NR: EPDM ที่ 60: 40 โดยอ้างอิงถึงงานที่เคยศึกษามา

คำชี้แจง

2. ผู้วิจัยได้เพิ่มรายละเอียดและเอกสารอ้างอิงลงในรายการวิจัยฉบับสมบูรณ์

ความเห็นผู้ทรงคุณวุฒิ ท่านที่ 3

1. ควรผนวกข้อมูลผลการทดสอบในตารางที่ 6 และคุณสมบัติของวัสดุฉนวนตามข้อกำหนด ในตารางที่ 3 เข้าไว้ด้วยกัน เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นชัดเจนว่าวัสดุฉนวนที่ได้ผ่านข้อกำหนดด้านไหน มากน้อยเพียงใด

2. ควรสรุป Condition ในการขึ้นรูปยางตามสูตรที่ระบุในรูปแบบตาราง และหากสามารถอภิปรายเพิ่มเติมได้ว่า processing condition มีผล/มีความสำคัญต่อยางที่ขึ้นรูปได้ หรือมีข้อควรระวัง/พิจารณาส่วนใดบ้าง ก็จะเป็นประโยชน์มาก
3. จากผลที่ได้ในตารางที่ 7 และ 8 ความเครียดสนามไฟฟ้าในแต่ละจุดของฉนวนจะแตกต่างกัน และขึ้นกับความหนา ควรนำผลที่ได้นี้ประกอบการออกแบบพัฒนาฉนวนในอนาคต โดยคำนึงถึงความเป็นไปได้และความเหมาะสมในการ optimize thinkness และอาจเป็น different thickness ในแต่ละจุดของฉนวน เพื่อให้ได้ค่าความเครียดที่เหมาะสม แต่ทั้งนี้ ต้องคำนึงถึงในทางปฏิบัติว่าจะต้องขึ้นรูปชิ้นงานได้ไม่ยาก(ease of manufacture for non-uniform thickness)

คำชี้แจง

1. ผู้วิจัยได้เพิ่มเติมรายละเอียดในรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ ดังแสดงในตารางที่ 6
2. การผสมสูตรยางมิได้มีรายละเอียดและข้อควรระวังใดๆ เป็นพิเศษ ยกเว้นขั้นตอนการผสมสารป้องกันการลามไฟ โดยผู้วิจัยได้เพิ่มข้อควรระวังในการผสมสารป้องกันการลามไฟ และตารางคุณสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์ไว้ในรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์
3. ผู้วิจัยจะนำประเด็นดังกล่าวไปใช้ประกอบการออกแบบและพัฒนาฉนวนสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ ต่อไปในอนาคต