

การออกแบบและทดสอบฟิวส์สวิตช์แรงต่ำโดยใช้ฐานฉนวนเรซิน

**DESIGN AND TESTING OF LOW TENSION FUSE SWITCH  
BASED RESIN INSULATOR**



วิทยา โสสีทา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

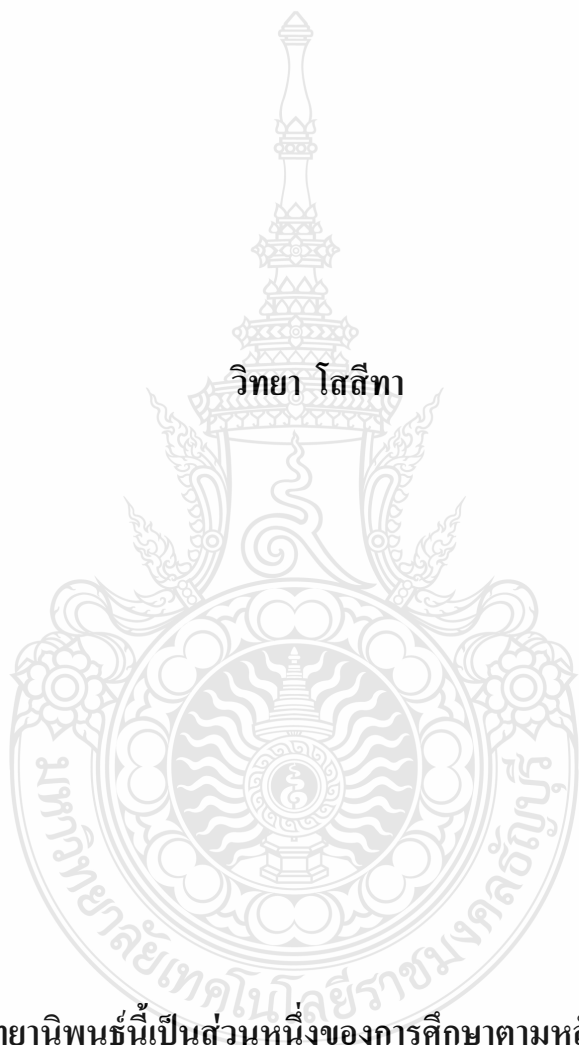
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

# การออกแบบและทดสอบฟิวส์สวิตช์แรงต่ำโดยใช้ฐานฉนวนเรซิน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์                    การออกแบบและทดสอบฟิวส์สวิตช์แรงต่ำโดยใช้ฐานฉนวนเรซิน  
Design and Testing of Low Tension Fuse Switch Based Resin Insulator  
ชื่อ - นามสกุล                        นายวิทยา โสสีทา  
สาขาวิชา                                วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ที่ปรึกษา                        ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ทรัพย์สิงห์, Ph.D.  
ปีการศึกษา                                2556

---

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์, Ph.D.)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์แคทรียา สุวรรณศรี, D.Eng.)

..... กรรมการ  
(อาจารย์ณัฐภัทร พันธุ์คง, Ph.D.)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ทรัพย์สิงห์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมหมาย ผิวสอาด, Ph.D.)

วันที่ 6 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2556

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและทดสอบฟิวส์สวิตช์แรงต่ำโดยใช้ฐานฉนวนเรซิน
ชื่อ – นามสกุล	นายวิทยา โสสีทา
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ทรัพย์สิงห์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2556

## บทคัดย่อ

ปัจจุบันฉนวนรองรับฐานของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำจะทำจากฉนวนเซรามิก ฉนวนดังกล่าวมีน้ำหนักมากและสามารถเกิดการชำรุดเสียหายขึ้นได้ ไม่ว่าจะจากการใช้งานรวมไปถึงการติดตั้งด้วย อีกทั้งยังมีหลายขั้นตอนการผลิตและซับซ้อนยุ่งยาก เช่น การเตรียมดิน ขึ้นรูป อบ เคลือบ และการเผา ที่อุณหภูมิประมาณ 950 – 1280 °C เมื่อเปรียบเทียบกับเรซินที่พัฒนาขึ้นจะช่วยให้ฟิวส์สวิตช์แรงต่ำทนทานต่อแรงกระแทก ไม่แตกหักง่ายและข้อสำคัญคือ มีกระบวนการผลิตที่ง่ายและราคาไม่แพง

วิทยานิพนธ์นี้ นำเสนอการออกแบบและทดสอบฟิวส์สวิตช์แรงต่ำโดยใช้ฐานฉนวนเรซิน โดยแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นแรกคือออกแบบโดยใช้โปรแกรม AutoCAD เพื่อสร้างต้นแบบฟิวส์สวิตช์แรงต่ำในการจำลองผลในโปรแกรมไฟไนเอลิเมนต์ เพื่อทำการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าและการกระจายตัวศักย์ไฟฟ้าภายในเนื้อฉนวนเรซิน จากนั้นนำแบบจากโปรแกรม AutoCAD มาสร้างต้นแบบเพื่อทำการทดสอบคุณสมบัติทางกลตามมาตรฐาน ASTM D2240, ASTM D412 และ ASTM D149 และคุณสมบัติทางไฟฟ้ามาตรฐาน IEC60047-3

จากผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวนเรซินด้วยโปรแกรมไฟไนเอลิเมนต์ พบว่าจุดที่เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ จุดที่มีการเชื่อมต่อกับสายป้อน ซึ่งมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 67.6 V/mm ดังนั้นเมื่อเทียบกับสนามไฟฟ้าสูงสุดแล้ว จึงไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อฉนวนเรซิน และจากการทดสอบทางกลพบว่าวัสดุฉนวนมีความแข็ง  $82 \pm 1$  Shore D ความทนต่อแรงดึง  $37.89 \pm 4.5$  Mpa มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าประมาณ 19.25 kV/mm นอกจากนี้ฟิวส์สวิตช์แรงต่ำยังผ่านการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า รวมถึงการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มที่กระแสฟัด 400 A ในห้องปฏิบัติการตามมาตรฐาน IEC 60947-3 ทั้งนี้ฉนวนเรซินยังสามารถทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50  $\mu$ s สูงสุด 42.22 kV ซึ่งไม่ทำให้เกิดการรวบไฟหรือเจาะทะลุขึ้นงาน

คำสำคัญ: ฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ ฉนวนเรซิน สนามไฟฟ้า



<b>Thesis Title</b>	Design and Testing of Low Tension Fuse Switch Based Resin Insulator
<b>Name - Surname</b>	Mr. Wittaya Soseeta
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Assistant Professor Wanchai Subsingha, Ph.D.
<b>Academic Year</b>	2013

## ABSTRACT

Nowadays, the insulator of low tension fuse switch makes from ceramic porcelain. The property of this insulator is good but it has more weight and easy to damage even from application and installation. In addition, the ceramic porcelain has a complicated manufacturing and consumes more energy in production process. It should be burnt with temperature at 950 – 1280 °C. Therefore, the alternative insulator material should be developed for low tension fuse switch, which has easier manufacturing processes, save energy and low prices.

This thesis presents designing and testing of resin insulator for low tension fuse switch, which is divided into 2 steps. The first step is to design using AutoCAD in order to create the low tension fuse switch model and to simulate electric field stress and electrical potential distribution inside the resin insulator by using finite element program. Secondly, is to prepare the low tension fuse switch model for mechanical properties testing according to ASTM D2240, ASTM D412 and ASTM D149 standard and electrical properties testing according to IEC 60947-3 standard.

From electric field stress simulation results of resin insulator for low tension fuse switch found that the maximum value of electric field stress occurred at the line terminal, which is 67.6 V/mm. This value is not high enough to destroy resin insulator. Then, the resin insulator has been tested for mechanical properties. In which, its hardness is  $82 \pm 1.0$  Shore D, a tensile strength is  $37.89 \pm 4.5$  Mpa, and its withstand maximum power frequency voltage is up to 19.25 kV/mm. In addition, it can withstand lightning impulse voltage (1.2/50  $\mu$ s) up to 42.22 kV maximum without any flashover or puncher. Nevertheless, it also passes the temperature rise testing at 400 A rated current in laboratory according to IEC 60947-3 standard.

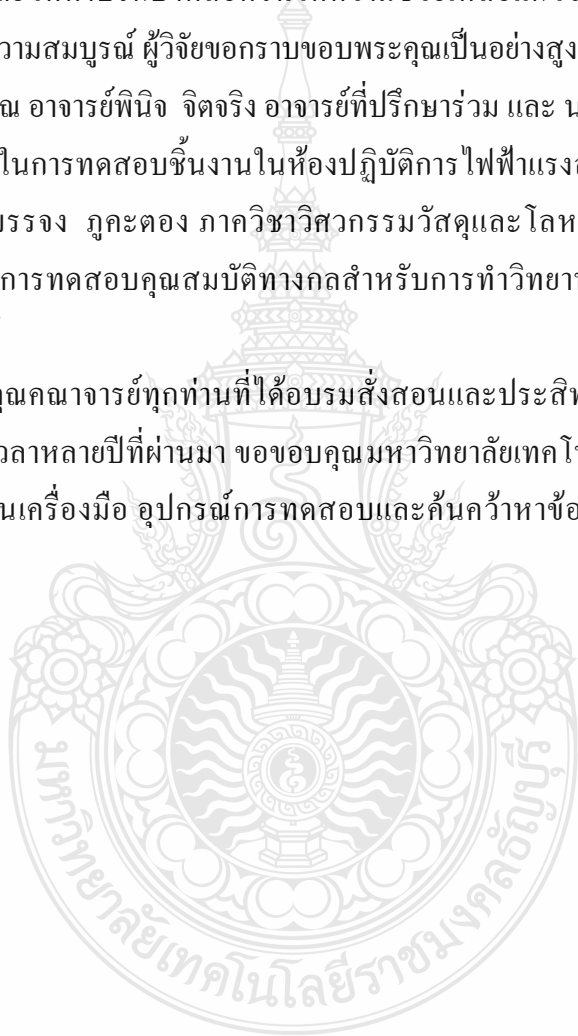
**Keywords:** low tension fuse switch, resin insulator, electric field

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือเป็นอย่างดีของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักติพิชญ์ ดร.ณัฐภัทร พันธุ์คง กรรมการสอบ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แคทรียา สุวรรณศรี ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์พินิจ จิตจริง อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม และ นายอภิชาติ ทองมา ที่กรุณาให้คำแนะนำและช่วยในการทดสอบชิ้นงานในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และขอขอบคุณนายบรรจง ภูตะตอง ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ ที่ช่วยในการทดสอบชิ้นงานในห้องปฏิบัติการทดสอบคุณสมบัติทางกลสำหรับการทำวิทยานิพนธ์ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและประสิทธิ์ประสาทความรู้วิชาการต่างๆ ให้ตลอดระยะเวลาหลายปีที่ผ่านมา ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่ให้การสนับสนุนทางด้านเครื่องมือ อุปกรณ์การทดสอบและค้นคว้าหาข้อมูลตลอดจนช่วงเวลาของการศึกษา



วิทยา โสสีทา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(10)
บทที่ 1 บทนำ.....	13
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	13
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	14
1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย.....	14
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	14
1.5 ขั้นตอนในการทำงาน.....	15
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย.....	15
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.2 มาตรฐานที่เกี่ยวข้อง.....	17
2.3 คุณสมบัติของวัสดุฉนวนไฟฟ้า.....	18
2.4 ประเภทของพลาสติก.....	19
2.5 คุณสมบัติของเรซิน.....	21
2.6 การนำเรซินไปใช้งาน.....	22
2.7 ฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ.....	22
2.8 ศึกษาการออกแบบโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์อุปกรณ์เชิงตัวเลข.....	23
2.9 การออกแบบแม่พิมพ์สำหรับฉนวนฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ.....	25
2.10 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุฉนวนเรซิน.....	29
2.11 การทดสอบเฉพาะแบบฟิวส์สวิตช์แรงต่ำตามมาตรฐาน IEC.....	38
2.12 สรุปผลทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	46

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	47
3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย .....	47
3.2 การออกแบบแม่พิมพ์สำหรับฉนวนพิวส์สวิตช์แรงต่ำ .....	48
3.3 การจำลองสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมวิเคราะห์อุปกรณ์เชิงตัวเลข .....	50
3.4 ขั้นตอนการสร้างวัสดุฉนวนเรซิน .....	52
3.5 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุฉนวนเรซิน .....	57
3.6 การทดสอบเฉพาะแบบพิวส์สวิตช์แรงต่ำตามมาตรฐาน IEC .....	66
3.7 สรุปวิธีดำเนินงานวิจัย .....	70
บทที่ 4 การทดสอบและวิเคราะห์ .....	71
4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุฉนวนเรซิน .....	71
4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุฉนวนเรซิน .....	74
4.3 ผลการทดสอบเฉพาะแบบพิวส์สวิตช์แรงต่ำตามมาตรฐาน IEC 60947-3 .....	81
4.4 สรุป .....	90
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ .....	92
5.1 สรุปผล .....	92
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	92
5.2 ปัญหาในการทดสอบและข้อยกเว้น .....	93
รายการอ้างอิง.....	94
ภาคผนวก.....	96
ภาคผนวก ก รายงานผลการทดสอบ .....	97
ภาคผนวก ข ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ .....	106
ประวัติผู้เขียน .....	133

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ความแตกต่างระหว่างเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซตติง .....	21
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของเรซิน .....	21
ตารางที่ 2.3 วิธีทดสอบความแข็งที่ควรเลือกสำหรับพลาสติกต่างๆ .....	32
ตารางที่ 2.4 ชนิดของลูกบอลเหล็กและแรงที่ใช้กดในการทดสอบค่าความแข็งแบบต่างๆ .....	33
ตารางที่ 2.5 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฉนวนแต่ละชนิด .....	35
ตารางที่ 2.6 ลำดับการทดสอบเฉพาะแบบพิวส์สวิทช์แรงต่ำ .....	38
ตารางที่ 2.7 ชีดจำกัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของขั้วต่อสาย.....	40
ตารางที่ 2.8 ชีดจำกัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของขั้วต่อสายและชิ้นส่วนที่สามารถเข้าถึงได้.....	41
ตารางที่ 2.9 สภาวะระหว่างการทดสอบสมบัติทางไดอิเล็กตริก .....	41
ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมตัวเร่งต่อน้ำหนักเรซิน .....	53
ตารางที่ 3.2 สภาวะระหว่างการทดสอบสมบัติทางไดอิเล็กตริก .....	69
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ในการอบขึ้นงานทดสอบ .....	71
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบแรงดึงและทดสอบความแข็งก่อนและหลังการอบ .....	73
ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ในการอบขึ้นงานทดสอบ .....	73
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบผลกระทบต่อน้ำมันหม้อแปลงและน้ำเกลือ .....	74
ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบขึ้นงาน .....	75
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบวัดค่าคงที่การฉนวนและค่าสูญเสียของการฉนวน .....	75
ตารางที่ 4.7 ค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบขึ้นงาน .....	76
ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric Strength) .....	77
ตารางที่ 4.9 ค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบขึ้นงาน .....	77
ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์เบรกคาวน์.....	79
ตารางที่ 4.11ค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบขึ้นงาน .....	79
ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบหาค่าแรงดันอิมพัลส์ 50 % ด้วยวิธีปรับขึ้นลง (ขั้วลบ).....	80
ตารางที่ 4.13 ค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบขึ้นงาน .....	82
ตารางที่ 4.14 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเทียบกับระยะเวลาที่ทดสอบ.....	82
ตารางที่ 4.15 ผลการทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของแต่ละจุด .....	83
ตารางที่ 4.16 ค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบขึ้นงาน .....	85

## สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.17 ผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน 1.2/50 $\mu$ s (ที่จุด A, B).....	85
ตารางที่ 4.18 ผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน 1.2/50 $\mu$ s (ที่จุด A, C).....	86
ตารางที่ 4.19 ผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน 1.2/50 $\mu$ s (ที่จุด B, C).....	86
ตารางที่ 4.20 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเทียบกับระยะเวลาที่ทวนสอบ .....	88
ตารางที่ 4.21 ผลการทวนสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของแต่ละจุด.....	90



## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลแบบลูกโซ่ (Chains Molecule) .....	20
รูปที่ 2.2	ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลแบบตาข่าย (Net Molecule).....	20
รูปที่ 2.3	โครงสร้างของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ.....	23
รูปที่ 2.4	การกระจายศักย์ไฟฟ้าในสนามไฟฟ้าสถิต .....	25
รูปที่ 2.5	แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปเรซินแบบทรงกลม.....	26
รูปที่ 2.6	แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปเรซินแบบทรงสี่เหลี่ยม .....	27
รูปที่ 2.7	แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปเรซิน แบบทรงสี่เหลี่ยมเพื่อทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า .....	28
รูปที่ 2.8	แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปฉนวนเรซินฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ .....	28
รูปที่ 2.9	ตัวอย่างเครื่องทดสอบแรงดึง.....	30
รูปที่ 2.10	ตัวอย่างขนาดและรูปทรงชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึง .....	31
รูปที่ 2.11	ขั้นตอนในการทดสอบความแข็งแบบ Rockwell.....	32
รูปที่ 2.12	เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Rockwell.....	33
รูปที่ 2.13	แสดงลักษณะของ Durometer แบบ Shore A และ Shore D.....	34
รูปที่ 2.14	Impedance Gain-Phase Analyzer HP 4294A .....	36
รูปที่ 2.15	จุดที่ทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น .....	40
รูปที่ 2.16	วงจรทดสอบวิสัยสามารถต่อและการตัดวงจรและการทดสอบสมรรถนะการทำงาน..	45
รูปที่ 2.17	วงจรทดสอบการทนต่อภาวะกระแสลัดวงจร .....	45
รูปที่ 3.1	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย .....	47
รูปที่ 3.2	แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปเรซินแบบทรงกลมเพื่อทดสอบแรงดึงของวัสดุ.....	48
รูปที่ 3.3	แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปเรซินแบบทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสเพื่อทดสอบความแข็งของวัสดุ .....	48
รูปที่ 3.4	แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปเรซิน รูปทรงสี่เหลี่ยมเพื่อทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า .....	49
รูปที่ 3.5	ฐานของแม่พิมพ์สำหรับฉนวนฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ .....	50
รูปที่ 3.6	การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในเนื้อฉนวนเรซิน .....	51
รูปที่ 3.7	การจำลองการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าภายในเนื้อฉนวนเรซิน.....	52
รูปที่ 3.8	การจำลองการเดินทางของศักย์ไฟฟ้าภายในเนื้อฉนวนเรซิน .....	52
รูปที่ 3.9	ขั้นตอนการเตรียมเรซิน .....	53
รูปที่ 3.10	ขั้นตอนผสมตัวทำแข็ง.....	54

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการคนเรซินให้เข้ากัน .....	55
รูปที่ 3.12 ขั้นตอนการเทเรซินในแม่พิมพ์ .....	55
รูปที่ 3.13 วัสดุทดสอบแบบครัมเบล สำหรับทดสอบแรงดึง .....	56
รูปที่ 3.14 วัสดุทดสอบรูปทรงสี่เหลี่ยมสำหรับทดสอบความแข็ง ความหนา 5 mm.....	56
รูปที่ 3.15 วัสดุทดสอบค่าคงที่การฉนวน ค่าสูญเสียของวัสดุฉนวน และการทดสอบค่าความคงทน ต่อแรงดันไฟฟ้า ความหนา 2 mm .....	56
รูปที่ 3.16 วัสดุทดสอบทางไฟฟ้าของฉนวนเรซิน .....	57
รูปที่ 3.17 ตู้อบอากาศร้อน .....	58
รูปที่ 3.18 วงจรสมมูลของตู้อบอากาศร้อน .....	58
รูปที่ 3.19 วัสดุทดสอบในภาชนะในตู้อบอากาศร้อน .....	59
รูปที่ 3.20 เครื่องมือทดสอบแรงดึงสำหรับชิ้นงาน .....	59
รูปที่ 3.21 เครื่องมือทดสอบความแข็งสำหรับชิ้นงาน .....	60
รูปที่ 3.22 ตัวอย่างการแช่น้ำมันหม้อแปลงและน้ำเกลือ .....	61
รูปที่ 3.23 Impedance Gain-Phase Analyzer HP 4294 A .....	62
รูปที่ 3.24 วงจรสมมูลของการวัดค่าคงที่การฉนวนและค่าสูญเสียของการฉนวน .....	62
รูปที่ 3.25 วงจรทดสอบฉนวนเรซินความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า .....	64
รูปที่ 3.26 การจัดวางอุปกรณ์ทดสอบฉนวนเรซินต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า .....	64
รูปที่ 3.27 วงจรสมมูลของการสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน .....	65
รูปที่ 3.28 การจัดวางอุปกรณ์ทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ .....	65
รูปที่ 3.29 ตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์และทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น 8 จุด.....	67
รูปที่ 3.30 การติดตั้งและทดสอบวัดค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น .....	67
รูปที่ 3.31 การติดตั้งและทดสอบวัดค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น .....	67
รูปที่ 3.32 การประกอบวงจรทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50 $\mu$ s.....	68
รูปที่ 3.33 การจัดวางอุปกรณ์ทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกินกระแสลับของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ ฉนวนเรซิน .....	69



## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.1 เครื่องมือทดสอบแรงดึงสำหรับชิ้นงาน .....	72
รูปที่ 4.2 เครื่องมือทดสอบความแข็งสำหรับชิ้นงาน .....	72
รูปที่ 4.3 การจัดวางอุปกรณ์ทดสอบวัดค่าคงที่ของจนวนและค่าสูญเสียของการจนวน .....	76
รูปที่ 4.4 การจัดวางอุปกรณ์การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ .....	78
รูปที่ 4.5 รูปคลื่นปกติไม่เกิดการวาวไฟตามผิวและรูปคลื่นตัดเมื่อเกิดการวาวไฟต่อแรงดัน อิมพัลส์ .....	78
รูปที่ 4.6 ผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทั้ง 8 จุด จากรูปที่ 3.29 ประกอบ .....	83
รูปที่ 4.7 การติดตั้งเซนเซอร์สำหรับการทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น .....	84
รูปที่ 4.8 วงจรทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50 $\mu$ s .....	85
รูปที่ 4.9 รูปคลื่นการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50 $\mu$ s .....	86
รูปที่ 4.10 การจัดวางอุปกรณ์การทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกินกระแสสลับของฟิวส์สวิตช์ แรงต่ำจนวนเรซิน .....	87
รูปที่ 4.11 การทดสอบความทนต่อแรงดันเกินของจนวนที่ระดับแรงดัน 2.2 kVrms .....	87
รูปที่ 4.12 ผลการทวนสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทั้ง 8 จุด จากรูปที่ 3.29 ประกอบ .....	89

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและการไฟฟ้านครหลวง มีการใช้ฟิวส์สวิตช์แรงต่ำที่มีฐานฉนวนทำมาจากวัสดุเซรามิกมากกว่า 95% เนื่องจากฉนวนเซรามิกนั้นมีคุณสมบัติที่เหมาะสม ไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติทางกล ทางไฟฟ้า ทางความร้อนและทนต่อสภาพแวดล้อม มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน แต่เนื่องจากกระบวนการและขั้นตอนในการผลิตที่ยุ่งยาก ลื่นเปลืองพลังงาน เช่น กระบวนการเตรียมเนื้อดิน กระบวนการขึ้นรูปลูกถ้วยไฟฟ้า กระบวนการอบแห้งลูกถ้วยไฟฟ้า กระบวนการเคลือบและกระบวนการเผา ซึ่งการเผาจะใช้อุณหภูมิประมาณ 950 – 1280 °C จึงได้มีผู้คิดค้นวัสดุชนิดอื่นขึ้นมาทดแทน ได้แก่ ฉนวนยางผสม [1] ซึ่งงานวิจัยฉบับดังกล่าวนี้เป็นงานวิจัยเพื่อส่งเสริมมูลค่าทางธรรมชาติของไทยอีกด้วย

งานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาออกแบบฉนวนฟิวส์สวิตช์แรงต่ำด้วยวัสดุเรซิน เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำมาใช้ทดแทนวัสดุฉนวนเซรามิกอีกทางเลือกหนึ่ง โดยมีการวิเคราะห์ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ [2] จากนั้นจะทำการออกแบบชิ้นงานจริง เพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติทางกล ทางความร้อนและทางไฟฟ้า โดยที่ฉนวนเรซินที่ได้ทำการวิจัยนี้จะสามารถผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน [3] ซึ่งฉนวนเรซินที่พัฒนาขึ้นต้องมีคุณสมบัติสามารถทนทานต่อสภาพใช้งานเท่าเทียมหรือดีกว่าฉนวนเซรามิกแบบเดิมและข้อสำคัญคือ มีกระบวนการผลิตที่ง่ายและราคาไม่แพง

ด้วยเหตุนี้ งานวิทยานิพนธ์การศึกษาเบื้องต้นถึงการทดสอบฟิวส์สวิตช์แรงต่ำตามมาตรฐาน IEC จึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อทำการศึกษาแนวทางในการทดสอบฟิวส์สวิตช์แรงต่ำตามมาตรฐาน IEC กำหนด การศึกษายังครอบคลุมถึงการทดสอบคุณสมบัติทางความร้อน ทางเคมี ทางกล และทางไฟฟ้าของวัสดุฉนวน อาทิ เช่น การทนต่อความร้อน การทนต่อสารเคมี การทนต่อแรงดึงและการทดสอบค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant) ฯลฯ และสุดท้ายหากมีโอกาสจะนำฟิวส์สวิตช์แรงต่ำไปติดตั้งใช้งานจริงในระบบจำหน่ายแรงต่ำ 220/380V ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เพื่อเก็บข้อมูลการใช้งานด้วยอีกทางหนึ่ง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษามาตรฐาน IEC-60947-3 และมาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเกี่ยวกับการทดสอบฟิวส์สวิตช์แรงต่ำรวมถึงทำการทดสอบฟิวส์สวิตช์แรงต่ำตามมาตรฐาน

1.2.2 ออกแบบและสร้างต้นแบบตามมาตรฐานทางกล ประกอบด้วยความแข็งแรงดึงและทางไฟฟ้าของฉนวนเรซิน โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ห่ออุปกรณ์เชิงตัวเลข

1.2.3 เพื่อทดสอบคุณสมบัติทางกลและทางไฟฟ้าของวัสดุฉนวนฟิวส์สวิตช์แรงต่ำแบบ Resin

## 1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย

การศึกษาและออกแบบวัสดุที่จะนำมาทำฉนวนฟิวส์สวิตช์แรงต่ำโดยใช้เรซินที่เหมาะสม และสามารถทดแทนวัสดุเก่าที่ทำมาจาก เซรามิก เนื่องจากกระบวนการและขั้นตอนในการผลิตที่ยุ่งยาก เช่น กระบวนการเตรียมเนื้อดิน กระบวนการขึ้นรูปลูกถ้วยไฟฟ้า กระบวนการอบแห้งลูกถ้วยไฟฟ้า กระบวนการเคลือบและกระบวนการเผา ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ประมาณ 950 – 1280 °C ค่อนข้างที่จะสูงมากทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน ซึ่งเมื่อเทียบกับฉนวนเรซินสามารถทนทานต่อแรงกระแทกไม่แตกหักง่าย และน้ำหนักเบา ข้อสำคัญคือ มีกระบวนการผลิตที่ง่ายและราคาถูก

## 1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1.4.1 จัดทำสรุปแนวทางการทดสอบฟิวส์สวิตช์แรงต่ำมาตรฐาน IEC-60947-3 และมาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

1.4.2 ทำการออกแบบโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ห่ออุปกรณ์เชิงตัวเลขเพื่อวิเคราะห์ความเครียดสนามไฟฟ้าและการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าภายในเนื้อฉนวนเรซิน

1.4.3 ทำการทดสอบฟิวส์สวิตช์แรงต่ำตามมาตรฐานมาตรฐาน IEC 60947-3 และมาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคด้วยวิธีทดสอบภายในประเทศ

1.4.4 ทดสอบคุณสมบัติทางกลและทางไฟฟ้าของฉนวนฟิวส์สวิตช์แรงต่ำแบบเรซิน ด้านต่างๆ คือ คุณสมบัติทางกลจะทดสอบความแข็งแรงและแรงดึงโดยมีสภาวะก่อนและหลังบ่มแรงดังนี้

### 1. การทดสอบทางกล

1) ความทนทานต่อความร้อน (Heat Resistance); ISO 188 : 2007

2) ความทนทานต่อน้ำมันหม้อแปลงและน้ำเกลือ (Oil or Chemical Resistance);

ISO1817 : 2005

## 2. การทดสอบทางไฟฟ้า

1) การวัดค่าคงที่การฉนวน (Dielectric Constant) และค่าสูญเสียของการฉนวน (Dielectric Loss) ตามมาตรฐาน ASTM D150

2) ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำ (AC 50 Hz; Dielectric Strength) และความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์เบรคดาวน์ตามมาตรฐาน ASTM D149

3) การทดสอบฟิวส์สวิตช์แรงต่ำตามมาตรฐาน IEC60-947-3

### 1.5 ขั้นตอนในการทำงาน

1.5.1 ศึกษามาตรฐานการทดสอบฟิวส์สวิตช์แรงต่ำตามมาตรฐาน IEC 60947-3 และมาตรฐานที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคกำหนด

1.5.2 ศึกษามาตรฐานการทดสอบสมบัติทางกลและทางไฟฟ้าของวัสดุฉนวนฟิวส์สวิตช์แรงต่ำแบบเรซิน

1.5.3 ออกแบบและสร้างต้นแบบฉนวนฟิวส์สวิตช์แรงต่ำเพื่อทำการทดสอบตามมาตรฐานกำหนด

1.5.4 ทดสอบฉนวนฟิวส์สวิตช์แรงต่ำตามมาตรฐานที่สามารถดำเนินการได้ภายในประเทศ

1.5.5 รวบรวมผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

1.5.6 สรุปผลการวิจัย และจัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์

### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

1.6.1 ประโยชน์เชิงวิชาการคือ การศึกษาวิทยานิพนธ์ซึ่งเป็นพื้นฐานความสำคัญของการวิจัยและสามารถแสดงผลงานด้วยการตีพิมพ์บทความ

1.6.2 ประโยชน์ต่อการพัฒนาการหาวัสดุฉนวนอื่นมาทดแทนวัสดุฉนวนเซรามิก คืองานวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการออกแบบวัสดุฉนวนเรซินสำหรับฟิวส์สวิตช์แรงต่ำและเป็นแนวทางสำหรับพัฒนาต่อไป

1.6.3 ประโยชน์ต่อการนำไปใช้งานของวัสดุฉนวนเรซินคือ สามารถลดน้ำหนักและการแตกหักชำรุดเสียหายจากการติดตั้งรวมถึงการขนส่ง และยังผ่านการทดสอบคุณสมบัติทางกลและทางไฟฟ้าของวัสดุฉนวนตามมาตรฐานของ IEC และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงรายละเอียดของการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยเกี่ยวกับฉนวนพิวส์สวิตช์แรงต่ำ ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการศึกษาคุณสมบัติการฉนวนที่ใช้ในงานวิจัยวิธีการออกแบบขั้นตอนการผลิต ตลอดจนวิธีการทดสอบและมาตรฐานการทดสอบแบบต่างๆ โดยมีรายละเอียดของเนื้อหาดังต่อไปนี้

นิติงศ์ ปานกลาง และคณะ [1] ได้นำเสนอเกี่ยวกับการออกแบบฉนวนพิวส์สวิตช์แรงต่ำที่ทำจากวัสดุยางธรรมชาติและยางอีพิตีเอ็ม โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่างยางธรรมชาติ 60% กับยางอีพิตีเอ็ม 40% วัสดุฉนวนผ่านการทดสอบคุณสมบัติตามมาตรฐาน ASTM D2240 ASTM D412 และ ASTM D149 จากการทดสอบพบว่าวัสดุฉนวนมีค่าความแข็งเท่ากับ  $46.7 \pm 3$  Shore D และสามารถรับแรงดึงได้สูงสุดเท่ากับ  $10.09 \pm 0.58$  MPa ตามลำดับ และมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าประมาณ 17.9 kV/mm นอกจากนี้ พิวส์สวิตช์แรงต่ำยังผ่านการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า 1.2/50  $\mu$ s ที่ระดับแรงดัน 14.8 kV และการทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกินของฉนวนแข็งที่ระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 2.2 kV<sub>RMS</sub> ความถี่ 50 Hz รวมถึงการทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

อำนาจ สุขศรี [4] ได้นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาและการวิเคราะห์ความเป็นฉนวนของแผ่นตัวอย่างทดสอบ ซึ่งเป็นส่วนผสมของสารตัวเติม (Fillers) กับ Epoxy Resin ตามอัตราส่วนผสมและชนิดของสารตัวเติมที่เติมลงไป โดยออกแบบและสร้างอุปกรณ์เพื่อใช้ในการทดสอบการเสื่อมสภาพของฉนวนของแข็ง พร้อมทั้งได้จัดเตรียมแผ่นตัวอย่างทดสอบชนิดต่างๆ ซึ่งการทดสอบนี้ได้อ้างอิงตามมาตรฐานของ British Standard: BS5604:1986 IEC 587:1984 สำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า และมาตรฐานของ ASTM D638 เพื่อทดสอบคุณสมบัติทางกล จากการทดสอบพบว่าแผ่นตัวอย่างเรซินเพียงอย่างเดียวสามารถทนแรงดันทดสอบได้ต่ำเพียง 3.5 kV แต่เมื่อผสมสารตัวเติมเข้าไปคือเรซินผสมกับ Calcium Carbonate ในอัตราส่วน 12 ต่อ 2 โดยน้ำหนัก จะทำให้สามารถทนต่อการสร้างร่องรอยบนพื้นผิวของฉนวน ที่ระดับแรงดันทดสอบสูงขึ้นแต่เมื่อนำมาทดสอบแรงดึงจะให้ค่าแรงดึงของฉนวนน้อย ดังนั้นฉนวนผสมแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางกลที่แตกต่างกัน อัตราการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของคุณสมบัติดังกล่าวขึ้นกับค่าอัตราส่วนและชนิดของสารตัวเติมซึ่งจะต้องมีอัตราส่วนที่พอดีเท่านั้นจึงจะให้ค่าคุณสมบัติที่ดีที่สุด

## 2.2 มาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

มาตรฐาน IEC60947-3 [3] Low – Voltage Switchgear and Control Gear – Part 3: Switch, Disconnectors, Switch –Disconnectors and Fuse-Combination Units”, Edition 2.2, 2005 การทดสอบเฉพาะแบบมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบฟิวส์สวิตช์แรงต่ำที่ออกแบบมานั้น มีคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดหรือไม่ การทดสอบดังกล่าวจะทดสอบกับฟิวส์สวิตช์แรงต่ำต้นแบบชุดแรกๆ เท่านั้น มีลำดับการทดสอบ 5 ลำดับแต่สำหรับฟิวส์สวิตช์แรงต่ำจะทดสอบ 4 ลำดับ และมีการทดสอบเฉพาะแบบ 8 การทดสอบ

มาตรฐาน ASTM D2240 [5] Durometer Hardness เป็นตัวชี้วัดค่าความต้านทาน ความแข็งของยางหรือวัสดุพลาสติก ขึ้นอยู่กับความลึกของการกดของหัวกดรูปกรวย การทดสอบ Shore D จะใช้เมื่อผลการทดสอบ Shore A มากกว่า 90 และการทดสอบ Shore A จะใช้เมื่อผลการทดสอบ Shore D น้อยกว่า 20

มาตรฐาน ASTM D412 [6] Tensile Test การทดสอบแรงดึง ระบุถึงสภาวะการทดสอบในการหาสมบัติแรงดึงของอีลาสโตเมอร์ โดยใช้ชิ้นงานรูปทรงดัมเบลล์สมบัติแรงดึงเหล่านี้ได้แก่ ความต้านทานแรงดึงสูงสุดความเครียดที่จุดแตกหัก และมอดูลัสสมบัติทางกลของพลาสติกสามารถเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเติมสารตัวเติมบางประเภทเข้าไปในพลาสติกเช่น ความแข็งแรง การยืดตัวและความเหนียวเนื่องจากการสามารถในการยืดตัวของยางและพลาสติก ทำให้ต้องมีการใช้ Extensometer เพื่อการตรวจวัดค่าการยืดตัวที่ถูกต้องในขณะที่ให้แรงกระทำโดยทั่วไปแล้ว Long Travel Contact-style Extensometers มักจะถูกใช้ในการทดสอบนี้

มาตรฐาน ASTM D149 [7] Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials at Commercial Power Frequencies ระบุถึงสภาวะการทดสอบความแข็งแรงของฉนวนเป็นตัวชี้วัดของความแข็งแรงทางไฟฟ้าของวัสดุที่เป็นฉนวน ความเป็นฉนวนที่ถูกกำหนดให้เป็นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่จำเป็นในการสูญเสียอิเล็กทรอนิกส์ผ่านวัสดุและจะแสดงเป็น โวลต์ต่อความหนาของหน่วย ความเป็นฉนวนสูงขึ้นแสดงให้เห็นถึงคุณภาพที่ดีขึ้นของฉนวนกันความร้อน

มาตรฐาน ASTM D150 [8] Standard Test Methods for AC Loss Characteristics and Permittivity (Dielectric constant) of Solid Electrical Insulation ระบุถึงสภาวะการทดสอบค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและการกระจายดัชนีการสูญเสียปัจจัยมุมเฟสและมุมการสูญเสียของชิ้นงานจากวัสดุฉนวนของแข็งทางไฟฟ้าเมื่อมาตรฐานที่ใช้มีสมรรถนะในการต้านทานของ Impedances ช่วงความถี่ที่สามารถครอบคลุมจาก 1 Hz ถึง 100 MHz

มาตรฐาน ISO 188: 2007 [9] Rubber, Vulcanized or Thermoplastic Accelerated Ageing and Heat Resistance Tests เป็นตัวชี้วัดค่าความทนทานต่อสภาพอากาศด้วยการเร่งอายุและความร้อนจากการทดสอบความต้านทานซึ่งออกแบบมาเพื่อประเมินความต้านทานของพลาสติกต่อการเสื่อมสภาพด้วยเรื่องของเวลาและความร้อนภายใต้การควบคุมความรุนแรงจากอิทธิพลของระยะเวลาที่แน่นอนหลังจากที่มีการทดสอบคุณสมบัติและทำการเปรียบเทียบกับพลาสติกที่ไม่ได้ผ่านความร้อน

มาตรฐาน ISO 1817: 2007 [10] Rubber, Vulcanized or Thermoplastic Determination of the Effect of Liquids เป็นตัวชี้วัดค่าความทนทานต่อของเหลวของพลาสติก ทำได้โดยการเปรียบเทียบคุณสมบัติของพลาสติกทั้งก่อนและหลังการแช่ในของเหลวทดสอบตามระยะเวลาที่กำหนด เสมือนไปติดตั้งใช้งานจริง โดยของเหลวที่มีโอกาสจะสัมผัสกับฉนวนฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ

จากการศึกษาผู้ทำวิทยานิพนธ์ได้สังเกตเห็นถึงความสำคัญของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ (Low Tension Fuse Switch) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้กันโดยทั่วไปในระบบจำหน่ายแรงต่ำของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและการไฟฟ้านครหลวง ฟิวส์สวิตช์แรงต่ำทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ตัดตอนและป้องกันเมื่อเกิดการลัดวงจร โดยจะใช้งานร่วมกับฟิวส์แรงต่ำ (High Rupturing Capacity Fuse, HRC) ดังนั้น ฉนวนเรซินที่พัฒนาขึ้นจะช่วยให้ฟิวส์สวิตช์สามารถทนทานต่อแรงกระแทก ไม่แตกหักง่าย และสามารถทนทานต่อสภาพใช้งานเท่าเทียมหรือดีกว่าฉนวนเซรามิกแบบเดิมและข้อสำคัญคือ มีกระบวนการผลิตที่ง่ายและราคาไม่แพง

### 2.3 คุณสมบัติของวัสดุฉนวนไฟฟ้า [11]

ฉนวนแข็งที่ดีนั้นจะต้องมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง มีความต้านทานสูงทุกระดับแรงดัน มีพลังงานสูญเสียต่ำในไดอิเล็กตริกต่ำ ทนต่อแรงกลได้สูง ปลอดภัยจากฟองก๊าซและความชื้น และไม่ดูดซับความชื้น ทนความร้อนได้สูง ทนต่อปฏิกิริยาเคมีได้และไม่เป็นพิษเมื่อติดไฟ ฉนวนแข็งที่ใช้กันอยู่ทั่วไปอาจได้มาจากสารอินทรีย์เช่น กระดาษ ฝ้าย ยาง เป็นต้น หรือสารอนินทรีย์เช่น ไมกา แก้ว เซรามิก หรือสารสังเคราะห์ เช่น พลาสติกฉนวนแข็งที่ใช้กันอยู่ทั่วไป

พลาสติกเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่สังเคราะห์ขึ้น ใช้แทนวัสดุธรรมชาติ บางชนิดเมื่อเย็นจะแข็งตัว เมื่อถูกความร้อนก็อ่อนตัว บางชนิดก็แข็งตัวถาวร มีหลายชนิด เช่น ไนลอน ยางเทียม ใช้ทำสิ่งต่างๆ เช่น เสื้อผ้า พาหนะส่วนประกอบของเรือหรือรถยนต์ พลาสติกเป็นสารสังเคราะห์มาจากเซลลูโลสซึ่งมีอยู่ในธรรมชาติ เช่น น้ำมันดิบยางไม้ เซลลูโลสประกอบด้วยธาตุคาร์บอน ออกซิเจน ไฮโดรเจน ไนโตรเจนและคลอรีน นำมาสังเคราะห์โดยกระบวนการที่เรียกว่า “พอลิเมอร์ไรเซชัน” บางครั้งพบว่ามีการใช้คำว่า “พลาสติก” และ “พอลิเมอร์” ในความหมายเดียวกันหรือใกล้เคียงกัน แต่

คำว่า “พอลิเมอร์” มักหมายถึงวัสดุประเภทพลาสติก ยาง เส้นใยและกาว ส่วนคำว่า “พลาสติก” จะหมายถึงสารผสมระหว่างพอลิเมอร์และสารเติมแต่ง เช่น สี สารพลาสติกไซเซอร์ สารเพิ่มเสถียรภาพและฟิลเลอร์ ที่ถูกนำมาใช้งานเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปโดยการขึ้นรูปให้มีรูปทรงต่างๆ หากแปลตามรากศัพท์คำว่า พอลิเมอร์ หรือ Polymer มาจากคำกรีก 2 คำ คือคำว่า Poly แปลว่ามาก และ คำว่า mer แปลว่าหน่วย พอลิเมอร์จึงแปลว่า สารที่มีโมเลกุลประกอบด้วยหน่วยซ้ำๆ กันต่อกันเป็นสายยาวๆ ลักษณะสมบัติที่ต้องการของฉนวนแข็งกำหนดด้วยคุณสมบัติที่สำคัญคือ

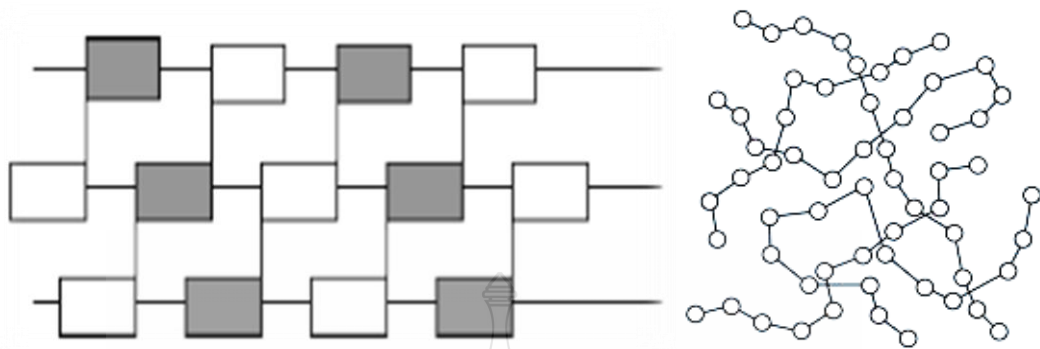
- ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า
- เปรอ์มิตติวิตี (Permittivity)
- แฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก
- ความคงทนต่อแรงกล
- ความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมี และความร้อน

#### 2.4 ประเภทของพลาสติก [12]

พลาสติกสามารถแบ่งออกตามลักษณะการยึดเกาะตัวของโครงสร้างโมเลกุลได้เป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 2 ชนิด คือ พลาสติกประเภทค้ำรูปและพลาสติกประเภทคงรูป

2.4.1 เทอร์โมพลาสติกหรือ พลาสติกประเภทค้ำรูปหรือที่รู้จักกันทั่วไปว่า พลาสติกอ่อนเป็นชนิดที่ถูกความร้อนแล้วจะหลอมตัว กลายเป็นของเหลวได้ พลาสติกชนิดนี้ มีโครงสร้างเป็นสายยาว ทำให้ทนต่อแรงดึงได้สูงเป็นพลาสติกที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกหลังจากนำไปหล่อทำเป็นผลิตภัณฑ์แล้วเปรียบเสมือนน้ำนำไปทำน้ำแข็ง เมื่อถูกความร้อนก็จะละลายกลายเป็นน้ำอีก และน้ำนี้ก็ยังสามารถนำกลับไปทำน้ำแข็งได้อีกไม่มีที่สิ้นสุด เรียกว่า “Plastics With a Memory” โครงสร้างของพลาสติกประเภทนี้จะประกอบด้วยโมเลกุลเดี่ยวเกาะตัวแบบต่อแขนยาวออกเป็นเส้นด้าย หรือแบบลูกโซ่ (Filament or Chain) การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของพลาสติกอาจเกิดได้ง่ายโดยการไหลเลื่อนระหว่างโมเลกุลต้านแรง Van Der Waal's Forces ซึ่งดึงดูดโมเลกุลเข้าไว้ด้วยกันอย่างอ่อนๆ





รูปที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลแบบลูกโซ่ (Chains Molecule) [12]

2.4.2 เทอร์โมเซตติงหรือพลาสติกประเภทคงรูป หรือที่รู้จักกันทั่วไปว่า พลาสติกแข็ง คือ พลาสติกที่มีรูปทรงถาวรซึ่งผ่านกรรมวิธีการผลิตโดยใช้ความร้อน (Heat) หรือแรงอัด (Pressure) ขึ้นรูป แต่เมื่อเย็นตัวลงจะไม่สามารถทำให้อ่อนตัวโดยใช้ความร้อนหรือนำไปหลอมละลายขึ้นรูปใหม่ได้อีก เปรียบเสมือนไขเมื่อนำไปต้มสุกแล้วจะทำให้เหลวเหมือนเดิมอีกไม่ได้ในประเทศไทย เรียกพลาสติกชนิดนี้อีกชื่อหนึ่งว่า ดุโรพลาสติก (Duroplastics) โครงสร้างของพลาสติกแบบคงรูปร่าง จะมีการเกาะตัวของโมเลกุลเป็นแบบตาข่าย หรือร่างแห (Net) เวลาได้รับความร้อนจะไม่ยืดหรือหดตัวแต่จะเกิด Covalent Bond ยึดระหว่างโมเลกุลขึ้นตัวอย่างเช่น Phenol Formaldehyde หรือที่เรียกว่า Bakelite ยางดิบหากผ่านกรรมวิธี Vulcanization ก็เป็นพลาสติกประเภทคงรูปอย่างหนึ่ง



รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลแบบตาข่าย (Net molecule) [12]

ตารางที่ 2.1 ความแตกต่างระหว่างเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซตติง [12]

เทอร์โมพลาสติก	เทอร์โมเซตติง
1. เป็นพอลิเมอร์แบบเส้นหรือแบบกึ่ง	1. เป็นพอลิเมอร์แบบเชื่อมโยงหรือแบบร่างแห
2. อ่อนตัวหรือหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อน	2. จะแข็งตัวเมื่อได้รับความร้อน
3. ต้องทำให้เย็นก่อนเอาออกจากแม่แบบ มิฉะนั้นจะเสียรูปทรงได้	3. ไม่ต้องรอให้เย็นก่อนเอาออกจากแม่แบบ
4. ไม่เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันในแม่พิมพ์	4. เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันในแม่พิมพ์
5. นำมารีไซเคิลโดยการหลอมและขึ้นรูปใหม่ได้	5. ไม่สามารถนำมารีไซเคิลได้

## 2.5 คุณสมบัติของเรซิน

เรซินคือ เทอร์โมเซตติงที่เป็นพลาสติกหล่อที่มีคุณสมบัติทั้งทางกายภาพ ทางไฟฟ้า และทางเคมีเรซินมีคุณสมบัติให้เนื้อแข็งใส เงามทนอุณหภูมิสูงกว่าพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติกแต่น้อยกว่าโลหะเมื่อเสริมแรงด้วยใยแก้วจะ ได้ความแข็งแรงที่เพิ่มมากขึ้น มีความเบา แข็งแรงเหนียว ไม่เปราะยังมีคุณสมบัติทางกายภาพอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของเรซิน [12]

ลำดับ	คุณสมบัติโดยทั่วไป	ลักษณะ
1	ค่าความหนาแน่น (Density Values)	1.21g/cm <sup>3</sup>
2	ค่าความแข็ง (Hardness Values)	82 (Shore-D)
3	ค่าความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength)	55N/mm <sup>2</sup>
4	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant)	4.7
5	ค่าความคงทนของไดอิเล็กตริก (Dielectric Strength)	480V/mm
6	ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (Electrical Resistivity)	1x10 <sup>15</sup> Ohm/cm

## 2.6 การนำเรซินไปใช้งาน [13]

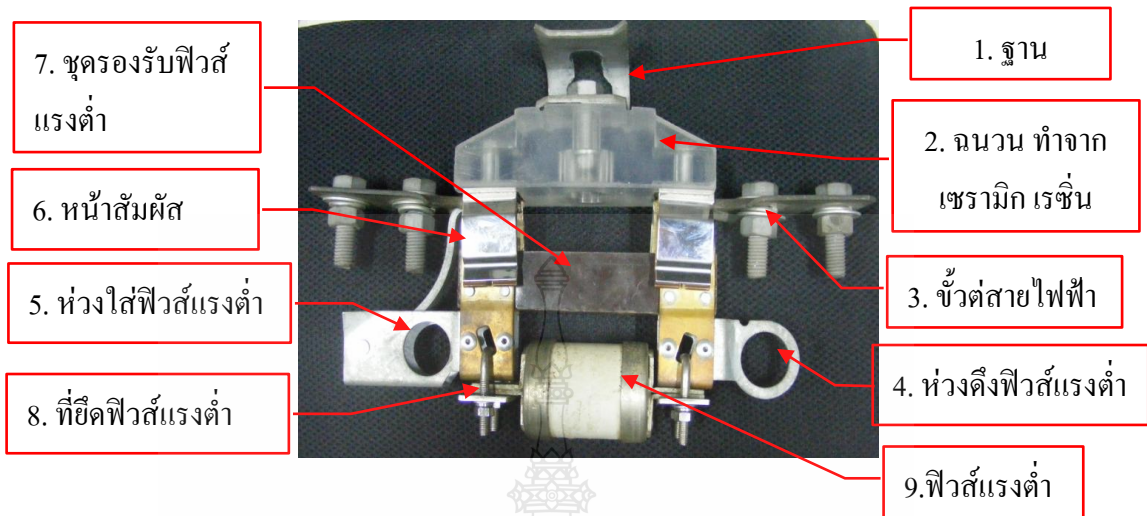
เรซินหรือโพลีเอสเตอร์ (Unsaturated Polyester) ย่อว่า UP รู้จักกันดีในรูปของผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาส การใช้ประโยชน์ นิยมทำผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาส เช่น เรือ รถยนต์ ชิ้นส่วนในเครื่องบิน กระจุกชนิดต่างๆ ไม้อัดต่างๆ เคลือบด้วยโพลีเอสเตอร์

## 2.7 ฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ [14]

ฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ (Low Tension Fuse Switch) เป็นอุปกรณ์ป้องกันการลัดวงจร (Short Circuit) และกระแสเกิน (Over Current) ใช้งานในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่พิกัดแรงดัน 220/380V จะติดตั้งอยู่ทางด้านแรงต่ำของหม้อแปลงระบบจำหน่ายก่อนจะเดินสายไฟไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าต่อไป

### 2.7.1 โครงสร้างของฟิวส์แรงต่ำมีส่วนประกอบสำคัญดังนี้

1. ฐานโลหะทำจากเหล็กชุบสังกะสี มีหน้าที่รองรับฉนวนฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ
2. ฉนวน ทำจากเซรามิก พอร์ซเลนขึ้นเดียว มีหน้าที่รองรับขั้วต่อสายไฟฟ้า
3. ขั้วต่อสายไฟฟ้ามักจะเป็นแผ่นทำจากโลหะผสมมีหน้าที่รองรับสายไฟฟ้า ที่ต่อเข้าและออกจากฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ
4. ห่วงดึงฟิวส์แรงต่ำมีลักษณะเป็นวงแหวนทำจากเหล็กชุบสังกะสีมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 26 มม. โดยจะใช้ไม้ชักฟิวส์ดึงห่วงนำฟิวส์แรงต่ำออกจากฟิวส์สวิตช์เพื่อเปิดวงจร
5. ห่วงใส่ฟิวส์แรงต่ำ มีลักษณะเป็นวงแหวนทำจากเหล็กชุบสังกะสีเส้นผ่าศูนย์กลาง 26 มม. โดยจะใช้ไม้ชักฟิวส์ดันห่วงนำฟิวส์แรงต่ำเข้าไปติดกับฟิวส์สวิตช์เพื่อปิดวงจร
6. หน้าสัมผัส ทำจากเงินหรือทองแดง
7. ชุดรองรับฟิวส์แรงต่ำ มีหน้าที่รองรับฟิวส์แรงต่ำ
8. ที่ยึดฟิวส์แรงต่ำ ทำจาก Stainless Steel ยึดฟิวส์แรงต่ำเข้ากับชุดรองรับฟิวส์แรงต่ำ
9. ฟิวส์แรงต่ำ (High Rupturing Capacity Fuse, H.R.C) ทำจากกระเบื้องภายในมีไส้ฟิวส์ทำจากเงิน มีหน้าที่ป้องกันการลัดวงจร (Short Circuit) และกระแสเกิน (Over Current)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของพิวส์สวิตช์แรงต่ำ

### 2.7.2 การนำพิวส์สวิตช์แรงต่ำไปใช้งาน

พิวส์สวิตช์แรงต่ำจะถูกนำไปติดตั้งด้านแรงต่ำของหม้อแปลงระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค คอสอาร์ม (Cossarm) ทำจากไม้หรือคอนกรีตจะถูกติดตั้งบนเสาไฟเพื่อรองรับพิวส์สวิตช์แรงต่ำ

### 2.8 ศึกษาการออกแบบโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ห่อุปกรณ์เชิงตัวเลข [2]

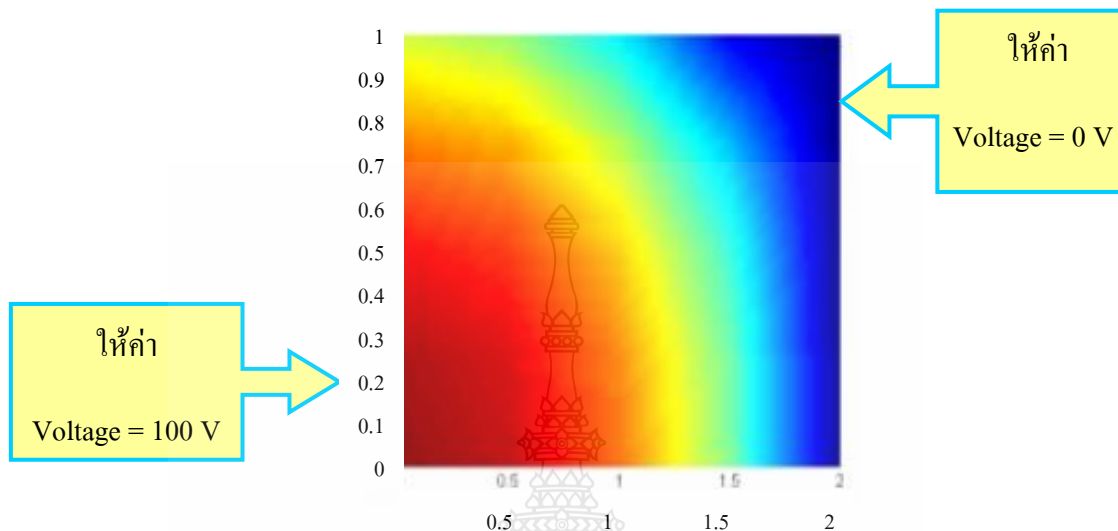
วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) เป็นวิธีการที่ใช้กันมากในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมที่อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equation) ที่มีความซับซ้อนมาก เช่น การวิเคราะห์ความเครียดในชิ้นงานเมื่อถูกแรงกระทำ การคำนวณ Heat Transfer ในชิ้นงาน และการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำ เป็นต้น วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์อาศัยการประมาณของสมการเชิงอนุพันธ์ ด้วยสมการเชิงเส้นและใช้ตัวดำเนินการทางเมทริกซ์ ในการหาคำตอบของสมการเชิงเส้นที่สร้างขึ้น วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสูง ที่สำคัญวิธีการนี้ได้ถูกนำไปจำลองปัญหาต่างๆ เพื่อทดสอบผลที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานแบบต่างๆ โดยไม่จำเป็นต้องมีการสร้างชิ้นงานจริงขึ้นมาเลย แต่ในปัจจุบัน โปรแกรมสำเร็จรูปเหล่านี้ของต่างประเทศมีราคาแพงมาก ส่วนในประเทศไทยยังไม่ได้มีการพัฒนากันอย่างเต็มที่

ปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์ส่วนใหญ่ ล้วนประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ในรูปแบบต่างๆ กัน ที่สอดคล้องกับลักษณะของชนิดของปัญหานั้นๆ เช่น การคำนวณหาระดับของอุณหภูมิตามตำแหน่งต่างๆ ของวัตถุ อาจจะเป็น Heat Sink หรืออาจจะเป็นแผ่นโลหะ ซึ่งทำได้โดยการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ที่อธิบายสถานะความสมดุลของการถ่ายเทความร้อน หรือการคำนวณแรงกดที่กดทับจักรยาน เพื่อทดสอบว่าเหล็กมีความคงทนในการรองรับแรงมากที่สุดเท่าไร โดยเริ่มมาจากสมการเชิงอนุพันธ์ที่อธิบายสถานะของความสมดุลของโครงสร้างของจักรยาน รวมไปถึงความแรงกดที่เกิดขึ้นเพื่อใช้ในการออกแบบรูปร่างของจักรยาน ซึ่งอาจจะเริ่มจากสมการเชิงอนุพันธ์ที่อธิบายสถานะความสมดุลของแรง เป็นต้น

การแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเหล่านี้ปกติแล้วจะทำโดย (1) การใช้ระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์ขั้นสูง (Advance Mathematic) เพื่อหาผลเฉลยแม่นยำตรงและ (2) การใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อหาผลเฉลยโดยประมาณ ประโยชน์จากการใช้คณิตศาสตร์ขั้นสูงจะก่อให้เกิดผลเฉลยแม่นยำตรงที่ถูกต้องตามตำแหน่งใดๆที่ต้องการ แต่โดยปกติปัญหาทั่วไปผลเฉลยแม่นยำตรงจะไม่สามารถหาได้ เนื่องจากปัญหาในปัจจุบันมีเงื่อนไขขอบเขตและลักษณะรูปแบบของปัญหาที่มีความซับซ้อนของลักษณะรูปแบบของปัญหาดังกล่าวประกอบกับประสิทธิภาพของเครื่องคอมพิวเตอร์ในปัจจุบัน ทำให้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขได้รับความนิยมและใช้กันอย่างกว้างขวาง

เนื่องจากระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสามารถแก้ไขปัญหารูปร่างลักษณะซับซ้อนได้เป็นอย่างดีแต่ขณะเดียวกันจะให้ผลเฉลยโดยประมาณที่ตำแหน่งบางตำแหน่งเท่านั้น ดังนั้นจะก่อให้เกิดผลลัพธ์ที่มีความผิดพลาด ซึ่งค่าความผิดพลาดนั้นจะขึ้นอยู่กับระเบียบวิธีการที่เลือก ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite Difference Method) และ ระเบียบวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) และในวิจัยนี้จะใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการวิเคราะห์เพราะง่ายต่อการวิเคราะห์

ตัวอย่าง รูปของโจทย์ปัญหาการกระจายศักย์ไฟฟ้าในสนามไฟฟ้าสถิต



#### รูปที่ 2.4 การกระจายศักย์ไฟฟ้าในสนามไฟฟ้าสถิต

จากผลการจำลองคำนวณสำหรับฟิวส์สวิตช์แรงต่ำที่ผ่านการออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะถูกนำไปขึ้นรูปแม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปฉนวน การขึ้นรูปฉนวนใช้วิธีการหล่อ ซึ่งเป็นวิธีการขึ้นรูปที่ง่ายและไม่ยุ่งยาก เหมาะกับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างไม่ซับซ้อน เรซินเมื่อผสมกับตัวทำแข็งแล้วสามารถแข็งตัวได้เองที่อุณหภูมิห้อง ใช้เวลาประมาณ 30 ถึง 120 นาที การทำให้เรซินคงรูปหรือเรียกว่าเกิดการเชื่อมต้อข้ามไปมาระหว่างสายโซ่ของโมเลกุล

#### 2.9 การออกแบบแม่พิมพ์สำหรับฉนวนฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ

การใช้โปรแกรม AutoCAD ช่วยในด้านการออกแบบและเขียนแบบชิ้นงาน ซึ่งสามารถเขียนได้ทั้ง 2 มิติ และ 3 มิติ ทั้งนี้ในชิ้นงาน 3 มิติ นั้นยังสามารถทำการ Render วัตถุหรือชิ้นงาน (การให้แสง สี และเงา) ได้ด้วย ซึ่งจะช่วยให้งานมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

โปรแกรม AutoCAD มีคำสั่งและเครื่องมือต่างๆ ที่ใช้งานมากมาย ซึ่งแยกออกเป็นหลายประเภทยกตัวอย่างเช่น คำสั่งที่ใช้เขียนชิ้นงาน คำสั่งที่ใช้เขียนตัวอักษร คำสั่งที่ใช้ในการแก้ไขตกแต่งชิ้นงานและตัวอักษร คำสั่งทำสำเนาชิ้นงาน เครื่องมือที่ช่วยในการกำหนดตำแหน่งบนพื้นที่วาดภาพ และตำแหน่งบนตัววัตถุแต่ละชิ้น เป็นต้น ด้วยเครื่องมือที่มากมายนี้ทำให้โปรแกรมมีความยืดหยุ่นในการเขียนแบบอย่างมาก และสามารถเขียนได้ดังที่ออกแบบและจินตนาการเอาไว้

## 1. ความได้เปรียบของการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ

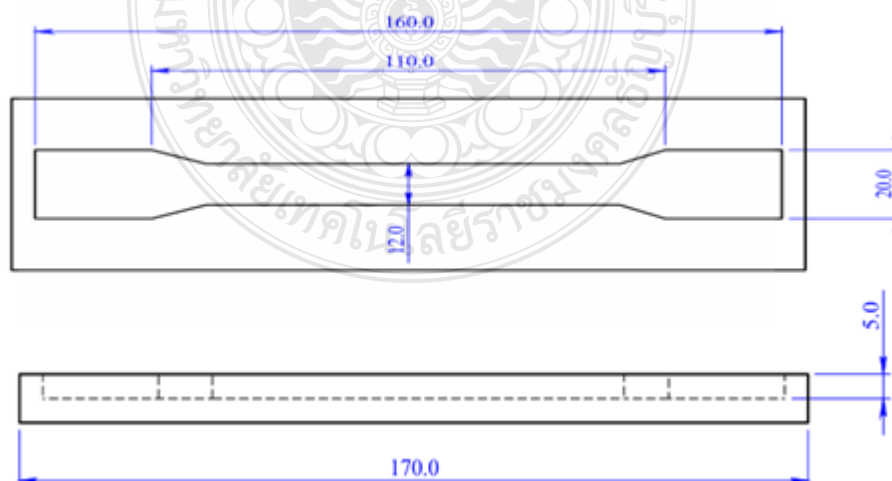
ความจำเป็นที่ต้องการจะใช้คอมพิวเตอร์เข้าช่วยในการออกแบบ (Computer-Aided Design : CAD ) นับวันยิ่งเห็นความสำคัญมากขึ้น ความต้องการบุคลากรที่มีความสามารถใช้งาน CAD อยู่เป็นจำนวนมาก ความนิยมที่จะต้องการใช้ CAD มาทดแทนการทำด้วยมือเพิ่มความต้องการมากขึ้น ซึ่งมีเหตุผลสนับสนุนอยู่หลายประการด้วยกันคือ ความได้เปรียบอย่างมากที่การทำแบบด้วยมือมนุษย์ไม่อาจทดแทนได้ ไม่ว่าจะเป็นความแม่นยำที่สูง การมีเครื่องมือ ( Tools ) ต่างๆ เข้าช่วยทำให้การแก้ไขหรือทำซ้ำเป็นไปอย่างง่ายและรวดเร็วมาก ซึ่งเคยมีผู้เปรียบเทียบความรวดเร็วของการทำ Drawing ด้วยมือกับการทำด้วย CAD ก็พบว่าเมื่อให้งานที่เหมือนกัน ไม่มีที่แก้ไขหรือทำซ้ำ Drawing ขึ้นมาแล้ว CAD จะใช้เวลาน้อยกว่าและมีประสิทธิภาพสูงอีกด้วย

## 2. ประโยชน์และข้อดีของ AutoCAD ดังนี้

- 1) ลดระยะเวลาในการออกแบบและเขียนแบบ
- 2) ช่วยในการแก้ไขและดัดแปลงแบบ Drawing ขึ้นงานเดิมโดยใช้เวลาที่สั้นมาก
- 3) มีความแม่นยำสูง ลดความผิดพลาดในการทำงาน
- 4) สามารถใช้เป็นมาตรฐานที่ดีในการทำงานต่อไปได้

### 2.9.1 แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อทดสอบคุณสมบัติทางกลและทางไฟฟ้า

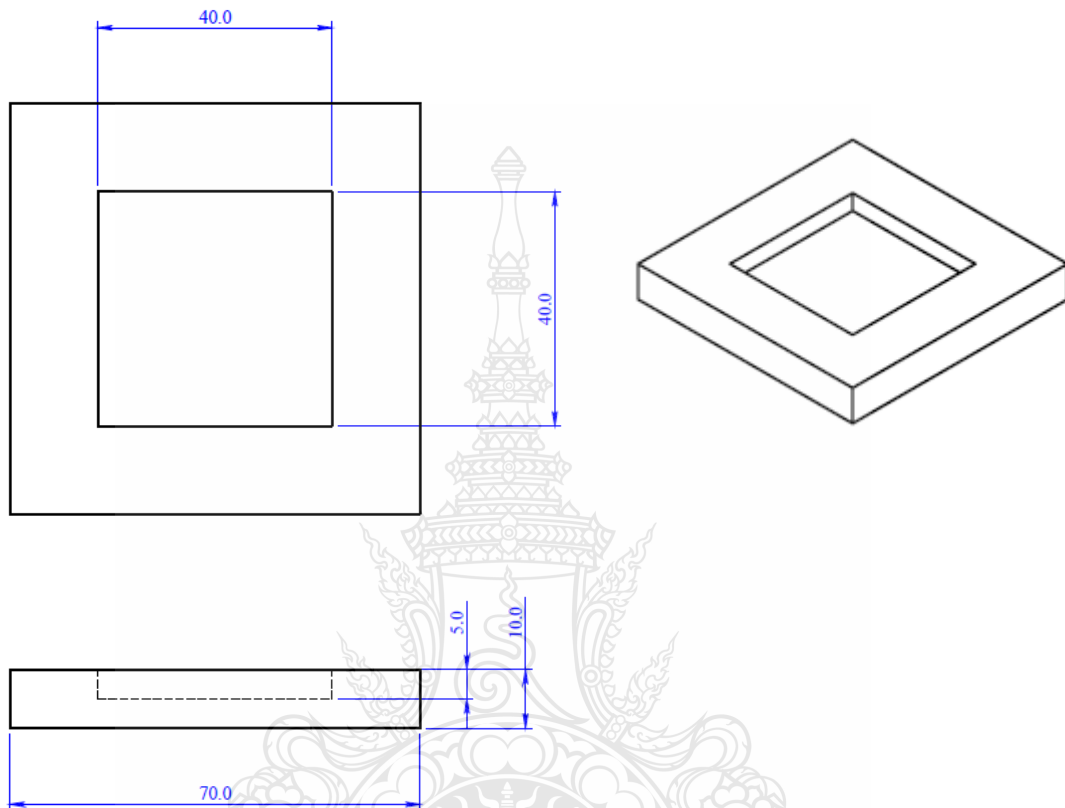
แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานเป็นแผ่น เพื่อทดสอบทนต่อค่าแรงดึง โดยมีรูปทรงครีมนเบล ขนาด 160 x 20 x 5 mm ตามรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปเรซินแบบทรงครีมนเบล



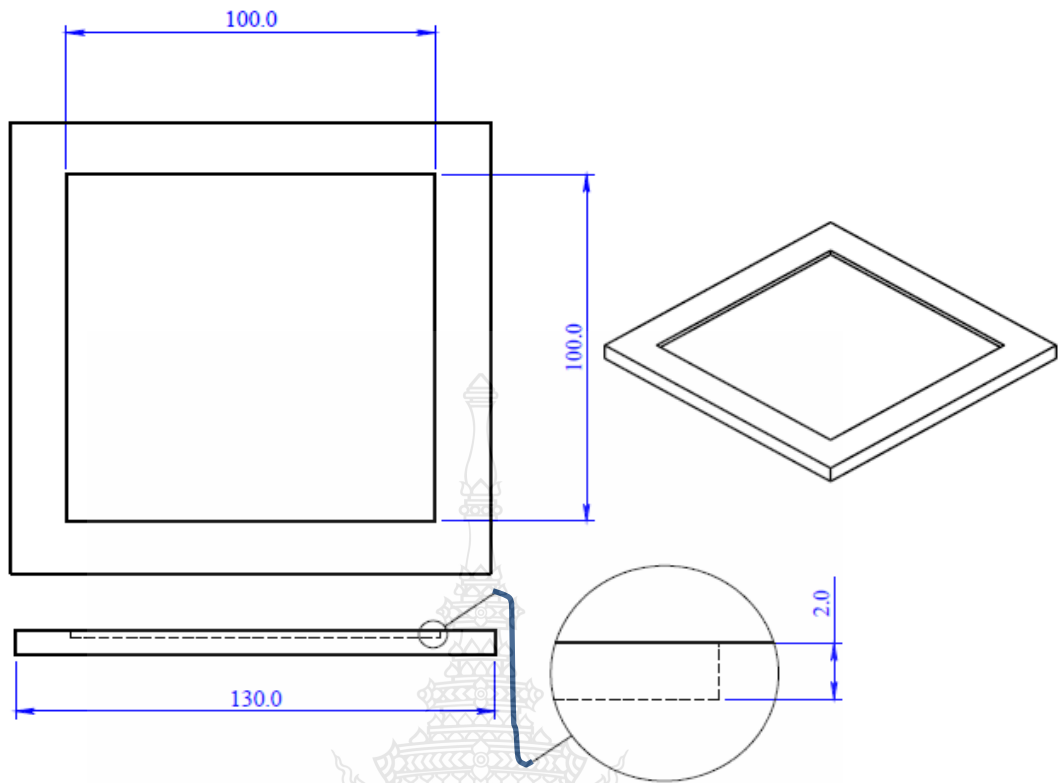
แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานเป็นแผ่นเพื่อทดสอบค่าความแข็ง โดยมีรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด 40 x 40 x 5 mm ตามรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานแบบทรงสี่เหลี่ยม

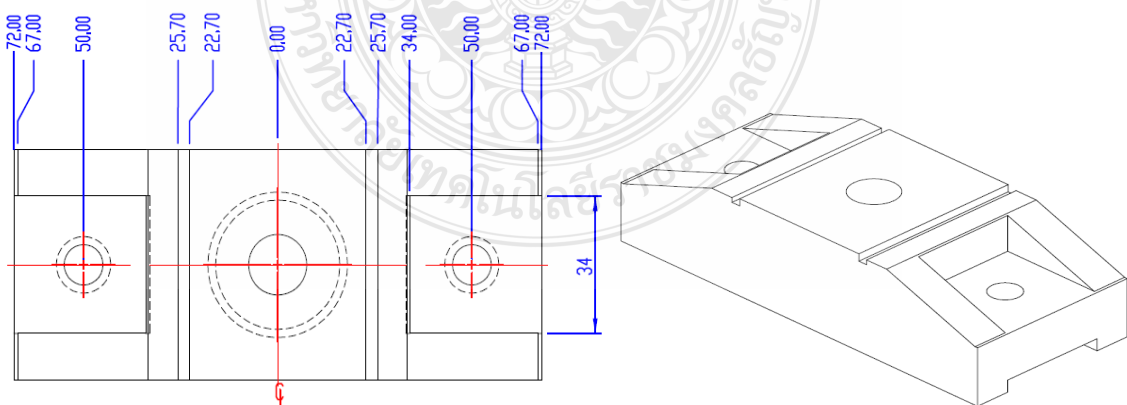
แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานเป็นแผ่นเพื่อทดสอบค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริก และค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า โดยมีรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด 100 x 100 x 2 mm ตามรูปที่ 2.7





รูปที่ 2.7 แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปเรซิน แบบทรงสี่เหลี่ยมเพื่อทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า

แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานฉนวนเรซินฟิวส์สวิตช์เพื่อทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าและนำแม่พิมพ์ไปจำลองสนามไฟฟ้าอีกทางหนึ่งตามรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปฉนวนเรซินฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ

## 2.10 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุทนความร้อน

การทดสอบแรงดึงและการทดสอบความแข็งเป็นการทดสอบพื้นฐานที่ใช้ทดสอบสมบัติของวัสดุต่างๆ ปกติการทดสอบแรงดึงและความแข็งจะใช้ขึ้นทดสอบตามแบบมาตรฐาน โดยการทดสอบแรงดึงและทดสอบความแข็งใช้ในการตรวจวัดพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุภายใต้แรงดึงและการกดของวัสดุ ดังนั้นจึงต้องมีสถานะในการบ่มเร่งสำหรับวัสดุนั้นๆ ดังต่อไปนี้

### 2.10.1 ความทนทานต่อความร้อน (Heat Resistance) [9]

การนำฟิวส์สวิทช์แรงต่ำที่ทนทานทำจากเรซิน ไปติดตั้งใช้งานกลางแจ้งสภาพอากาศร้อนมีผลทำให้ทนความร้อนเสื่อมสภาพได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการทดสอบความทนทานต่อความร้อนของวัสดุทนทานที่ทำจากเรซินตามมาตรฐาน ISO 188 [9] โดยการนำเรซิน เข้าสู่ตู้อบอากาศร้อน (Air Oven) ตั้งอุณหภูมิทดสอบที่  $70 \pm 1$  °C เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง เมื่อครบระยะเวลาการให้ความร้อน นำชิ้นงานออกจากตู้อบอากาศร้อนทิ้งไว้ในห้องที่ปรับภาวะไม่น้อยกว่า 16 ชั่วโมงแต่ไม่เกิน 6 วัน เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพกับเรซินที่ไม่ผ่านการอบอากาศร้อน ในที่นี้จะเปรียบเทียบสมบัติการทนต่อแรงดึง (Tensile Strength) และค่าความแข็ง (Hardness)

### 2.10.2 ความทนทานต่อน้ำมันหม้อแปลงหรือน้ำเกลือ (Oil or Chemical Resistance)

การทดสอบความทนทานต่อน้ำมันหรือสารเคมีทำได้โดยการนำเรซิน ไปทดสอบตามมาตรฐาน ISO 1817 [10]

ISO 1817 คือ มาตรฐานการทดสอบความคงทนต่อของเหลวของเรซิน ทำได้โดยการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเรซินทั้งก่อนและหลังการแช่ในของเหลวทดสอบตามระยะเวลาที่กำหนด ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงการทดสอบฟิวส์สวิทช์แรงต่ำที่มีทนทานทำจากเรซิน ไปติดตั้งใช้งานจริงโดยของเหลวที่มีโอกาสจะสัมผัสกับฉนวนฟิวส์สวิทช์มีตัวอย่างดังนี้

1. น้ำมันหม้อแปลง เนื่องจากฟิวส์สวิทช์แรงต่ำจะถูกติดตั้งอยู่ทางด้านแรงต่ำของหม้อแปลงในการบำรุงรักษาอาจทำให้ฟิวส์สวิทช์แรงต่ำสัมผัสกับน้ำมันหม้อแปลงได้ โดยชนิดน้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ในการทดสอบเป็นน้ำมันแร่ (Mineral Oil) ชนิด Naphthenic

2. น้ำเกลือ เนื่องจากในกรณีที่มีการติดตั้งฟิวส์สวิทช์แรงต่ำบริเวณชายทะเลฝนที่ตกลงมาจะมีส่วนผสมของไอเกลือซึ่งจะทำให้มีผลต่อฟิวส์สวิทช์แรงต่ำได้ ในที่นี้จะใช้น้ำเกลือที่มีค่าความเค็ม 34 ส่วนในพันส่วน (ppt) ซึ่งเป็นค่าความเค็มสูงสุดของน้ำทะเลไทย

โดยการนำฉนวนฟิวส์สวิทช์แรงต่ำที่ทำจากเรซินไปแช่ในของเหลวที่กล่าวมาข้างต้นที่อุณหภูมิ  $70 \pm 1$  °C เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง แล้วเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่างๆ กับฉนวนฟิวส์สวิทช์แรงต่ำที่ทำจากเรซินที่ไม่ผ่านการแช่ของเหลว

- 1) การเปลี่ยนแปลงของการรับแรงดึง
- 2) การเปลี่ยนค่าความแข็ง
- 3) การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก
- 4) การเปลี่ยนแปลงของปริมาตร

### 2.10.3 การทดสอบความทนทานทางกล [15]

#### 1. การทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile Test) [6]

สิ่งที่สำคัญของการทดสอบสมบัติด้านแรงดึงคือชิ้นงานทดสอบซึ่งส่วนใหญ่จะมีรูปทรงครัมเบล ซึ่งจะได้จากการเตรียมชิ้นงานแบบต่างๆ ขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุเช่นกรณีที่เป็นเรซินก็จะได้จากการทำแบบเป็นรูปครัมเบล ด้วย Die ส่วนในกรณีของพลาสติกอาจจะได้จากกระบวนการฉีด (Injection Molding) หรือได้จากการตัดแผ่นพลาสติกด้วย Die

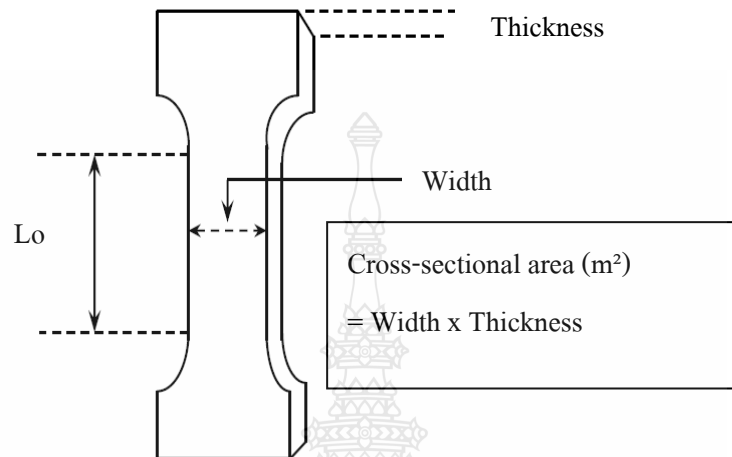
ในขณะที่ทดสอบจะใช้เครื่อง Universal Testing Machine ดังรูปที่ 2.9 โดยจะทำการจับชิ้นงานที่ตำแหน่งปลายทั้งสองด้านด้วยระยะคงที่ (ตามมาตรฐานกำหนด) แล้วทำการดึงยึดชิ้นงานด้วยอัตราการดึงที่คงที่ทำการบันทึกการเปลี่ยนแปลงของแรงและระยะยึดของชิ้นงานบริเวณตรงกลาง



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างเครื่องทดสอบแรงดึง [15]

รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะทั่วไปของชิ้นงานรูปครัมเบล สำหรับการทดสอบแรงดึงโดยในการคำนวณค่าความเครียด (Strain) จะใช้ค่า  $\Delta L$  ต่อ  $L_0$  ซึ่งต้องระวังด้วยว่าค่าที่ใช้ต้องเป็นค่าที่มาตรฐานกล่าวคือ  $\Delta L$  ควรวัดโดยใช้ Extensometer จะแม่นยำกว่า ในกรณีที่เป็นพลาสติกแข็งอาจ

จะอนุโลมให้ใช้ระยะเดินทางของมือจับ (Grip) เป็น  $\Delta L$  แทนได้เนื่องจากพลาสติกแข็งมักจะยึดตัวได้น้อยและนิ่มขนาดก่อนจะเกิดการยืดบริเวณรอยคอด



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างขนาดและรูปทรงชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึง [15]

## 2 การทดสอบค่าความแข็ง (Hardness Testing) [15]

ความแข็งในที่นี้หมายถึงการต้านทานการเปลี่ยนรูป (Deformation) ของวัสดุซึ่งค่าที่วัดได้จากการทดสอบจะไม่ใช่ค่าสัมบูรณ์แต่จะเป็นค่าในเชิงเปรียบเทียบ (Relative Term) ค่าความแข็งที่กล่าวถึงนี้จะแตกต่างไปจากค่าความต้านทานการขัดสี (Abrasion Resistance) หรือค่าความต้านทานการสึกหรอของวัสดุยกตัวอย่างเช่น พอลิสไตรีนจัดเป็นวัสดุที่มีความแข็งสูงแต่ขณะเดียวกันก็มีความต้านทานการขัดสีต่ำ

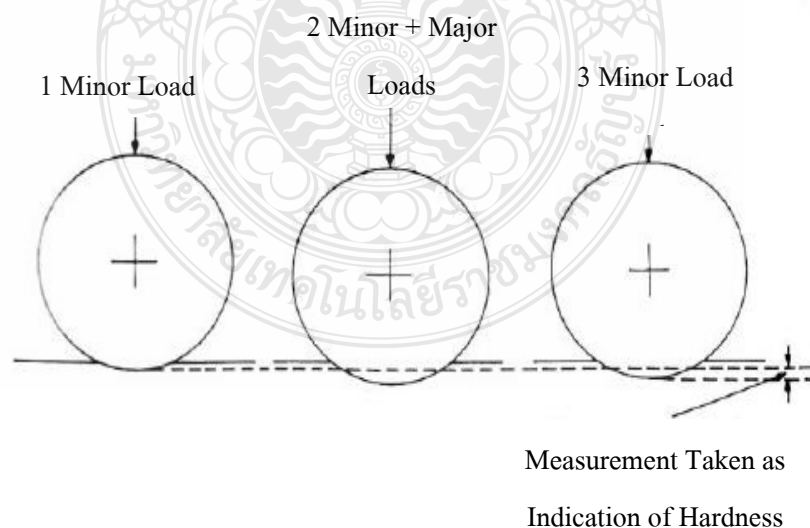
การทดสอบความแข็งของพอลิเมอร์สามารถทำได้ 2 วิธีขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ ตารางที่ 2.3 กล่าวคือการทดสอบแบบ Rockwell จะใช้กับพลาสติกที่มีลักษณะแข็งเช่น พอลิสไตรีน พอลิเมธิลเมทาคริเลตและไนลอนเป็นต้น ในขณะที่การทดสอบแบบ Durometer จะใช้กับพอลิเมอร์ที่มีความอ่อนตัวมากกว่าตัวอย่างเช่น ยางชนิดต่างๆรวมทั้งพอลิไวนิลคลอไรด์ชนิดที่เติมสารเพิ่มสภาพพลาสติก (Plasticized PVC) และพอลิเอธิลีน

ตารางที่ 2.3 วิธีทดสอบความแข็งที่ควรเลือกสำหรับพลาสติกต่างๆ [15]

วัสดุ	วิธีทดสอบ
ยาง	Shore A
PVC	Shore A
LDPE	Shore D
MDPE	Shore D
HDPE	Shore D
PP	Rockwell R
PMMA	Rockwell M

การทดสอบค่าความแข็งแบบ Rockwell

หลักการพื้นฐานของการทดสอบความแข็งแบบ Rockwell คือการวัดความลึกของลูกบอลเหล็กที่ใช้เป็นตัวกด (Indentor) โดยในการทดสอบจะมี 3 ขั้นตอนหลัก รูปที่ 2.10 คือเริ่มจากการวางน้ำหนักกรอง (Minor Load) ประมาณ 10 Kg ลงบนลูกบอลเหล็กเพื่อให้เกิดแรงกดลงสัมผัสกับผิวชิ้นงานทดสอบจากนั้นจึงทำการ Set Zero (ภายในเวลา 10 วินาที มิฉะนั้นค่าอาจจะเปลี่ยนแปลงไปอีกเนื่องจากความเป็น Viscoelastic ของพอลิเมอร์)



รูปที่ 2.11 ขั้นตอนในการทดสอบความแข็งแบบ Rockwell [15]



**รูปที่ 2.12** เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Rockwell [15]

หลังจากนั้นจึงเพิ่มแรงหลัก (Major Load) ให้กับลูกบอลเหล็กเป็นเวลานาน 15 นาที จากนั้นจึงยกน้ำหนักกดออกปล่อยให้ชิ้นงานเกิดการคืนตัว (Recover) ต่อไปอีกประมาณ 15 วินาที แล้วจึงอ่านค่าความแข็งจากสเกลของเครื่องวัด โดยจะมีหน่วยกับเป็นสัญลักษณ์ R, L, M, E อยู่ข้างหลังตัวเลขขึ้นอยู่กับชนิดของลูกบอลเหล็กและแรงที่ใช้กด ตารางที่ 2.4

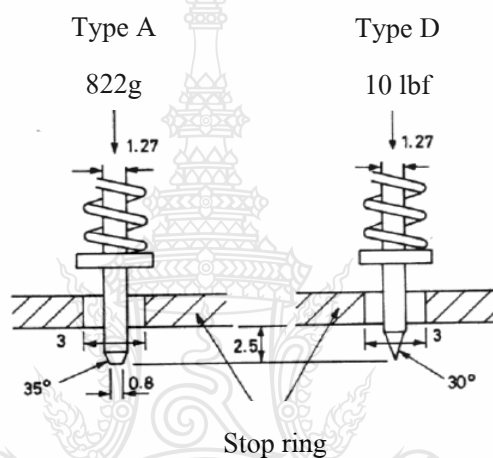
**ตารางที่ 2.4** ชนิดของลูกบอลเหล็กและแรงที่ใช้กดในการทดสอบค่าความแข็งแบบต่างๆ [15]

Scale	Major Load (Kg)	Diameter of Indenter (inch)
R	60	1/4
L	60	1/4
M	100	1/4
E	100	1/8

โดยสเกล R และ L จะใช้กับพลาสติกที่มีค่าความแข็งต่ำ ส่วนสเกล M และ E จะใช้กับพลาสติกที่มีความแข็งสูง โดยในแต่ละสเกลที่ใช้ทดสอบนั้นถ้าหากตัวเลขที่อ่านได้จากหน้าปัดมีค่าเกิน 115 จะถือว่าความไว (Sensitivity) ของการวัดนั้นสูญเสียไปและต้องเปลี่ยนไปใช้สเกลทดสอบถัดไป

การทดสอบค่าความแข็งแบบ Durometer

การใช้ Durometer วัดความแข็งพอลิเมอร์จะกระทำโดยการวางชิ้นงานบนผิวเรียบ กดหัวเข็มลงบนชิ้นงานจนกระทั่งสุดระยะของหัวเข็ม (ถึงจุด Stop Ring) แล้วทำการอ่านค่าความแข็ง จากหน้าปัดภายในระยะเวลาคงที่ (เช่นประมาณ 10 วินาที) ซึ่งตัวเลขที่อ่านค่าได้จาก Durometer นี้จะ ไม่มีหน่วยนอกจากนั้น Durometer ที่ใช้ในการทดสอบจะแบ่งย่อยออกเป็น 2 ประเภทคือแบบ Shore A และแบบ Shore D รูปที่ 2.13 ซึ่งทั้ง 2 แบบนี้จะแตกต่างกันในแง่ของรูปทรงและขนาดของ หัวกดโดยทั่วไป Shore A จะใช้กับวัสดุที่อ่อนกว่าในขณะที่ Shore D จะใช้กับวัสดุที่แข็ง



รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะของ Durometer แบบ Shore A และ Shore D [15]

#### 2.10.4 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุฉนวนเรซิน

การทดสอบค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant) ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริก (Dielectric Loss) และค่าคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric Strength)

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant) คืออัตราส่วนค่าความจุไฟฟ้าเมื่อมีฉนวน ขึ้นกลางระหว่างอิเล็กโตรดแบบระนาบ (Plate – Plate Electrode) กับเมื่อมีอากาศหรือสุญญากาศ ขึ้นกลางระหว่างอิเล็กโตรดแบบระนาบเกิดเป็นสนามไฟฟ้าภายใน (Internal Electric Field) ขึ้นซึ่งเรา อาจจะเรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ว่า “Dipole Polarization” ซึ่งปริมาณของประจุไฟฟ้า (Electric Charge) ที่สะสมอยู่ในสนามไฟฟ้าภายในนี้จะเรียกว่าค่า Capacitance ซึ่งจะมีค่ามากหรือน้อยนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่เป็นฉนวน

นอกจากนั้นเมื่อนำค่า Capacitance ของวัสดุหนึ่งๆมาหารด้วยค่า Capacitance ของอากาศ เราจะเรียกสัดส่วนดังกล่าวว่า Dielectric Constant

$$\text{Dielectric constant} = \frac{\text{Capacitance, Material as dielectric}}{\text{Capacitance, Air (or vacuum) as dielectric}} \quad (2.1)$$

หรืออาจกล่าวง่ายๆได้ว่าค่า Dielectric Constant หมายถึง ความสามารถของฉนวนในการเก็บรักษาพลังงานไฟฟ้าเอาไว้ (Electrical Energy Storage)

สำหรับค่า Dielectric Constant ของอากาศจะมีค่าเท่ากับ 1 ส่วนค่า Dielectric Constant ของพลาสติกจะมีค่าตั้งแต่ 2 ถึง 20 ขึ้นอยู่กับสภาพผิวของพลาสติกเช่นในกรณีของพอลิเอธิลีนซึ่งถือว่าเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้วเมื่อนำมาวางในสนามไฟฟ้าก็จะสามารถเกิดการกระจายตัวของอิเล็กตรอนได้เล็กน้อยและจะเกิด Polarization ได้เล็กน้อยดังนั้นค่า Dielectric Constant ของพลาสติกส่วนใหญ่จึงมากกว่า 1 เสมอซึ่งค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฉนวนแต่ละชนิดจะมีค่าไม่เท่ากันแสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฉนวนแต่ละชนิด [11]

วัสดุ	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant)
สุญญากาศ	1.0
อากาศ	1.0006
เทฟลอน	2.0
กระดาษ	2.5
เรซิน	3.0
น้ำมัน	3.0
ไม้ก้ำ	4.0
เซรามิก	6.0
แบคคาไลต์	6.0
แก้ว	7.5
ยาง	3.0
เซรามิก	5.0

ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริก (Dielectric Loss) คือการสูญเสียพลังงานในรูปความร้อนซึ่งเกิดจากการที่สารไดอิเล็กตริกอยู่ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับเมื่อวางโมเลกุลลงในสนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดการเรียงตัวตามสนามไฟฟ้า (Polarization) มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสภาพผิวของโมเลกุล



และความต่างศักย์ที่ใส่เข้าไปในสนามไฟฟ้าขณะที่โมเลกุลเกิดการเรียงตามในสนามไฟฟ้านี้จะทำให้เกิดแรงเสียดทานภายในเกิดขึ้น (Internal Friction) ระหว่างโมเลกุลและทำให้มีความร้อนเกิดขึ้นจากการเสียดสีดังกล่าวและสูญเสียออกไป

กรณีที่ใส่สนามไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไปเมื่อความถี่ของกระแสไฟสลับที่ใส่เข้าไปต่ำการสั่นหรือการเรียงตัวของโมเลกุลก็จะเกิดขึ้นช้าและความร้อนที่เกิดขึ้นก็จะมีค่าน้อยแต่ถ้าใช้ความถี่ของกระแสสลับสูงก็จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นสูงและทำให้สมบัติด้านการเป็นฉนวนและสมบัติเชิงกลของวัสดุดังกล่าวเสียไปดังนั้นพลาสติกที่จะใช้ในงานที่มีสนามไฟฟ้าความถี่สูงจึงควรมีค่า Dielectric Loss ต่ำที่สุด

การทดสอบค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริก (Dielectric Loss) จะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D150 [8] โดยการนำเอาวัสดุทดสอบขนาด 100 x 100 x 2 mm มาทดสอบความจุไฟฟ้าในวัสดุ เทียบกับสูญญากาศและค่าพลังงานที่สูญเสียไปในวัสดุที่ความถี่ 1 MHz โดยใช้เครื่อง Impedance Gain-Phase Analyzer HP 4294A ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 Impedance Gain-Phase Analyzer HP 4294A [15]

การทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric Strength) [7]

ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าหมายถึงค่าความต่างศักย์สูงสุดที่วัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้าจะสามารถทนได้ก่อนที่จะเกิดการเสียหาย (Failure) ดังนั้นค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า จึงมีหน่วยเป็น V/mm (ความหนา) โดยเมื่อวัสดุที่เป็นฉนวนได้รับกระแสไฟฟ้าจะเกิดการหลุดร่ว (Leakage) ของกระแสไฟฟ้าอันเนื่องมาจาก Defects ต่างๆที่อยู่ในวัสดุซึ่ง Leakage ในลักษณะดังกล่าวจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นในวัสดุทำให้มีกระแสไฟฟ้าผ่านได้มากขึ้นและส่งผลย้อนกลับทำให้ความร้อนยิ่งสูงขึ้นไปอีกและทำให้วัสดุเกิด Failure ในที่สุดดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า ก็คือ Strength ของวัสดุฉนวนในการใช้งานทางไฟฟ้าและยิ่งวัสดุที่มีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงก็จะเป็นฉนวนที่มีคุณภาพดี

การวัดค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของวัสดุสามารถทำได้หลายวิธี วิธีแรกเรียกว่า Short-Times Method โดยจะมีชิ้นงานที่มีความหนาที่ต้องการถูกประกบด้วยอิเล็กโทรดทั้ง 2 ด้าน โดยในการทดสอบจะทำการเพิ่มความต่างศักย์ ให้กับชิ้นงานที่อัตราคงที่ (โดยใช้ตัวแปลงไฟ) เริ่มจาก 0 V ไปจนกระทั่งชิ้นงานแตกหรือเจาะทะลุ โดยที่อัตราการเพิ่มของศักย์ไฟฟ้าอาจจะเป็น 100, 500, 1000 หรือ 3000 V/sec โดยจุดที่ชิ้นงานแตกหรือเกิด Failure จะสังเกตได้จากการเกิดนิกขาด (Rupture) หรือการสูญเสียของค้ประกอบของชิ้นงาน

วิธีที่ 2 ในการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าคือ Slow-Rate-of-Rise Method โดยวิธีนี้จะให้ศักย์ไฟฟ้าในช่วงแรกประมาณ 50% ของ Breakdown Voltage ที่วัดไว้แล้วจาก Short Time Test จากนั้นจะทำการเพิ่ม Voltage ขึ้นไปที่อัตราคงที่จนกระทั่งชิ้นงานพังหรือแตกหัก

วิธีสุดท้ายคือ Step-by-Step จะเป็นการผ่านศักย์ไฟฟ้าในช่วงแรกประมาณ 50% ของ Breakdown Voltage จากนั้นจึงเพิ่ม Voltage ในสัดส่วนที่เท่ากัน (Equal Increment) แล้วรักษาระดับศักย์ไฟฟ้านั้นไว้จนกระทั่งชิ้นงานพังหรือแตกหัก โดยเมื่อเปรียบเทียบทั้ง 3 วิธีแล้วจะถือว่า Step-by-Step Method เป็นวิธีการที่สอดคล้องกับสภาพการใช้งานจริงมากที่สุด

โดยค่า Dielectric Strength (V/mm) สามารถคำนวณได้จากสมการด้านล่าง

$$\text{Dielectric strength} = \frac{\text{Breakdown voltage (V)}}{\text{Thickness (mm)}} \quad (2.2)$$

## 2.11 การทดสอบเฉพาะแบบพิวส์สวิตช์แรงต่ำตามมาตรฐาน IEC [3]

การทดสอบเฉพาะแบบมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบพิวส์สวิตช์แรงต่ำที่ออกแบบมานั้นมีคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดหรือไม่ การทดสอบดังกล่าวจะทดสอบกับพิวส์สวิตช์แรงต่ำต้นแบบชุดแรกๆ เท่านั้น ตามมาตรฐาน IEC 60947-3 มีลำดับการทดสอบ 5 ลำดับ แต่สำหรับพิวส์สวิตช์แรงต่ำจะทดสอบ 4 ลำดับ และมีการทดสอบเฉพาะแบบ 8 การทดสอบดังต่อไปนี้

### ตารางที่ 2.6 ลำดับการทดสอบเฉพาะแบบพิวส์สวิตช์แรงต่ำ [3,14]

การทดสอบลำดับที่ 1 คุณลักษณะสมรรถนะทั่วไป (General Performance Characteristics)			
ลำดับย่อย	หัวข้อ	การทดสอบ	ตัวอย่างการทดสอบ
1.1	2.11.1	การทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น	A, B, C, E
1.2	2.11.3	การทดสอบสมบัติทางไดอิเล็กตริก	A, C, E
1.3	2.11.5	การทดสอบวิสัยสามารถต่อและการตัดวงจร	A, D
1.4	2.11.4	การทวนสอบไดอิเล็กตริก	A, D
1.5	2.11.2	การทวนสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น	A, D
การทดสอบลำดับที่ 2 สมรรถนะความสามารถในการทำงาน (Operational Performance Capability)			
ลำดับย่อย	หัวข้อ	การทดสอบ	ตัวอย่างการทดสอบ
2.1	2.11.6	การทดสอบสมรรถนะการทำงาน	A, B
2.2	2.11.4	การทวนสอบไดอิเล็กตริก	A, B
2.3	2.11.2	การทวนสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น	A, B
การทดสอบลำดับที่ 3 สมรรถนะความสามารถภาวะกระแสลัดวงจร			
ลำดับย่อย	หัวข้อ	การทดสอบ	ตัวอย่างการทดสอบ
		สำหรับพิวส์สวิตช์แรงต่ำไม่ทำการทดสอบ	
การทดสอบลำดับที่ 4 การทดสอบการทนต่อสถานะกระแสลัดวงจร (Conditional Short-Circuit Current)			
ลำดับย่อย	หัวข้อ	การทดสอบ	ตัวอย่างการทดสอบ
4.1	2.11.7	การทดสอบการทนต่อภาวะแสลัดวงจร	A, B
4.2	2.11.4	การทวนสอบไดอิเล็กตริก	A, B
4.3	2.11.2	การทวนสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น	A, B

**ตารางที่ 2.6** ลำดับการทดสอบเฉพาะแบบฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ [3,14] (ต่อ)

การทดสอบลำดับที่ 5 สมรรถนะความสามารถภาวะโหลดเกิน (Overload Performance Capability)			
ลำดับย่อย	หัวข้อ	การทดสอบ	ตัวอย่างการทดสอบ
5.1	2.11.8	การทดสอบโหลดเกิน (Overload Test)	A
5.2	2.11.4	การทดสอบไดอิเล็กตริก	A
5.3	2.11.2	การทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น	A

**2.11.1 การทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (Temperature Rise Test)**

การทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น คือ การวัดอุณหภูมิของชิ้นส่วนต่างๆของฟิวส์แรงต่ำในขณะที่ทำงานรองรับกระแสที่กักเปรียบเทียบกับอุณหภูมิอากาศโดยรอบ โดยอุณหภูมิของชิ้นส่วนต่างๆ ที่เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิอากาศโดยรอบต้องไม่เกินค่าที่กำหนดตามมาตรฐาน

**1. อุณหภูมิของอากาศโดยรอบ**

อุณหภูมิของอากาศโดยรอบให้วัดในคาบเวลา 1 ใน 4 คาบสุดท้ายของช่วงเวลาทดสอบ โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์หรือเทอร์โมคัปเปิลไม่น้อยกว่า 2 ตัว วัดในจุดที่สมมาตรกันรอบฟิวส์สวิตช์แรงต่ำที่มีความสูงประมาณครึ่งหนึ่งของความสูงฟิวส์สวิตช์และห่างจากฟิวส์สวิตช์ 1 m ระหว่างการทดสอบอุณหภูมิของอากาศโดยรอบจะต้องอยู่ระหว่าง +10 °C ถึง +40 °C และมีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 10 °C

**2. การวัดอุณหภูมิของชิ้นส่วน**

การวัดอุณหภูมิของชิ้นส่วนให้วัดอุณหภูมิ ณ จุดที่อุณหภูมิสูงที่สุดโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิดลวดละเอียดหรือวิธีการอื่นที่เทียบเท่าและต้องแน่ใจว่ามีการนำความร้อนที่ดีระหว่างเทอร์โมคัปเปิลกับพื้นผิวชิ้นส่วนที่ทดสอบระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบต้องเพียงพอให้อุณหภูมิถึงค่าคงที่ โดยในทางปฏิบัติอุณหภูมิจะถึงค่าคงที่เมื่อความเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 1 °C ต่อชั่วโมง

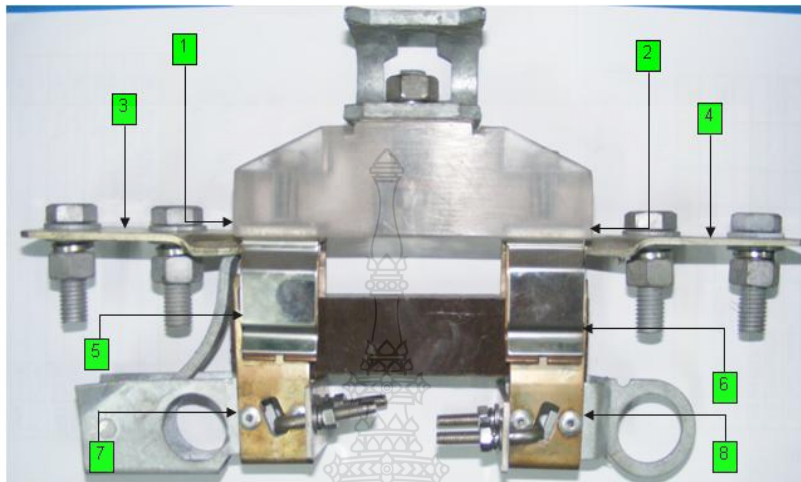
**3. อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของชิ้นส่วน**

อุณหภูมิของชิ้นส่วน คือ ผลต่างระหว่างอุณหภูมิชิ้นส่วนที่วัดได้ตามข้อ 2 กับอุณหภูมิอากาศโดยรอบที่วัดได้ตามข้อที่ 1

**4. วิธีทดสอบ**

ป้อนกระแสไฟฟ้าเท่ากับกระแสไฟฟ้าทำงานที่กำหนด (Rated Operational Currents, Ie) สำหรับฟิวส์สวิตช์แรงต่ำกระแสไฟฟ้าทำงานที่กำหนดสูงสุดเท่ากับ 400 A 50 Hz ผ่านฟิวส์สวิตช์แรงต่ำใช้สายตัวนำขนาด 240 mm<sup>2</sup> ความยาวสายจากขั้วต่อสายแหล่งจ่ายถึงขั้วต่อสายฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ

ไม่น้อยกว่า 2 m และเป็นเวลาที่เพียงพอให้ที่อุณหภูมิถึงค่าคงที่ เมื่อสิ้นสุดการทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของชิ้นส่วนต้องไม่เกินค่าที่กำหนดในตารางที่ 2.7 และ 2.8



รูปที่ 2.15 จุดที่ทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2.7 ขีดจำกัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของขั้วต่อสาย [3]

วัสดุขั้วต่อสาย	ขีดจำกัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (°C)
ทองแดงเปลือย	60
ทองเหลืองเปลือย	65
ทองแดงหรือทองเหลืองชุบด้วยดีบุก	65
ทองแดงหรือทองเหลืองชุบด้วยเงินหรือชุบด้วยนิกเกิล	70
โลหะอื่น ๆ	65

#### 2.11.2 การทวนสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (Temperature Rise Verification)

การทวนสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น คือ การนำชิ้นส่วนมาทำการทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และนำชิ้นส่วนชุดเดิมไปทดสอบการทดสอบเฉพาะแบบในหัวข้ออื่นๆ จากนั้นนำชิ้นส่วนชุดเดิมมาทำการทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอีกครั้ง ขั้วต่อสายและชิ้นส่วนที่สามารถเข้าถึงได้จะต้องมีค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นไม่เกินขีดจำกัดที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2.8

**ตารางที่ 2.8** จีดจำกัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของขั้วต่อสายและชิ้นส่วนที่สามารถเข้าถึงได้ [3]

ลักษณะของชิ้นส่วน	จีดจำกัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (°C)
ขั้วต่อสายสำหรับต่อใช้งานภายนอก	80
ส่วนปฏิบัติโดยใช้มือ	
- ทำด้วยโลหะ	25
- ทำด้วยฉนวน	35
ชิ้นส่วนที่มีวัตถุประสงค์ที่จะสัมผัสแต่ไม่ใช้มือจับ	
- ทำด้วยโลหะ	40
- ทำด้วยฉนวน	50
ชิ้นส่วนที่ไม่จำเป็นต้องสัมผัสขณะใช้งานปกติ	
- ทำด้วยโลหะ	50
- ทำด้วยฉนวน	60

### 2.11.3 การทดสอบสมบัติทางไดอิเล็กตริก (Dielectric Properties)

#### 1. การทดสอบความทนต่อแรงดันอิมพัลส์

การทดสอบความทนต่อแรงดันอิมพัลส์คือ การทดสอบความทนทานของฉนวน ไฟฟ้าสถิตส์แรงต่ำแรงดันเกินเสิร์จฟ้าผ่า (Lightning Surge) การทดสอบนั้นจะทำการป้อนแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50  $\mu$ s จำนวน 5 ครั้ง สำหรับแต่ละตำแหน่งการป้อนห่างกันไม่น้อยกว่า 1 วินาที ที่ระดับแรงดันอิมพัลส์ 14.8 kV สำหรับตำแหน่งการป้อนแรงดันอิมพัลส์ระหว่างจุด A กับจุด B, จุด A กับจุด C และจุด B กับจุด C โดยมีสภาวะในระหว่างการทดสอบต้องเป็นไปตามข้อกำหนดตาม ตารางที่ 2.9

**ตารางที่ 2.9** สภาวะระหว่างการทดสอบสมบัติทางไดอิเล็กตริก

สภาวะการทดสอบ	ค่าที่กำหนด
1. อุณหภูมิ	15°C - 35°C
2. ความดันบรรยากาศ	86kPa – 106 kPa
3. ความชื้น	25% - 75%

ระหว่างการทดสอบหรือหลังการทดสอบต้องไม่เกิดการปล่อยประจุทำลายที่ทำให้ฉนวนของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำในตำแหน่งที่ทดสอบได้รับความเสียหาย ผิดพร่องใดๆ เช่น การเกิดประกายข้าม (Sparkover) วาบไฟตามผิว (Flashover) เจาะทะลุ (Puncture)

## 2. การทดสอบความทนทานต่อแรงดันเกินของฉนวนแข็ง

การทดสอบความทนทานต่อแรงเกินของฉนวนแข็ง คือ การทดสอบความสามารถในการทนทานต่อแรงดันเกินชั่วคราวของฉนวนแข็ง โดยการทดสอบจะป้อนแรงดันไฟฟ้าทดสอบที่ 2200 Vrms เป็นเวลา 5 วินาที แรงดันไฟฟ้าทดสอบต้องมีรูปคลื่นใกล้เคียงไซน์ซอไซด์และมีความถี่ระหว่าง 45 Hz ถึง 65 Hz หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่ใช้ทดสอบต้องสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าลัดวงจรไม่น้อยกว่า 200 มิลลิแอมแปร์ อุปกรณ์ทริปกระแสเกินของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงต้องไม่ทำงานเมื่อกระแสไฟฟ้าของวงจรด้านออกมีค่าน้อยกว่า 100 มิลลิแอมแปร์ ตำแหน่งป้อนแรงดันไฟฟ้าทดสอบในระหว่างการทดสอบต้องไม่เกิดการwabไฟตามผิว (Flashover) การเกิดเบรกคาว์นของฉนวนภายใน เช่น การเจาะทะลุ (Puncture) หรือภายนอก เช่น เบรกคาว์นเนื่องจากร่องรอยนำไฟฟ้าที่ผิว (Tracking)

### 2.11.4 การทดสอบไดอิเล็กตริก (Dielectric Verification)

การทดสอบไดอิเล็กตริก คือ การทดสอบความสามารถในการทนทานต่อแรงดันเกินชั่วคราวของฉนวนแข็งซ้ำอีกครั้งหลังผ่านการทดสอบเฉพาะแบบในบางหัวข้อ โดยมีเงื่อนไขการทดสอบเช่นเดียวกับการทดสอบทนทานต่อแรงดันเกินของฉนวนแข็งทุกประการ แต่จะลดระดับแรงดันเหลือเพียง 1000 Vrms

### 2.11.5 การทดสอบวิสัยความสามารถต่อและการตัดวงจร (Making and Breaking Capacities)

การทดสอบวิสัยความสามารถต่อและการตัดวงจร คือ การทดสอบความสามารถต่อวงจรมานำกระแสและตัดวงจรหยุดการไหลกระแสของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำภายใต้ต้องค้ประกอบไฟฟ้ากระแสและภาวะการใช้งานที่กำหนด

การทดสอบใช้วงจรทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.16 ป้อนแรงดันให้ฟิวส์สวิตช์แรงต่ำที่ระดับแรงดัน 525 V ปรับให้มีกระแสไหลผ่านฟิวส์สวิตช์ที่ 600 A ควบคุมค่าตัวประกอบกำลังที่ 0.95 Lagging แล้วทำการต่อวงจรโดยการปิดหน้าสัมผัสฟิวส์สวิตช์แรงต่ำระยะเวลาเปิดหน้าสัมผัสจะใช้เวลาไม่เกิน  $30 \pm 10$  วินาที แล้วทำการตัดวงจรโดยการเปิดหน้าสัมผัสการดำเนินการดังกล่าวนับเป็น 1 วัฏจักร ดำเนินการทดสอบแต่ละวัฏจักรนั้นต้องรักษาแรงดันฟ้าพื้นตัวเป็นเวลา 0.05 วินาที สำหรับฟิวส์สวิตช์แรงต่ำอาจจะถูกเปลี่ยนไปใช้เป็นตัวนำทองแดงที่มีขนาดเหมาะสม

#### 2.11.6 การทดสอบสมรรถนะการทำงาน (Operational Performance)

การทดสอบสมรรถนะการทำงาน คือ การทดสอบความทนทานในการทำงานทางกลและทางไฟฟ้าของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำหลังจากการต่อและตัดวงจรในภาวะที่กระแสไหลและไม่มีกระแสไหลครบวัฏจักรที่กำหนดโดยจำนวนวัฏจักรที่ทดสอบกำหนดจากกระแสไฟฟ้าทำงานที่กำหนดและประเภทของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำการทดสอบจะใช้วงจรทดสอบเดียวกันกับการทดสอบวิสัยความสามารถต่อและการตัดวงจร แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วนทำการทดสอบตามลำดับดังนี้

1. การต่อและการตัดวงจรในภาวะที่มีกระแสไหล การทดสอบจะป้อนแรงดันให้ฟิวส์สวิตช์แรงต่ำพิกัดไฟฟ้าทำงานที่กำหนด 500 V ปรับให้มีกระแสไหลผ่านฟิวส์สวิตช์ที่ 400 A ควบคุมค่าตัวประกอบกำลังที่ 0.8 Lagging แล้วทำการต่อวงจรโดยการปิดหน้าสัมผัสฟิวส์สวิตช์แรงต่ำแล้วทำการตัดวงจรโดยการเปิดหน้าสัมผัสการดำเนินการดังกล่าวนับเป็น 1 วัฏจักร ความเร็วในการทดสอบ 60 วัฏจักร/1 ชั่วโมง ดำเนินการทดสอบจำนวน 800 วัฏจักร

2. การต่อและการตัดวงจรในภาวะที่ไม่มีกระแสไหล การทดสอบจะทำการต่อวงจรโดยการปิดหน้าสัมผัสฟิวส์สวิตช์แรงต่ำแล้วทำการตัดวงจรโดยการเปิดหน้าสัมผัส ไม่มีการจ่ายกระแสผ่านหน้าสัมผัสฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ ความเร็วในการทดสอบ 60 วัฏจักร /1 ชั่วโมง ดำเนินการทดสอบจำนวน 200 วัฏจักร

ในระหว่างการทดสอบสมรรถนะการทำงานทั้ง 2 ส่วนฟิวส์สวิตช์แรงต่ำต้องไม่เกิดอาร์คถาวร การวาวไฟตามผิวระหว่างขั้วและระหว่างขั้วกับโคลงรวมถึงก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ดำเนินการทดสอบและความเสียหายต่ออุปกรณ์ต่อพ่วงต่างๆ หลังจากการทดสอบเสร็จสิ้นฟิวส์สวิตช์แรงต่ำจะต้องยังคงปิดและเปิดหน้าสัมผัสได้ตามปกติ

#### 2.11.7 การทดสอบการทนต่อภาวะกระแสลัดวงจร (Conditional Short Circuit Current)

การทดสอบการทนต่อภาวะกระแสลัดวงจร คือ การทดสอบความสามารถต่อวงจรและความทนทานของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำในภาวะลัดวงจร เมื่อเกิดแรงทางกลและความร้อนจากกระแสลัดวงจร การทดสอบจะใช้วงจรทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.17 ป้อนแรงดัน 525 V 50 Hz จ่ายกระแสลัดวงจรที่ 50 kA ผ่านฟิวส์สวิตช์แรงต่ำโดยใช้ฟิวส์แรงต่ำพิกัดกระแสและพิกัดการลัดวงจรสูงสุดที่ฟิวส์สวิตช์แรงต่ำสามารถรองรับได้ การทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนทำการทดสอบตามลำดับดังนี้

1. การทดสอบความทนต่อกระแสลัดวงจร คือ การต่อหน้าสัมผัสฟิวส์สวิตช์แรงต่ำแล้วจ่ายกระแสลัดวงจรผ่านหน้าสัมผัสฟิวส์สวิตช์แรงต่ำจนกระทั่งฟิวส์แรงต่ำขาดตัดวงจรระหว่างด้านแหล่งจ่ายและด้านโหลดออกจากกัน

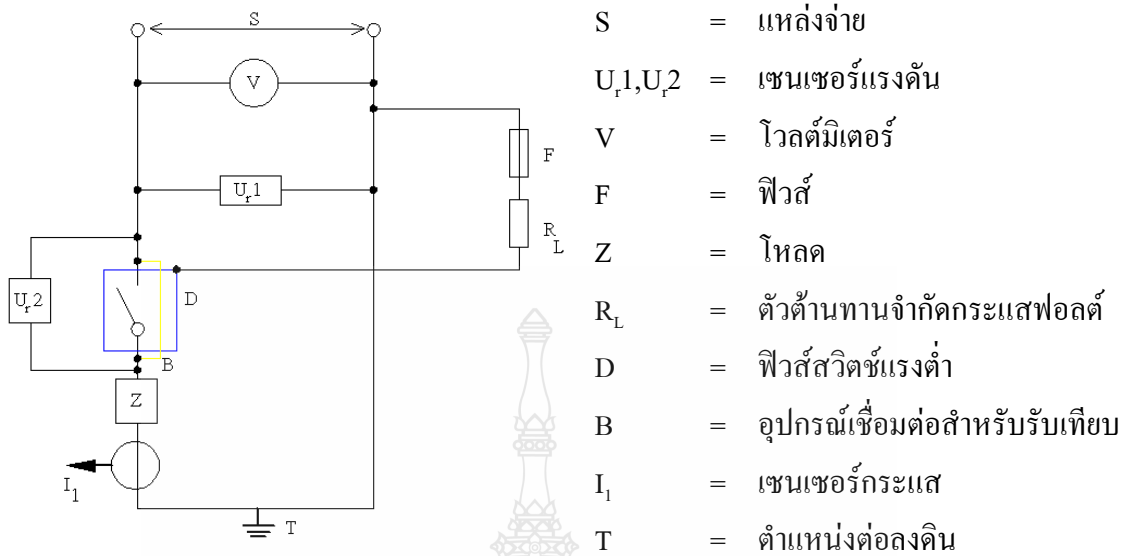


2. การทดสอบต่อวงจรในขณะที่มีกระแสลัดวงจร คือ หลังจากการทดสอบความทนทานต่อกระแสลัดวงจรให้เปลี่ยนฟิวส์แรงต่ำแทนที่ตัวที่ขาดแล้วต่อหน้าสัมผัส ฟิวส์สวิตช์แรงต่ำปิดวงจรในขณะที่มีกระแสลัดวงจรไหลอยู่

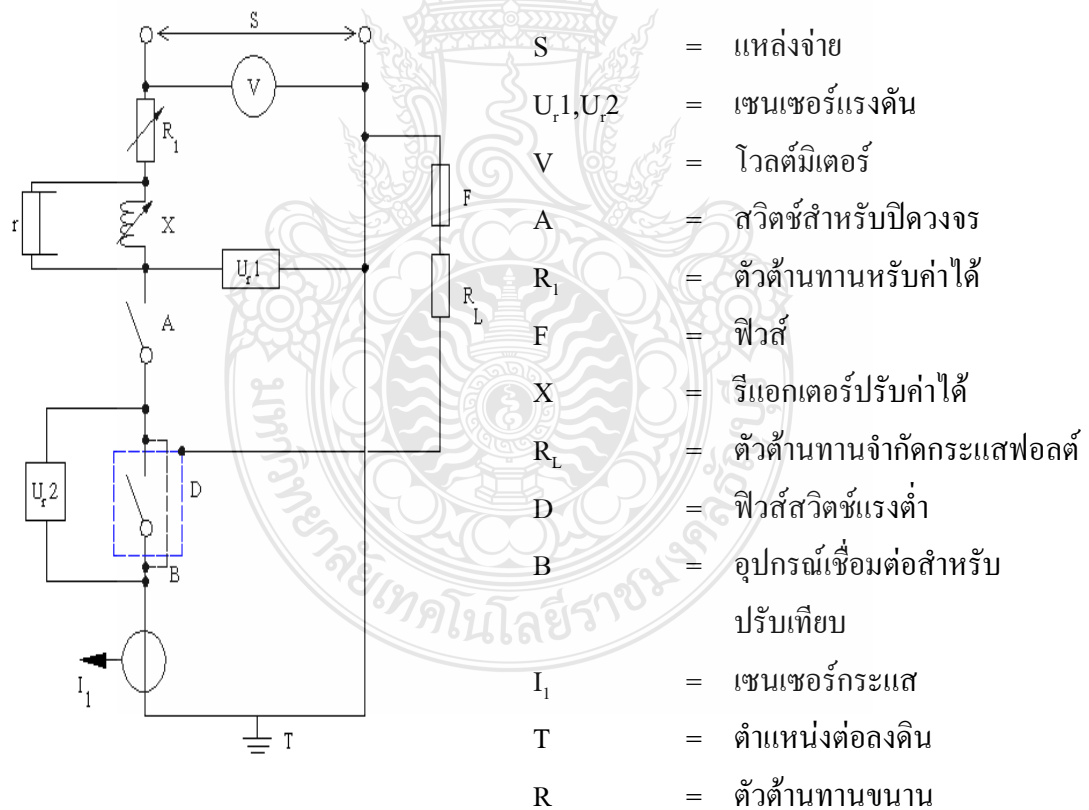
ในระหว่างการทดสอบสมรรถนะการทำงานทั้ง 2 ส่วนฟิวส์สวิตช์แรงต่ำต้องไม่เกิดอาร์คถาวร การวาวไฟตามผิวระหว่างขั้วและระหว่างขั้วกับโคลงรวมถึงก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ดำเนินการทดสอบและความเสียหายต่ออุปกรณ์ต่อพ่วงต่างๆ หลังจากการทดสอบเสร็จสิ้นฟิวส์สวิตช์แรงต่ำต้องยังคงปิดและเปิดหน้าสัมผัสได้ตามปกติ

#### 2.11.8 การทดสอบโหลดเกิน (Overload Test)

การทดสอบโหลดเกิน คือ การทดสอบฟิวส์สวิตช์แรงต่ำว่ามีความสามารถรองรับกระแสเกินกว่าพิกัดใช้งานที่กำหนดเป็นระยะเวลาหนึ่งโดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ ก่อนการทดสอบต้องปรับอุณหภูมิของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำให้มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง การทดสอบจะจ่ายกระแสผ่านฟิวส์สวิตช์แรงต่ำที่ 640 A เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง หรือจนกว่าจะเกิดการระเบิดของฟิวส์แรงต่ำ หลังจากทดสอบครบ 1 ชั่วโมงหรือฟิวส์สวิตช์แรงต่ำเกิดการระเบิด ภายใน 3-5 นาที หลังจากนั้นให้ทำการปิดและเปิดหน้าสัมผัสฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ ฟิวส์สวิตช์แรงต่ำจะต้องสามารถปิดและเปิดหน้าสัมผัสได้ตามปกติ ไม่เกิดการขัดข้องในการปิดและเปิดหน้าสัมผัสแต่อย่างใดสำหรับการทดสอบเฉพาะแบบฟิวส์สวิตช์แรงต่ำทั้ง 8 หัวข้อนั้นมีลำดับการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60947-3 และตัวอย่างทดสอบดังตารางที่ 2.6



รูปที่ 2.16 วงจรทดสอบวิสัยความสามารถต่อและการตัดวงจรและการทดสอบสมรรถนะการทำงาน



รูปที่ 2.17 วงจรทดสอบการทนต่อภาวะกระแสลัดวงจร

## 2.12 สรุปผลทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับบทนี้เป็นการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับฉนวนฟิวส์สวิตช์แรงต่ำทฤษฎีเกี่ยวกับชนิดของพลาสติกและคุณสมบัติของฉนวนไฟฟ้า รายละเอียดเรซินและอุปกรณ์สำหรับการทดสอบทางกายภาพและทางไฟฟ้าจากข้อมูลทั้งหมดที่นำเสนอในบทนี้สามารถนำมาใช้สำหรับการออกแบบการทดสอบสำหรับฉนวนฟิวส์สวิตช์แรงต่ำในบทถัดไป

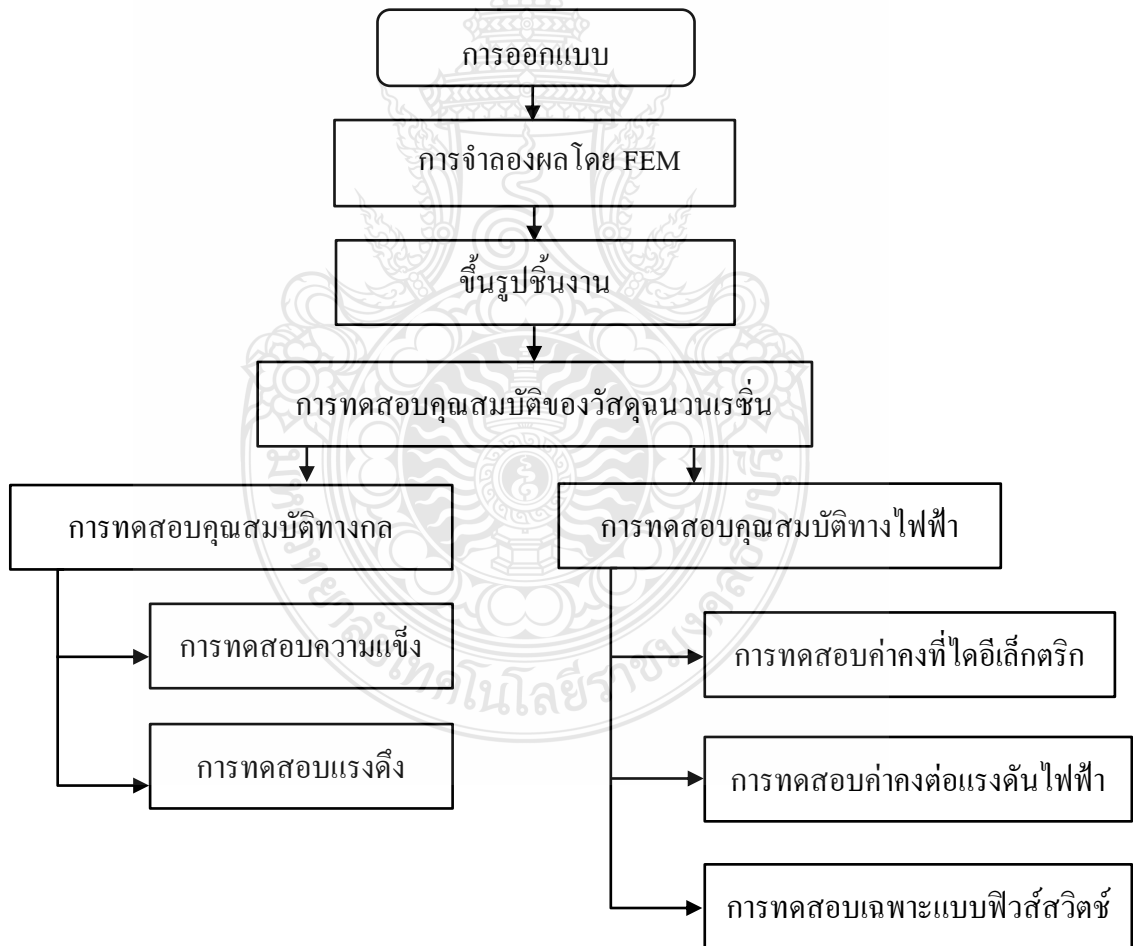


# บทที่ 3

## วิธีดำเนินงานวิจัย

### 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

ในส่วนของการดำเนินงานวิจัย ผู้จัดทำได้แบ่งขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้ ขั้นตอนแรก คือ การออกแบบแม่พิมพ์สำหรับฉนวนพิวส์สวิตช์แรงต่ำ ส่วนที่สองคือ การจำลองสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ส่วนที่สามคือการสร้างต้นแบบฉนวนเรซิน และ ส่วนที่สี่คือการทดสอบคุณสมบัติของฉนวนเรซิน ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการกำหนดขนาดรูปร่างและลักษณะของฉนวนพิวส์สวิตช์แรงต่ำด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งมีขนาดและรูปร่างต่างๆ โดยการออกแบบดังกล่าวอ้างอิงขนาดมาตรฐานตามข้อกำหนด และมาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

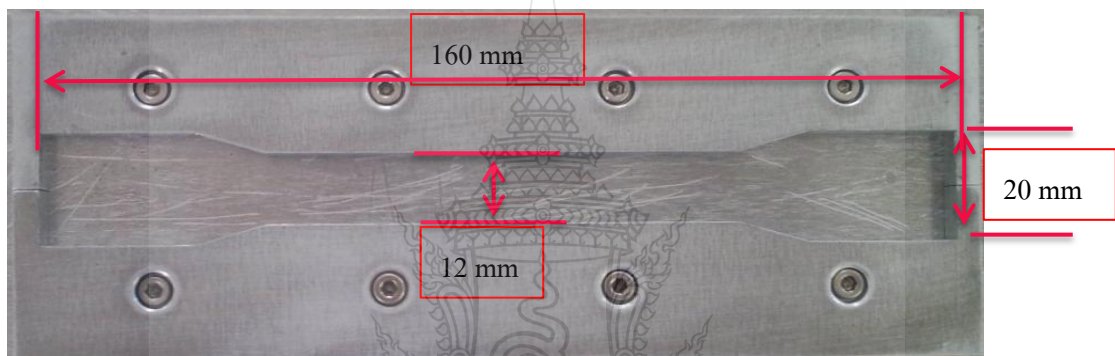


รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

### 3.2 การออกแบบแม่พิมพ์สำหรับฉนวนพิวส์สวิตช์แรงต่ำ

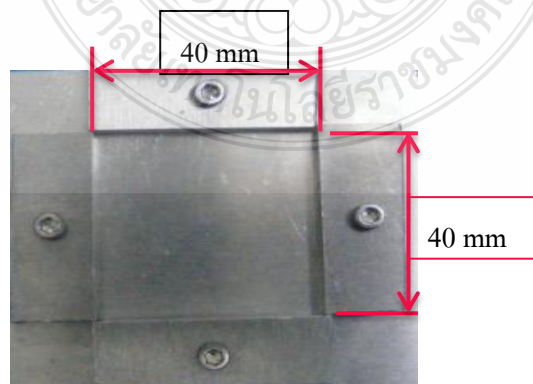
การออกแบบแม่พิมพ์ฉนวนพิวส์สวิตช์แรงต่ำได้ดำเนินการโดยใช้โปรแกรม AutoCAD ช่วยในด้านการออกแบบชิ้นงาน เพื่อนำไปใช้ในการทดสอบคุณสมบัติทางกลและทางไฟฟ้า ซึ่งมีรายละเอียดการออกแบบดังต่อไปนี้

3.2.1 การออกแบบแม่พิมพ์สำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางกล คือการทดสอบแรงดึงซึ่งถือได้ว่าเป็นการทดสอบพื้นฐานสำหรับวัสดุและได้รับการทำให้เป็นมาตรฐานอย่างสมบูรณ์ของวัสดุ และแม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อทดสอบแรงดึงจะมีรูปทรงครีมเบล ขนาด 160 x 20 x 5 mm ตามรูปที่ 3.2



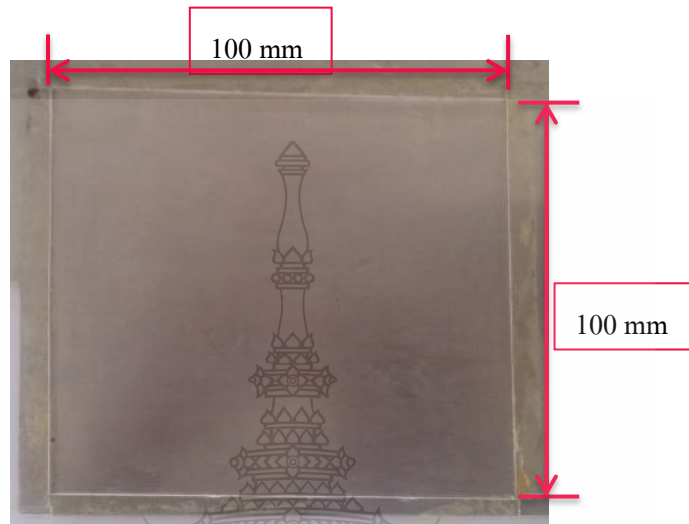
รูปที่ 3.2 แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปเรซินแบบทรงครีมเบลเพื่อทดสอบแรงดึงของวัสดุ

3.2.2 การออกแบบแม่พิมพ์สำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางกลอีกอย่าง คือการทดสอบความแข็ง ซึ่งถือได้ว่าเป็นการทดสอบพื้นฐานเหมือนกันสำหรับวัสดุ และแม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อทดสอบการทดสอบความแข็งจะมีรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด 40 x 40 x 5 mm ตามรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปเรซินแบบทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสเพื่อทดสอบความแข็งของวัสดุ

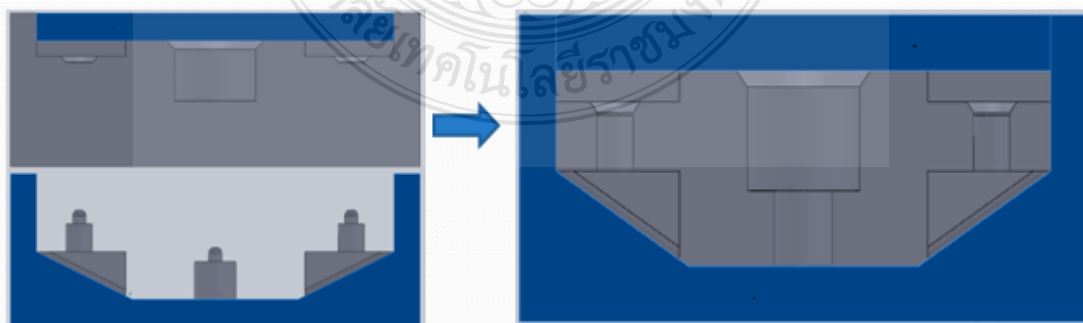
3.2.3 การออกแบบแม่พิมพ์สำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งมีการทดสอบเกี่ยวกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant) ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริก และค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า โดยมีรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด 100 x 100 x 2 mm ตามรูปที่ 3.4



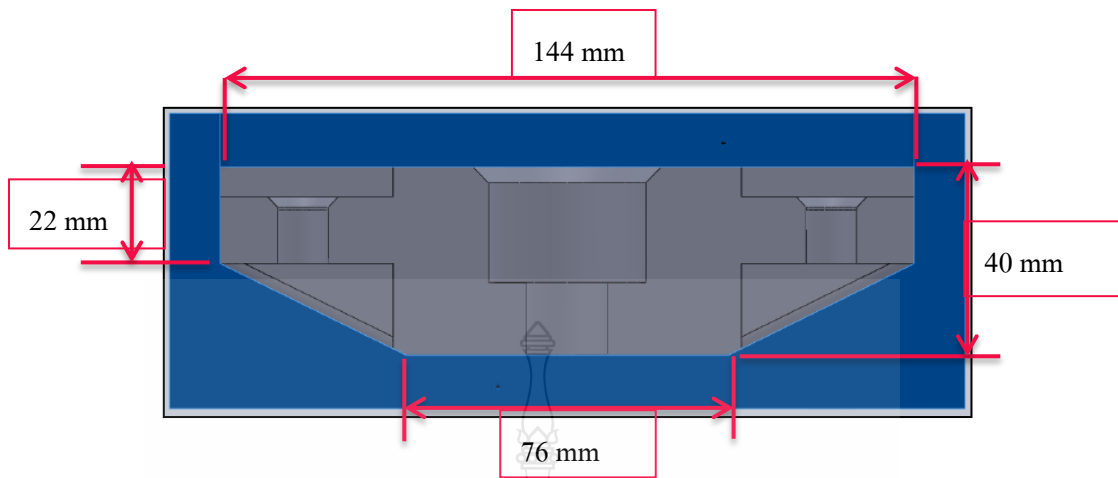
รูปที่ 3.4 แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปเรซิน รูปทรงสี่เหลี่ยมเพื่อทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า

### 3.2.4 การออกแบบแม่พิมพ์สำหรับฉนวนพิวส์สวิตช์แรงต่ำ

ในด้านการออกแบบ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาขนาดและรูปแบบฉนวนพิวส์สวิตช์แรงต่ำของตัวต้นฉบับจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและการไฟฟ้านครหลวง จากนั้นได้กำหนดค่าและขนาดรูปร่างลักษณะของฉนวนพิวส์สวิตช์แรงต่ำด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งมีขนาดและรูปร่างดังรูปที่ 3.5 โดยการออกแบบดังกล่าวอ้างอิงขนาดมาตรฐานตามข้อกำหนด IEC และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค



(ก) ออกแบบแม่พิมพ์สำหรับฉนวนพิวส์สวิตช์แรงต่ำโดยใช้โปรแกรม AutoCAD



(ข) กำหนดขนาดของการออกแบบแม่พิมพ์



(ค) การขึ้นรูปแม่พิมพ์ตามที่ออกแบบ

### รูปที่ 3.5 ฐานของแม่พิมพ์สำหรับฉนวนไฟสวิตช์แรงต่ำ

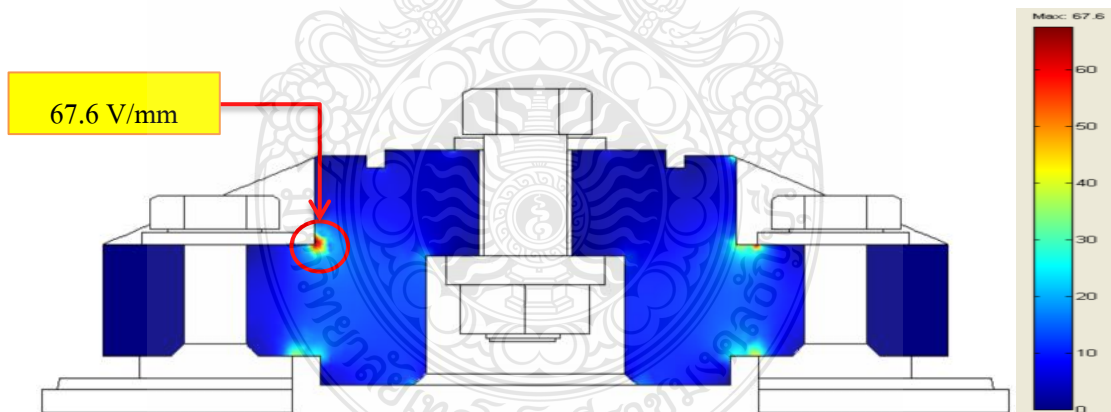
#### 3.3 การจำลองสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมวิเคราะห์อุปกรณ์เชิงตัวเลข

โปรแกรมวิเคราะห์อุปกรณ์เชิงตัวเลขหรือไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อใช้คำนวณหาผลเฉลยโดยประมาณของปัญหาโดยการแบ่งรูปร่างขอบเขตของปัญหาออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ ที่เรียกว่าเอลิเมนต์ แล้วสร้างสมการของแต่ละเอลิเมนต์ให้สอดคล้อง เอลิเมนต์ต่างๆ เหล่านี้เชื่อมต่อกันที่จุดต่อต่างๆ ของโครงสร้าง ซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะคำนวณค่าของตัวแปรตามที่

ต้องการ จุดเด่นของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คือ สามารถจำลองรูปร่างของวัตถุต่างๆ ได้ใกล้เคียงกับวัตถุจริง ดังนั้นค่าผลเฉลยโดยประมาณที่คำนวณออกมาได้จึงมีความแม่นยำมากขึ้น

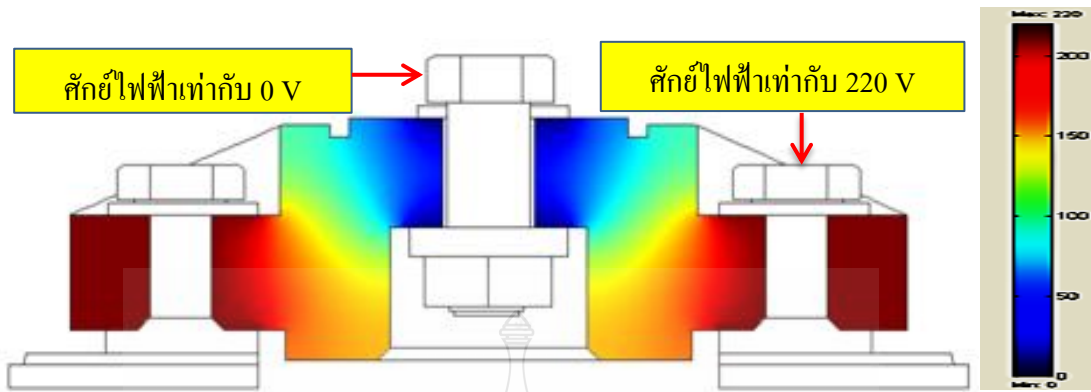
แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าที่กระจายตัวในเนื้อฉนวนของฟิวส์สวิทช์แรงต่ำแสดงดังรูปที่ 3.6 - 3.8 แสดงการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ บริเวณที่เป็นฉนวนเรซินจะถูกแบ่งเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยมที่ใช้ในการคำนวณเท่ากับ 14,692 เอลิเมนต์ และจำนวนโหนดทั้งหมดเท่ากับ 7,514 โหนด โดยกำหนดค่าการจำลองต่างๆ ดังต่อไปนี้ [1]

- ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของเรซินเท่ากับ 3.0
- ขอบเขตการวิเคราะห์เป็นฉนวนอากาศและมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 1.0
- แบบจำลองจะละเอียดในส่วนที่เป็นฟิวส์ (High Rupture Capacity Fuses) และขั้วต่อสายไฟฟ้าที่ปลายทั้งสอง
- บริเวณที่เป็นฉนวนและตัวนำกำหนดให้ไม่มีประจุค้าง (Space Charge) และฉนวนเรซินเป็นฉนวนสมบูรณ์แบบ (Perfect Dielectric) ซึ่งไม่มีค่าความนำไฟฟ้า
- การคำนวณกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับ (Tolerance) เท่ากับ  $1 \times 10^{-6}$
- ป้อนศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วของฉนวนเท่ากับ 220 V

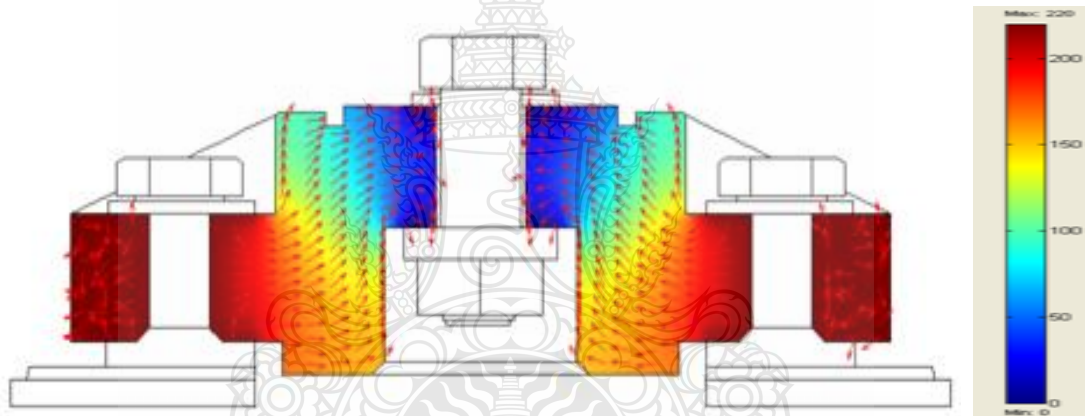


รูปที่ 3.6 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในเนื้อฉนวนเรซิน





รูปที่ 3.7 การจำลองการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าภายในเนื้อฉนวนเรซิน



รูปที่ 3.8 การจำลองการเดินทางของศักย์ไฟฟ้าภายในเนื้อฉนวนเรซิน

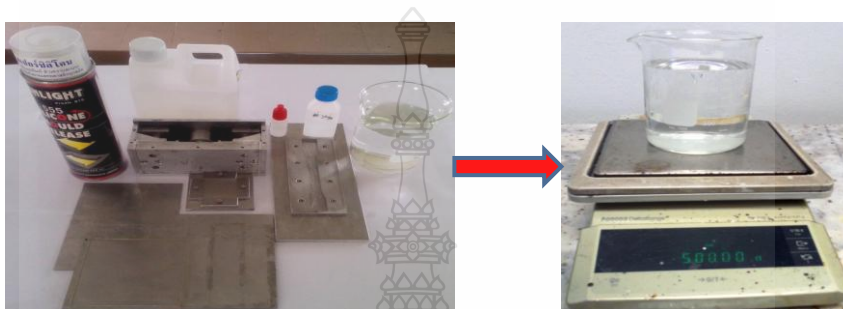
จากการวิเคราะห์ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 3.6 จะทำให้รู้ว่าจุดที่เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ จุดที่มีการเชื่อมต่อกับสายป้อน ซึ่งมีค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ  $67.6 \text{ V/mm}$  ดังนั้นเมื่อเทียบกับสนามไฟฟ้าสูงสุดของฉนวนเรซินแล้ว จึงไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อฉนวนเรซิน และรูปที่ 3.7 คือการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าภายในเนื้อฉนวนเรซินและรูปที่ 3.8 คือทิศทางของศักย์ไฟฟ้าภายในเนื้อฉนวนเรซิน ตามลำดับ

### 3.4 ขั้นตอนการสร้างวัสดุฉนวนเรซิน

การผสมเรซินมักเกิดปัญหาบ่อยๆ เช่น เกิดฟองอากาศมาก เรซินไม่แข็ง แข็งเร็วเกินไป แข็งจนเปราะ การผสมที่ถูกต้องมีขั้นตอนดังนี้

### 3.4.1 การเตรียมเรซิน

ในกรณีที่เป็นเรซินที่ยังไม่ได้ผสมตัวม่วง (ตัวช่วยเร่งปฏิกิริยา) เช่น เรซินเกรดหล่อทั่วไป หล่อใส ไฟเบอร์กลาส มีลักษณะ ใสไม่มีสี เมื่อต้องการใช้งานต้องนำมาผสมตัวม่วง 0.2 % (มีสีม่วงอ่อนๆ) ถ้าเรซินใสจะใช้กับตัวม่วงใส และ โมโนสไตรีน ประมาณ 5 - 10 % คนให้เข้ากัน เตรียมไว้



รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการเตรียมเรซิน

จากรูปที่ 3.9 คือ การเตรียมอุปกรณ์สำหรับการหล่อเรซินประกอบไปด้วย แม่พิมพ์ แก้ว สำหรับใส่เรซิน ตัวทำแข็ง เรซิน เครื่องชั่ง และชุดท้าย สเปรย์สำหรับเคลือบผิวของแม่พิมพ์เพื่อป้องกันการติดแม่พิมพ์เสร็จแล้ว นำเรซินไปชั่งตามที่ต้องการในที่นี่จะใช้ 500 g ต่อการหล่อ

### 3.4.2 การผสมตัวทำแข็ง

เมื่อจะทำการหล่อ การทำ การเคลือบตามประเภทของงาน ให้ผสมตัวทำให้แข็ง (Hardener) หรือตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) มีลักษณะใสไม่มีสี ในอัตราส่วน 0.5 – 2.0 % แต่ไม่ควรเกิน 4 % เพราะจะทำให้ชิ้นงานเปราะแตกง่าย อัตราส่วนผสมของตัวเร่งใช้ประมาณ 0.5 – 1 % ต่อน้ำหนักเรซิน

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมตัวเร่งต่อน้ำหนักเรซิน

น้ำหนักเรซิน (Kg)	ตัวทำแข็ง (Kg)
1,000 g	7 g
500 g	4 g
100 g	1 g

จากตารางที่ 3.1 คืออัตราส่วนการผสมตัวทำแข็งต่อน้ำหนักของเรซิน ตัวอย่างเช่น ถ้าเราใช้เรซินน้ำหนัก 500 g ก็ให้ทำการผสมตัวทำแข็งประมาณ 4 g และรูปที่ 3.10 เป็นการผสมตัวทำแข็งเข้ากับเรซินที่เตรียมไว้

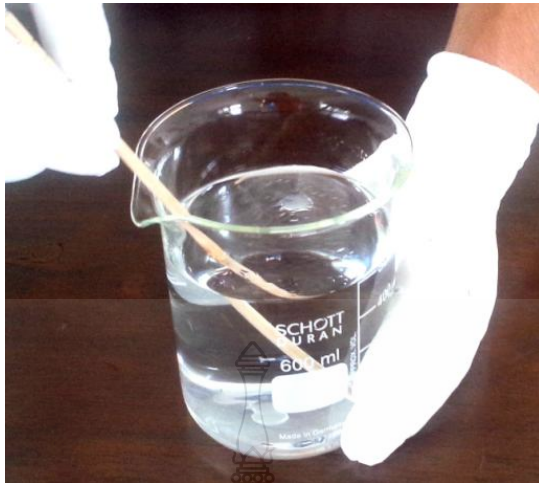


รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการผสมตัวทำแข็ง

#### 3.4.3 การคนเรซิน

การคนเรซินมีความสำคัญมากพอๆ กับอัตราส่วนผสมที่ถูกต้อง โดยต้องเริ่มต้นจากภาชนะที่ใส่เรซินต้องเรียบทั้งก้นและด้านข้างภาชนะ เช่น แก้วพลาสติก การคนให้ใช้ไม้คนเบาๆ ไม่ให้เกิดฟองอากาศ ห้ามคนแบบตีไข่ หรือใช้แปรงทาสีคน เพราะจะทำให้เกิดฟองอากาศขึ้นในเนื้อของเรซิน เน้นคนที่ด้านข้างและก้นภาชนะซึ่งมักเป็นจุดอับ คนจนส่วนผสมต่างๆ เข้าเป็นเนื้อเดียวกันจึงสามารถใช้งานได้

จากรูปที่ 3.11 เป็นตัวอย่างการคนเรซินที่ถูกต้องวิธีนี้จะคนช้าๆ และเริ่มคนจากด้านข้างและลงไปด้านล่างของแก้ว จะเห็นได้ว่าไม่ทำให้เกิดฟองอากาศในเนื้อเรซินเลย



รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการคนเรซินให้เข้ากัน

#### 3.4.4 การเทเรซิน

การเทเรซินมีความสำคัญมากๆ หลังจากที่เราคนเรซินและตัวทำแข็งเข้าด้วยกันแล้ว ก็จะทำให้การเทเรซินในแม่พิมพ์ที่เตรียมไว้ เพื่อไม่ให้เกิดฟองอากาศตอนขณะเทเรซินจะต้องเทเบาๆ และช้าๆ และต้องเทในระยะที่ต่ำๆ ดังรูปที่ 3.12 หลังจากที่เทเรซินเสร็จสิ้นแล้วจะต้องรอให้เรซินแข็งตัวก่อน ประมาณ 30 - 120 นาที เมื่อครบเวลาแล้วให้สังเกตว่าเรซินแข็งตัวเรียบร้อยแล้ว หลังจากนั้นแกะออกจากแบบดังแสดงในรูปที่ 3.13 - 3.16 ตามลำดับ



รูปที่ 3.12 ขั้นตอนการเทเรซินในแม่พิมพ์



รูปที่ 3.13 วัสดุทดสอบแบบครีမ်เบลสำหรับทดสอบแรงดึง



รูปที่ 3.14 วัสดุทดสอบรูปทรงสี่เหลี่ยมสำหรับทดสอบความแข็ง ความหนา 5 mm



รูปที่ 3.15 วัสดุทดสอบค่าคงที่การฉนวน ค่าสูญเสียของวัสดุฉนวนและ การทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า ความหนา 2 mm





### รูปที่ 3.16 วัสดุทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนเรซิน

จากรูปที่ 3.13 และ 3.14 คือชิ้นงานที่ผ่านการแข็งตัวของเรซินที่ทำการแกะออกจากแบบที่ได้ออกแบบไว้ เพื่อสำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางกล และจากรูปที่ 3.15 และ 3.16 คือชิ้นงานที่ผ่านการแข็งตัวของเรซินที่ทำการแกะออกจากแบบที่ได้ออกแบบไว้ เพื่อสำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่อไป

### 3.5 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุฉนวนเรซิน

การทดสอบแรงดึงและการทดสอบความแข็งเป็นการทดสอบพื้นฐานที่ใช้ทดสอบสมบัติของวัสดุต่างๆ ปกติการทดสอบแรงดึงและความแข็งจะใช้ชิ้นทดสอบตามแบบมาตรฐาน โดยการทดสอบแรงดึงและทดสอบความแข็งใช้ในการตรวจวัดพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุ ดังนั้นจึงต้องมีสถานะในการบ่มเร่งสำหรับวัสดุนั้นๆ ดังต่อไปนี้

#### 3.5.1 การทดสอบคุณสมบัติทางกล

##### 1) การทดสอบผลกระทบทางความร้อน (Heat Resistance) [9]

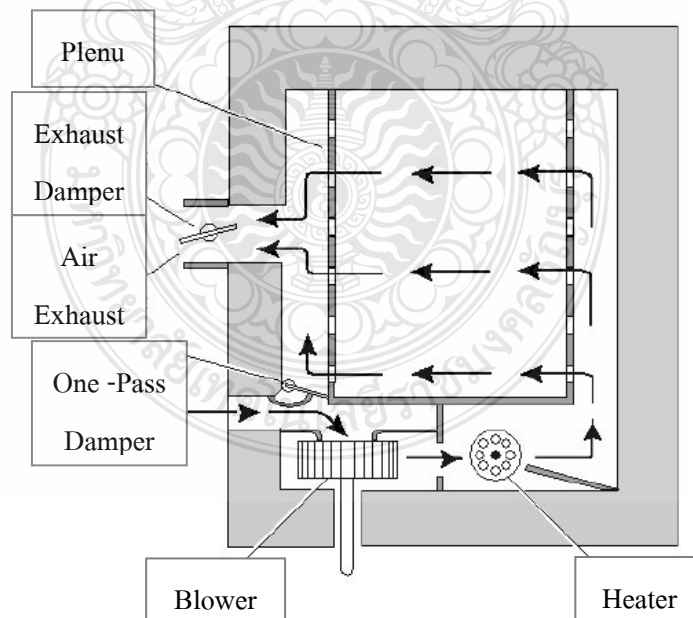
การนำฟิวส์วิตซ์แรงต่ำที่ฉนวนทำจากเรซิน ไปติดตั้งใช้งานกลางแจ้งสภาพอากาศร้อนมีผลทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการทดสอบความทนทานต่อความร้อนของวัสดุฉนวนที่ทำจากเรซินตามมาตรฐาน ISO 188 [9] โดยการนำเรซิน เข้าสู่ตู้อบอากาศร้อน (Air oven) ตั้งอุณหภูมิทดสอบที่  $70 \pm 1$  °C เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง เมื่อครบระยะเวลาการให้ความร้อน นำชิ้นงานออกจากตู้อบอากาศร้อนทิ้งไว้ในห้องที่รับภาวะไม่น้อยกว่า 16 ชั่วโมงแต่ไม่เกิน 6 วัน เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพกับเรซินที่ไม่ผ่านการอบอากาศร้อน ในที่นี้จะเปรียบเทียบสมบัติการทนต่อแรงดึง (Tensile Strength) และค่าความแข็ง (Hardness)

### ขั้นตอนการทดสอบ

นำชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการขึ้นรูป ดังรูปที่ 3.13 รูปทรงครีမ်เบล และ รูปที่ 3.14 รูปทรงสี่เหลี่ยมวางชิ้นงานในภาชนะ เพื่อนำเข้าไปอบในตู้อบดังรูปที่ 3.17 และมีวงจรสมมูลแสดงดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.17 ตู้อบอากาศร้อน



รูปที่ 3.18 วงจรสมมูลของตู้อบอากาศร้อน



รูปที่ 3.19 วัสดุทดสอบวางในภาชนะในตู้อบอากาศร้อน

หลังจากเสร็จสิ้นจากการอบ นำชิ้นงานไปทำการทดสอบคุณสมบัติทางกลคือ การทดสอบแรงดึงและทดสอบความแข็งของวัสดุแล้วเปรียบเทียบกับค่าก่อนและหลังบ่มแรง และทำการทดสอบแรงดึงของชิ้นงาน โดยจะใช้เครื่อง Universal Testing Machine ดังรูปที่ 3.20 โดยจะทำการจับชิ้นงานที่ตำแหน่งปลายทั้งสองด้านด้วยระยะคงที่ แล้วทำการดึงยึดชิ้นงานด้วยอัตราการดึงที่คงที่ทำการบันทึกการเปลี่ยนแปลงของแรงและระยะยึดของชิ้นงานบริเวณตรงกลาง และสำหรับการทดสอบความแข็งของชิ้นงานโดยใช้ตัว Durometer Shore D วัดค่าความแข็งกระทำโดยการวางชิ้นงานบนผิวเรียบกดหัวเข็มลงบนชิ้นงานจนกระทั่งสุดระยะของหัวเข็ม ถึงจุด Stop Ring แล้วทำการอ่านค่าความแข็งจากหน้าปัดภายในระยะเวลาคงที่ โดยแสดงดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.20 เครื่องมือทดสอบแรงดึงสำหรับชิ้นงาน





รูปที่ 3.21 เครื่องมือทดสอบความแข็งสำหรับชิ้นงาน

2) การทดสอบผลกระทบต่อน้ำมันหรือสารเคมี (Oil or Chemical Resistance)

การทดสอบความทนทานต่อน้ำมันหรือสารเคมีทำได้โดยการนำเรซิน ไปทดสอบตามมาตรฐาน ISO 1817 [10]

ISO 1817 คือ มาตรฐานการทดสอบความคงทนต่อของเหลว ทำได้โดยการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเรซินทั้งก่อนและหลังการแช่ในของเหลวทดสอบตามระยะเวลาที่กำหนดซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงการทดสอบฟิวส์สวิทช์แรงต่ำที่มีฉนวนทำจากเรซิน ไปติดตั้งใช้งานจริงโดยของเหลวที่มีโอกาสจะสัมผัสกับฉนวนฟิวส์สวิทช์มีตัวอย่างดังนี้

(1) น้ำมันหม้อแปลง เนื่องจากฟิวส์สวิทช์แรงต่ำจะถูกติดตั้งอยู่ทางด้านแรงต่ำของหม้อแปลงในการบำรุงรักษาอาจทำให้ฟิวส์สวิทช์แรงต่ำสัมผัสกับน้ำมันหม้อแปลงได้ โดยชนิดน้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ในการทดสอบเป็นน้ำมันแร่ (Mineral Oil) ชนิด Naphthenic

(2) น้ำเกลือ เนื่องจากในกรณีที่มีการติดตั้งฟิวส์สวิทช์แรงต่ำบริเวณชายทะเลฝนที่ตกลงมาจะมีส่วนผสมของไอเกลือซึ่งจะทำให้มีผลต่อฟิวส์สวิทช์แรงต่ำได้ ในที่นี้จะใช้น้ำเกลือที่มีค่าความเค็ม 34 ส่วนในพันส่วน (ppt) ซึ่งเป็นค่าความเค็มสูงสุดของน้ำทะเลไทย

โดยการนำฉนวนฟิวส์สวิทช์แรงต่ำที่ทำจากเรซินไปแช่ในของเหลว ดังรูปที่ 3.22 นำไปอบที่อุณหภูมิ  $70 \pm 1$  °C เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง แล้วเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่างๆ กับฉนวนฟิวส์สวิทช์แรงต่ำที่ทำจากเรซินที่ไม่ผ่านการแช่ของเหลว

- การเปลี่ยนแปลงของการรับแรงดึง
- การเปลี่ยนค่าความแข็ง
- การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก
- การเปลี่ยนแปลงของปริมาตร

#### ขั้นตอนการทดสอบ

นำชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการขึ้นรูป ดังรูปที่ 3.13 รูปทรงดรัมเบล และรูปที่ 3.14 รูปทรงสี่เหลี่ยมวางในภาชนะที่เตรียมไว้สำหรับแช่น้ำมันหม้อแปลงและน้ำเกลือ เพื่อนำเข้าไปอบในตู้อบดังรูปที่ 3.17 วงจรสมมูลแสดงดังรูปที่ 3.18 และการวางชิ้นงานทดสอบในภาชนะภายในตู้อบดังรูปที่ 3.19 ตามลำดับ



#### รูปที่ 3.22 ตัวอย่างการแช่น้ำมันหม้อแปลงและน้ำเกลือ

หลังจากเสร็จสิ้นจากการแช่ในของเหลวและอบแล้วทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่างๆ กับชิ้นงานทดสอบที่ไม่ผ่านการแช่ของเหลว ซึ่งจะทำการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานโดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine ดังรูปที่ 3.20 โดยจะทำการจับชิ้นงานที่ตำแหน่งปลายทั้งสองด้านด้วยระยะคงที่ แล้วทำการดึงยึดชิ้นงานด้วยอัตราการดึงที่คงที่ทำการบันทึกการเปลี่ยนแปลงของแรงและระยะยึดของชิ้นงานบริเวณตรงกลาง และการทดสอบความแข็งของชิ้นงานโดยใช้ตัว Durometer Shore D วัดค่าความแข็งกระทำโดยการวางชิ้นงานบนผิวเรียบกดหัวเข็มลงบนชิ้นงานจนกระทั่งสุดระยะของหัวเข็ม ถึงจุด Stop Ring แล้วทำการอ่านค่าความแข็งจากหน้าปัดภายในระยะเวลาคงที่ ดังรูปที่ 3.21 และสุดท้าย คือการวัดความเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักและปริมาตรของชิ้นงาน โดยการชั่งน้ำหนักและวัดขนาดด้วยเวอร์เนียแคลิเปอร์

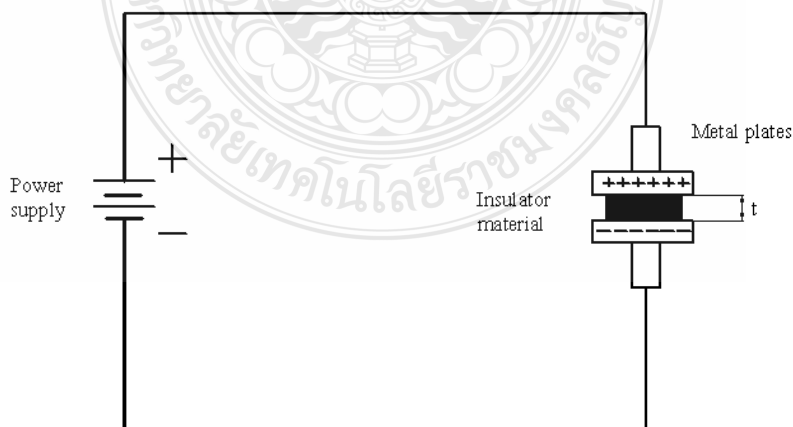
### 3.5.2 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า

1) การวัดค่าคงที่การฉนวน (Dielectric Constant) และ ค่าสูญเสียของการฉนวน (Dielectric Loss)

การวัดค่าคงที่การฉนวน (Dielectric Constant) และค่าสูญเสียของการฉนวน (Dielectric Loss) จะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D150 [8] โดยการนำเอาวัสดุทดสอบขนาด  $100 \times 100 \times 2$  mm มาทดสอบความจุไฟฟ้าในวัสดุ เทียบกับสูญญากาศและค่าพลังงานที่สูญเสียไปในวัสดุที่ความถี่ 1 MHz โดยใช้เครื่อง Impedance Gain-Phase Analyzer HP 4294 A ดังแสดงในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 Impedance Gain-Phase Analyzer HP 4294 A [15]



รูปที่ 3.24 วงจรสมมูลของการวัดค่าคงที่การฉนวนและค่าสูญเสียของการฉนวน

### ขั้นตอนการทดสอบ

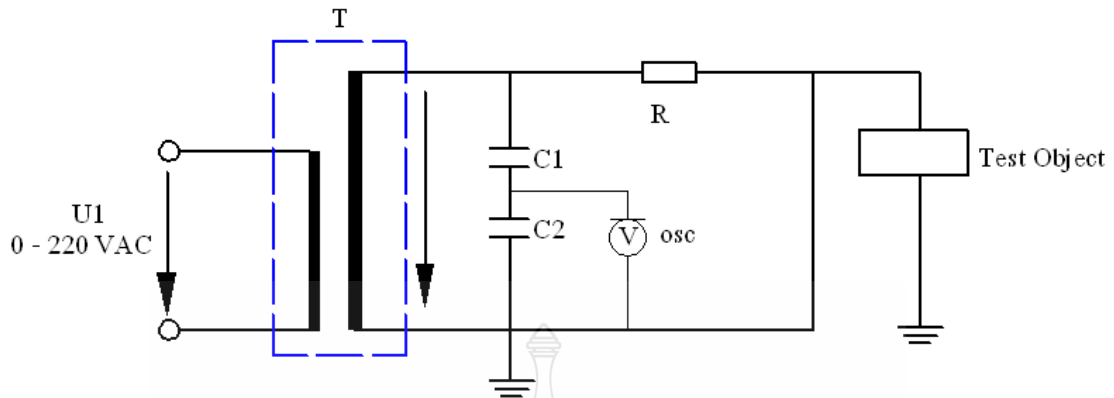
นำชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการขึ้นรูปดังรูปที่ 3.15 รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 100 x 100 x 2 mm จัดวางฉนวนชั้นกลางระหว่างอิเล็กโทรดแบบระนาบ 2 ตัว ดังรูปที่ 3.24 แล้วทำการวัดค่า Capacitance เปรียบเทียบกับค่า Capacitance ของอากาศจะได้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และว่าเมื่อวางโมเลกุลลงในสนามไฟฟ้า จะทำให้เกิดการเรียงตัวตามสนามไฟฟ้า (Polarization) ขึ้นอยู่กับสภาพขั้วของโมเลกุลและความต่างศักย์ที่ใส่เข้าไปในสนามไฟฟ้า ขณะที่โมเลกุลเกิดการเรียงตัวในสนามไฟฟ้านี้จะทำให้เกิดแรงเสียดทานภายในเกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลและทำให้มีความร้อนเกิดขึ้น จากการเสียดสีดังกล่าว จะทำให้เกิดการสูญเสียไดอิเล็กตริก

#### 2) การทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric Strength) [7]

ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าหมายถึง ค่าความต่างศักย์สูงสุดที่วัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้าจะสามารถทนได้ ก่อนที่จะเกิดการเสียหาย (Failure) ดังนั้นค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าจึงมีหน่วยเป็น โวลต์ต่อมิลลิเมตร อาจกล่าวได้ว่าค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า ก็คือ Strength ของวัสดุฉนวนในการใช้งานทางไฟฟ้า และยิ่งวัสดุที่มีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงก็จะยิ่งเป็น Insulator ที่มีคุณภาพ

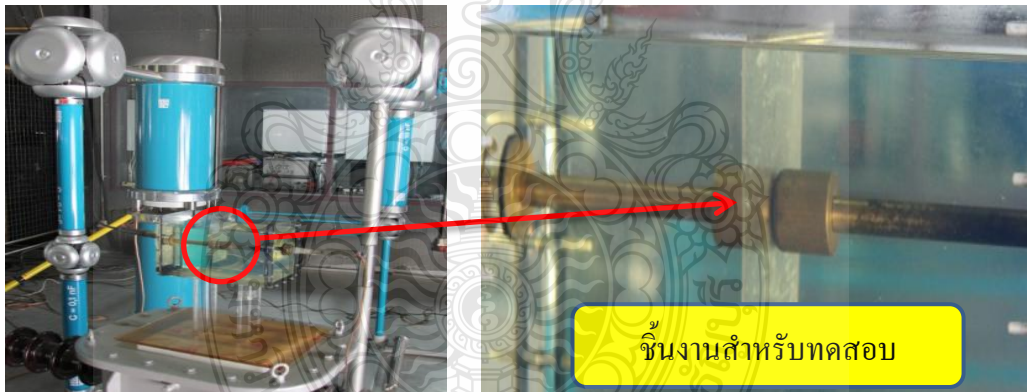
วิธีการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า คือจะใช้ วิธีการ Step-by-Step จะเป็นการผ่านศักย์ไฟฟ้าในช่วงแรกประมาณ 50% ของ Breakdown Voltage จากนั้นจึงเพิ่ม Voltage ในสัดส่วนที่เท่ากัน (Equal Increment) แล้วรักษาระดับศักย์ไฟฟ้านั้นไว้ จนกระทั่งชิ้นงานพังหรือแตกหัก

ดังนั้นดำเนินการจัดเตรียมวัสดุทดสอบขนาด 100 x 100 mm หนาประมาณ 1-2 mm จำนวน 5 ชิ้น จัดวางลงในภาชนะทดสอบที่บรรจุด้วยฉนวนน้ำมันเพื่อป้องกันการวาบไฟตามผิว โดยวางชั้นอยู่ระหว่างอิเล็กโทรดทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm ทำการต่อวงจรทดสอบ ดังรูปที่ 3.25 และทำการป้อนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ที่ 1 kV/s จนกระทั่งเกิดเบรกดาวน์ จากนั้นจึงนำผลการทดสอบทั้ง 5 ชิ้น ไปหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3.25 วงจรทดสอบฉนวนเรซินความทนต่อแรงดันไฟฟ้า

แรงดันทดสอบเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 50 Hz ซึ่งสร้างขึ้นโดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงขนาด 100 kV 10 kVA และทำการวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับวงจรทดสอบด้วยชุดแบ่งแรงดัน (C-Divider) ซึ่งมีความแม่นยำในการวัดอยู่ที่  $\pm 1\%$  แรงดันทดสอบถูกป้อนเข้าไประหว่างฉนวนกับอุปกรณ์ทดสอบจนกระทั่งเกิดเบรกดาวน์ ดังแสดงในรูปที่ 3.26

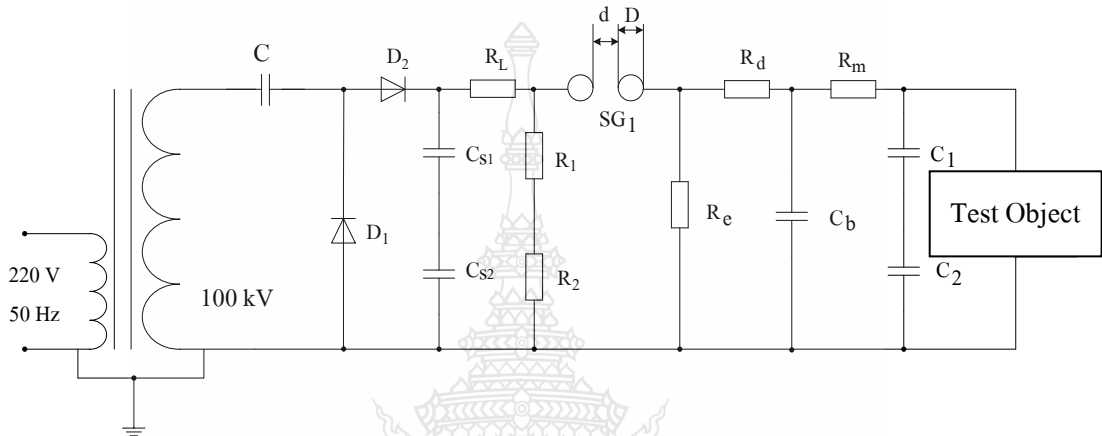


รูปที่ 3.26 การจัดวางอุปกรณ์ทดสอบฉนวนเรซินต่อความทนต่อแรงดันไฟฟ้า

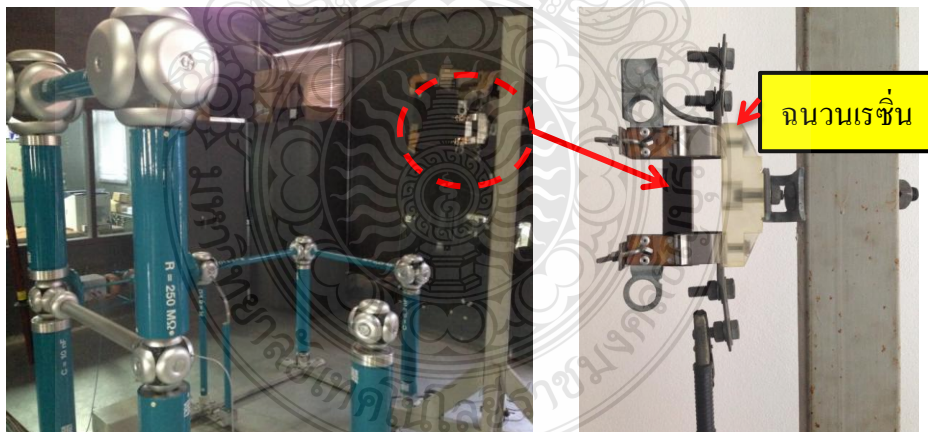
3) การทดสอบค่าความทนต่อแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ (Impulse Breakdown Voltage Test)  
 การทดสอบความทนต่อแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ คือ การทดสอบความทนทานของฉนวนฟิวส์วิตช์แรงต่ำต่อแรงดันเกินเสิร์จฟ้าผ่า (Lightning Surge) การทดสอบนั้นจะทำการป้อนแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50  $\mu\text{s}$  จากนั้นจึงเพิ่มค่าระดับแรงดันขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเกิดการวาบไฟระหว่างฐานฟิวส์วิตช์แรงต่ำและจุดต่อลงกราวด์

### ขั้นตอนการทดสอบ

นำชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการขึ้นรูปดังรูปที่ 3.16 ฉนวนเรซินไฟวล์สวิตช์ นำไปติดตั้งที่คอนเส้าที่เตรียมไว้แล้วทำการต่อวงจรทดสอบ โดยมีวงจรสมมูลดังรูปที่ 3.27 และการทดสอบชิ้นงานจริงแสดงดังรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.27 วงจรสมมูลของการสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน



รูปที่ 3.28 การจัดวางอุปกรณ์ทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์เบรคดาวน์

#### 4) การทดสอบหาค่า $U_{b,50\%}$

การทดสอบหาค่าแรงดันเบรคดาวน์ 50% ( $U_{b,50\%}$ ) หมายถึง ค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ค่ากลาง ซึ่งเป็นค่าระดับแรงดันที่ทำให้เกิดเบรคดาวน์เป็นจำนวนครั้งครึ่งหนึ่งของจำนวนครั้งที่ป้อนแรงดัน



ออกไปให้กับวัสดุทดสอบ หรือค่าที่เกิดจากการเกิดเบรคดาวน์และไม่เกิดเบรคดาวน์ โดยการนำค่าทั้งสองมาคำนวณเพื่อหาค่าเฉลี่ยในการเกิดเบรคดาวน์ขึ้นที่ 50% ฉะนั้นการหาค่า  $U_{b50\%}$  จึงทำได้โดยการดิสซาร์จออกไปเป็นจำนวนหลายๆ ครั้ง จนกระทั่งจำนวนครั้งที่เกิดการเบรคดาวน์จำนวนครั้งเป็นครึ่งหนึ่งของจำนวนครั้งที่เกิดการดิสซาร์จออกไป เช่น เกิดการดิสซาร์จ 20 ครั้ง แล้วเกิดการเบรคดาวน์ที่ช่องว่างระยะห่างของแกป 10 ครั้ง ซึ่งค่าแรงดันนั้นก็คือ  $U_{b50\%}$  และในการทดสอบหาค่าเบรคดาวน์ 50% ( $U_{b50\%}$ ) สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้วิธีปรับขึ้น-ลงของแรงดันที่ป้อน ซึ่งเป็นวิธีหาแรงดันดิสซาร์จเบรคดาวน์ 50% โดยการเริ่มต้นเลือกแรงดันที่ค่าหนึ่ง ( $U_k$ ) ที่คาดว่าจะจะเป็นแรงดันเบรคดาวน์ 50% ป้อนเข้าไปให้กับวัสดุทดสอบ ถ้าหากไม่เกิดเบรคดาวน์ที่วัสดุทดสอบให้เพิ่มระดับแรงดันขึ้นเป็น  $\Delta U$  ซึ่งมีค่าประมาณ  $\pm 3\%$  ของค่าแรงดันดิสซาร์จ 50% จึงป้อนแรงดันใหม่ด้วยค่า  $U_k + \Delta U$  แต่ถ้าเกิดเบรคดาวน์ขึ้นที่วัสดุทดสอบที่แรงดัน ( $U_k$ ) ก็ให้ลดแรงดันเหลือเพียง  $U_k - \Delta U$  ดังนั้นค่าแรงดันที่ป้อนต่อไปจะขึ้นอยู่กับผลที่เกิดขึ้นจากการป้อนแรงดันครั้งที่ผ่านมา ปฏิบัติต่อเนื่องกันเช่นนี้จนกระทั่งมีจำนวนครั้งที่ป้อนมากพอสำหรับการหาค่าแรงดันเบรคดาวน์ 50%

### 3.6 การทดสอบเฉพาะแบบพิวส์สวิตช์แรงต่ำตามมาตรฐาน IEC [3]

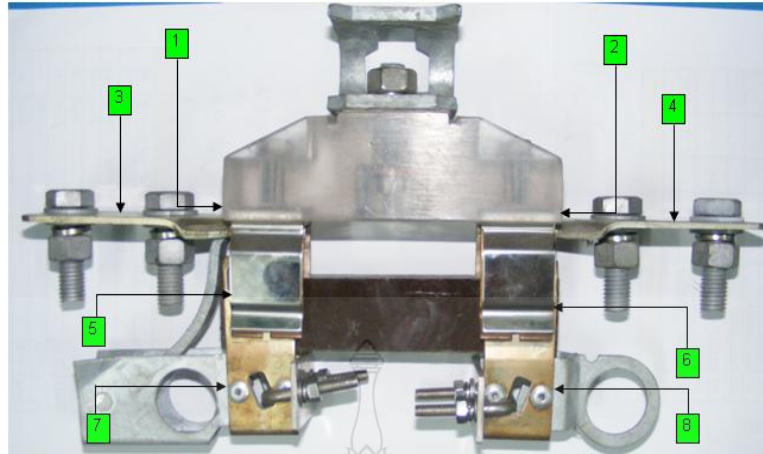
การทดสอบเฉพาะแบบมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบพิวส์สวิตช์แรงต่ำที่ออกแบบมานั้น มีคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดหรือไม่ การทดสอบดังกล่าวจะมีลำดับการทดสอบดังต่อไปนี้

#### 3.6.1 การทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (Temperature Rise Test)

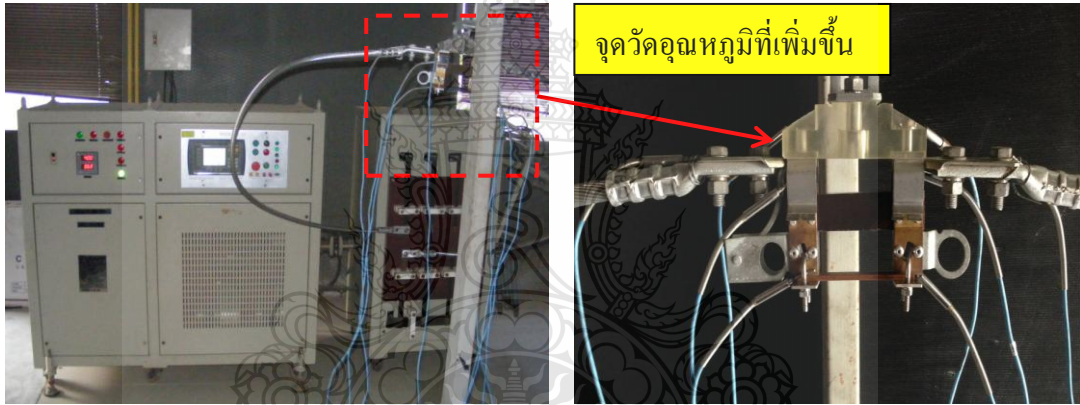
การทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น คือ การวัดอุณหภูมิของชิ้นส่วนต่างๆ ของพิวส์สวิตช์แรงต่ำ ในขณะที่ทำงานรองรับกระแสที่พิกัดเปรียบเทียบกับอุณหภูมิอากาศโดยรอบ โดยอุณหภูมิของชิ้นส่วนต่างๆ ที่เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิอากาศโดยรอบต้องไม่เกินค่าที่กำหนดตามมาตรฐาน

##### 1. วิธีทดสอบ

ป้อนกระแสไฟฟ้าเท่ากับพิกัดกระแสใช้งานที่กำหนด (Rated Operational Currents,  $I_e$ ) สำหรับพิวส์สวิตช์แรงต่ำ โดยมีพิกัดสูงสุดเท่ากับ 400 A 50 Hz ผ่านพิวส์สวิตช์แรงต่ำใช้สายตัวนำขนาด  $240 \text{ mm}^2$  ความยาวสายจากขั้วต่อสายแหล่งจ่ายถึงขั้วต่อสายพิวส์สวิตช์แรงต่ำไม่น้อยกว่า 2 m ใช้เวลาในการป้อนกระแสไฟฟ้าทดสอบเป็นเวลา 3 ชั่วโมง และบันทึกค่าอุณหภูมิในแต่ละจุดดังรูปที่ 3.29 - 3.31 ทุกๆ 30 นาที เมื่อสิ้นสุดการทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของชิ้นส่วนต้องไม่เกินค่าที่กำหนดในตารางที่ 2.7 และ 2.8



รูปที่ 3.29 ตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์และทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น 8 จุด



รูปที่ 3.30 การติดตั้งและทดสอบวัดค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 3.31 การติดตั้งและทดสอบวัดค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

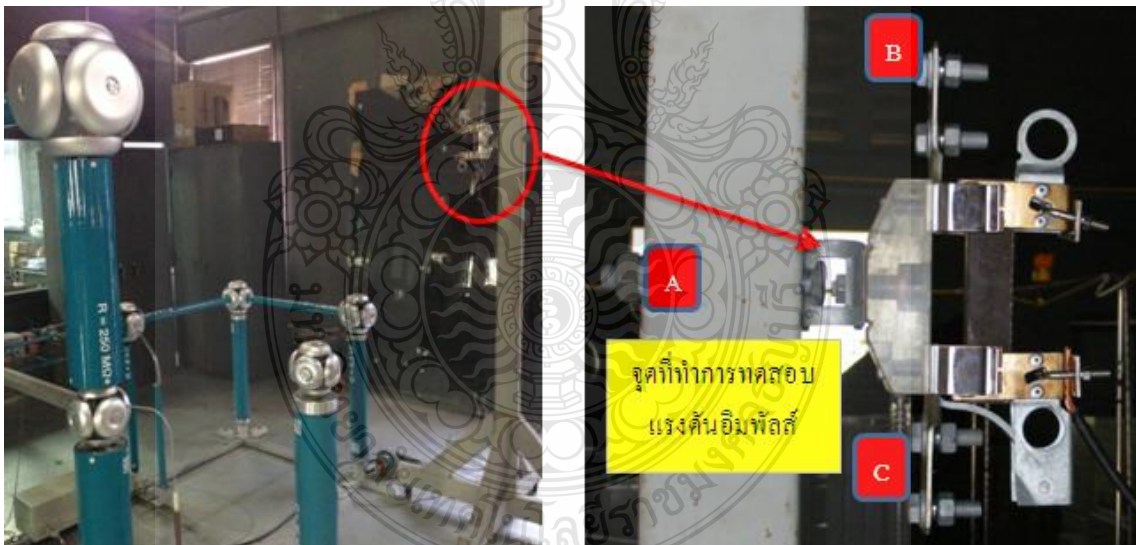


ดำเนินการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่กระแสฟลักซ์ 400 A เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (180 นาที) และทำการติดตั้งเสมือนจริง ดังรูปที่ 3.31 เป็นแหล่งจ่ายกระแส 400 A 50 Hz และติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ฟิวส์สวิตช์แรงต่ำจำนวน 8 จุด สำหรับทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น หลังจากติดตั้งอุปกรณ์ทุกอย่างครบแล้ว ทำการจ่ายกระแสฟลักซ์ 400 A พร้อมทั้งตั้งเวลาเพื่อควบคุมระยะเวลาในการทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของการทดสอบ

### 3.6.2 การทดสอบสมบัติทางไดอิเล็กตริก (Dielectric Properties)

#### 1. การทดสอบความทนต่อแรงดันอิมพัลส์

การทดสอบความทนต่อแรงดันอิมพัลส์คือ การทดสอบความทนทานของฉนวนฟิวส์สวิตช์แรงต่ำแรงดันเกินเสิร์จฟ้าผ่า (Lightning Surge) การทดสอบนั้นจะทำการป้อนแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50  $\mu$ s จำนวน 5 ครั้ง สำหรับแต่ละตำแหน่งการป้อนห่างกันไม่น้อยกว่า 1 วินาที ที่ระดับแรงดันอิมพัลส์ 14.8 kV สำหรับตำแหน่งการป้อนแรงดันอิมพัลส์ ระหว่างจุด A กับจุด B จุด A กับจุด C และจุด B กับจุด C ดังแสดงในรูปที่ 3.32 โดยมีสภาวะในระหว่างการทดสอบต้องเป็นไปตามข้อกำหนดตามตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.32 การประกอบวงจรทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50  $\mu$ s

**ตารางที่ 3.2** สภาวะระหว่างการทดสอบสมบัติทางไดอิเล็กตริก

สภาวะการทดสอบ	ค่าที่กำหนด
1. อุณหภูมิ	15°C - 35°C
2. ความดันบรรยากาศ	86 kPa – 106 kPa
3. ความชื้น	25% - 75%

ในระหว่างการทดสอบหรือหลังการทดสอบต้องไม่เกิดการปล่อยประจุทำลายที่ทำให้ฉนวนของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำในตำแหน่งที่ทดสอบได้รับความเสียหาย ผิดพร่องใดๆ เช่น การเกิดประกายข้าม (Sparkover) การวาบไฟตามผิว (Flashover) การเจาะทะลุ (Puncture)

**2. การทดสอบความทนทานต่อแรงดันเกินของฉนวนแข็ง**

การทดสอบความทนทานต่อแรงเกินของฉนวนแข็ง คือ การทดสอบความสามารถในการทนทานต่อแรงดันเกินชั่วคราวของฉนวนแข็งโดยการทดสอบจะป้อนแรงดันไฟฟ้าทดสอบที่ 2200 Vrms เป็นเวลา 5 วินาที ตำแหน่งป้อนแรงดันไฟฟ้าทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.33 ในระหว่างการทดสอบต้องไม่เกิดการวาบไฟตามผิว (Flashover) การเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนภายใน เช่น การเจาะทะลุ (Puncture) หรือภายนอก เช่น เบรกดาวน์เนื่องจากร่องรอยนำไฟฟ้าที่ผิว (Tracking)



**รูปที่ 3.33** การจัดวางอุปกรณ์ทดสอบความทนทานต่อแรงดันเกินกระแสสลับของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำฉนวนเรซิน

### 3.6.3 การทวนสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (Temperature Rise Verification)

การทวนสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น คือ การนำชิ้นส่วนมาทำการทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และนำชิ้นส่วนชุดเดิมไปทดสอบการทดสอบเฉพาะแบบในหัวข้ออื่นๆ จากนั้นนำชิ้นส่วนชุดเดิมมาทำการทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอีกครั้ง ข้อต่อสายและชิ้นส่วนที่สามารถเข้าถึงได้จะต้องมีค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นไม่เกินขีดจำกัดที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2.8

### 3.7 สรุปวิธีดำเนินงานวิจัย

สำหรับบทที่ 3 เป็นการนำเสนอแนวความคิดในการออกแบบชิ้นงาน สำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางความร้อน ทางเคมี ทางกล และทางไฟฟ้า อีกทั้งยังใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการจำลองความเครียดทางไฟฟ้า และการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าภายในฉนวนเรซิน และได้จัดทำแม่พิมพ์สำหรับทดสอบแบบต่างๆ ในบทถัดไปจะเป็นการนำชิ้นงานที่ได้ทำการออกแบบและที่ทำการขึ้นรูปเรียบร้อยแล้ว ไปทำการทดสอบตามมาตรฐานที่กำหนด



## บทที่ 4

### ผลการทดสอบและวิเคราะห์

บทที่ผ่านมาได้ทำการศึกษาข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเพื่อทำการออกแบบแม่พิมพ์และขึ้นรูปชิ้นงาน การจำลองสนามไฟฟ้าโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์ความเครียดสนามไฟฟ้าภายในเนื้อฉนวนเรซิน ตลอดทั้งขั้นตอนการทดสอบตามมาตรฐานกำหนด ในบทนี้จะทำการแสดงผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลและทางไฟฟ้าของวัสดุฉนวนเรซิน จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

#### 4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุฉนวนเรซิน

การทดสอบแรงดึงและการทดสอบความแข็งเป็นการทดสอบพื้นฐานที่ใช้ทดสอบสมบัติของวัสดุต่างๆ ปกติการทดสอบแรงดึงและความแข็งจะใช้ชิ้นงานทดสอบตามแบบมาตรฐาน ซึ่งมีสภาวะการบ่มแรงก่อนและหลังการทดสอบดังนี้

##### 4.1.1 ผลการทดสอบผลกระทบต่อความร้อน

จากการทดสอบผลกระทบที่มีต่อความร้อนในหัวข้อย่อยที่ 1 ของหัวข้อที่ 3.5.1 กล่าวถึงการทดสอบคุณสมบัติทางกล ซึ่งจะนำชิ้นงานที่ผ่านการอบแล้ว มาทำการทดสอบค่าแรงดึงและค่าความแข็งของวัสดุฉนวน และมีค่าพารามิเตอร์สำหรับการอบดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ในการอบชิ้นงานทดสอบ

พารามิเตอร์	การตั้งค่า
อุณหภูมิ	70 °C
เวลา	72 ชั่วโมง

หลังจากเสร็จสิ้นจากการอบ นำชิ้นงานทดสอบคุณสมบัติทางกลคือ การทดสอบแรงดึง และกำหนดค่าความเร็วในการดึงชิ้นงานของเครื่องทดสอบดังรูปที่ 4.1 คือ 5 mm ต่อ นาที แล้วบันทึกค่าแรงดึงและสำหรับการทดสอบความแข็งของวัสดุจะกำหนดน้ำหนักในการทดสอบที่ 5 Kg และกดแช่หัวกดไว้เป็นเวลาประมาณ 10 วินาที แล้วบันทึกค่าความแข็ง หลังจากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าก่อนและหลังบ่มแรงดังแสดงในตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.1 เครื่องมือทดสอบแรงดึงสำหรับขึ้นงาน



รูปที่ 4.2 เครื่องมือทดสอบความแข็งสำหรับขึ้นงาน

**ตารางที่ 4.2** ผลการทดสอบแรงดึงและทดสอบความแข็งก่อนและหลังการอบ

การทดสอบ	ผลการทดสอบ	
	ก่อนให้ความร้อน	หลังให้ความร้อน
1. สมบัติความทนต่อแรงดึง		
-Tensile Strength (MPa)	37.89 ± 4.5	72.18 ± 3.93
-Elongation at Brake (%)	500.7 ± 24.25	598 ± 194
-Elongation Modulus (MPa)	713 ± 80.21	804 ± 118.36
2. ความแข็ง (Shore D)	82 ± 1.0	81 ± 1.0

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบค่าแรงดึงและความแข็งของชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบ การวิเคราะห์หลังจากการทดสอบพบว่า ความร้อนมีผลต่อคุณสมบัติแรงดึงของวัสดุเรซินคือ จะทำให้ ค่าความทนทานต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากความร้อนจะช่วยดึงเอาความชื้นออกจากชิ้นงาน หรือ เรียกอีกอย่างก็คือ การอบที่สมบูรณ์ของชิ้นงาน

#### 4.1.2 ผลการทดสอบผลกระทบต่อน้ำมันหม้อแปลงหรือน้ำเกลือ

จากการทดสอบผลกระทบที่มีต่อน้ำมันหม้อแปลงหรือน้ำเกลือในหัวข้อย่อยที่ 2 ของหัวข้อ ที่ 3.5.1 กล่าวถึงการทดสอบคุณสมบัติทางกล ซึ่งจะนำชิ้นงานที่ผ่านการแช่น้ำมันหม้อแปลงและ น้ำเกลือและผ่านการอบแล้ว มาทำการทดสอบค่าแรงดึง ค่าความแข็ง น้ำหนักและปริมาตร ตามลำดับ ของวัสดุฉนวนเรซิน และมีค่าพารามิเตอร์สำหรับการทดสอบดังตารางที่ 4.3

**ตารางที่ 4.3** ค่าพารามิเตอร์ในการอบชิ้นงานทดสอบ

พารามิเตอร์	การตั้งค่า
อุณหภูมิ	70 °C
เวลา	72 ชั่วโมง
น้ำเกลือค่าความเค็ม	3.4 %
น้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า	Mineral Oil

หลังจากเสร็จสิ้นจากการแช่น้ำมันหม้อแปลงและน้ำเกลือและผ่านการอบมาแล้ว นำชิ้นงาน มาทำการทดสอบคุณสมบัติทางกลคือ การทดสอบแรงดึงและกำหนดค่าความเร็วในการดึงชิ้นงาน

ของเครื่องทดสอบคือ 5 mm ต่อ นาที แล้วบันทึกค่าแรงดึงและสำหรับการทดสอบความแข็งของวัสดุ จะกำหนดน้ำหนักในการทดสอบที่ 5 Kg และกดเข้าหัวกดไว้เป็นเวลาประมาณ 10 วินาที แล้วบันทึกค่าความแข็ง ส่วนน้ำหนักก็ทำการชั่งน้ำหนัก และปริมาตรคือทำการวัดขนาดรูปร่างของชิ้นงาน หลังจากนั้น ทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่างๆ กับชิ้นงานทดสอบที่ไม่ผ่านการแช่ของเหลวค่าก่อนและหลังบ่มเร่ง ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบผลกระทบต่อน้ำมันหม้อแปลงและน้ำเกลือ

การทดสอบ	ผลการทดสอบ		
	ก่อน	หลังแช่น้ำเกลือ	หลังแช่น้ำมัน
1. สมบัติความทนต่อแรงดึง			
- Tensile Strength (MPa)	37.89 ± 4.5	45.36 ± 4.43	40.73 ± 7.2
- Elongation at Brake (%)	500.7 ± 24.25	1000.82 ± 111	369.4 ± 81.13
- Elongation Modulus (MPa)	713 ± 80.21	695.75 ± 73.6	643.25 ± 30.40
2. ความแข็ง (Shore D)	82 ± 1.0	82 ± 1.0	83 ± 1.0
3. การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก (g)	14.06 ± 0.3	14.05 ± 0.3	14.30 ± 0.3
4. การเปลี่ยนแปลงของปริมาตร	8 ± 0.3	8 ± 0.3	8 ± 0.3

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบค่าเปลี่ยนแปลงแรงดึง ความแข็ง น้ำหนักและปริมาตรของชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบการวิเคราะห์หลังจากการทดสอบพบว่าน้ำมันหม้อแปลงและน้ำเกลือมีผลต่อคุณสมบัติแรงดึงของวัสดุเรซินคือ จะทำให้ค่าความทนทานต่อแรงดึง ความแข็ง มีค่าเพิ่มขึ้น และน้ำหนักจะเพิ่มขึ้น 2.38% หลังจากแช่น้ำมัน ซึ่งเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ส่วนปริมาตรจะไม่มีเปลี่ยนแปลง เนื่องจากเรซินเป็นวัสดุชนิด เทอร์โมเซตติง เมื่อขึ้นรูปแล้วจะไม่มีเปลี่ยนแปลงของรูปร่าง

## 4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุฉนวนเรซิน

### 4.2.1 ผลการทดสอบวัดค่าคงที่การฉนวนและค่าสูญเสียของการฉนวน

จากการทดสอบวัดค่าคงที่การฉนวนและค่าสูญเสียของการฉนวน ในหัวข้อย่อยที่ 1 ของหัวข้อที่ 3.5.2 กล่าวถึงการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งจะนำชิ้นงานทดสอบรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ขนาด 100 x 100 x 2 mm จัดวางฉนวนชั้นกลางระหว่างอิเล็กโทรดแบบระนาบเทียบกับอากาศหรือสุญญากาศชั้นกลางระหว่างอิเล็กโทรดแบบระนาบ จะเกิดเป็นสนามไฟฟ้าภายในฉนวน

เครื่องมือทดสอบและเครื่องมือวัด

- Precision Impedance Analyzer (4294 A)

- Dielectric Test Fixture (HP 16451B)

#### ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบชิ้นงาน

พารามิเตอร์	การตั้งค่า
อุณหภูมิ	23 °C
ความชื้น	50 %
เส้นผ่านศูนย์กลางอิเล็กโทรด	38 mm
ความถี่	1 MHz

#### ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบวัดค่าคงที่การฉนวนและค่าสูญเสียของการฉนวน

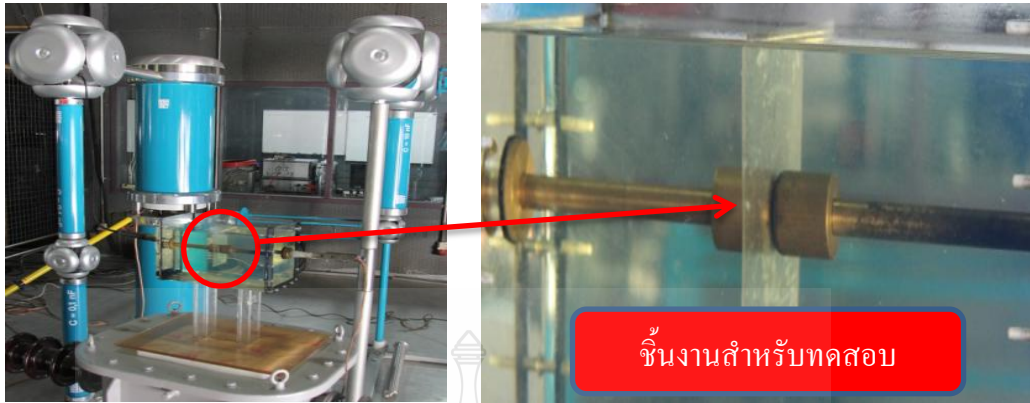
ค่าคงที่การฉนวน	ค่าสูญเสียของการฉนวน
$3.20 \pm 0.02$	$0.0273 \pm 0.0005$

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบวัดค่าคงที่การฉนวนซึ่งเมื่อเทียบกับค่าเก็บประจุของสุญญากาศแล้วจะมีค่าเป็นสามเท่าเหมาะสำหรับการเป็นฉนวนที่ดี ซึ่งโดยปกติทั่วไปค่าคงที่ของฉนวนพลาสติกจะอยู่ระหว่าง 2 – 20 และค่าสูญเสียของการฉนวนยิ่งต่ำยิ่งดี

#### 4.2.2 ผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า

จากการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า ในหัวข้อย่อยที่ 2 ของหัวข้อที่ 3.5.2 กล่าวถึงการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งจะนำชิ้นงานทดสอบรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 100 x 100 x 2 mm จัดวางลงในภาชนะทดสอบที่บรรจุด้วยฉนวนน้ำมันเพื่อป้องกันการวาวไฟตามผิว โดยวางชั้นอยู่ระหว่างอิเล็กโทรดทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm ทำการต่อใช้งานวงจรทดสอบดังรูปที่ 4.3 และทำการป้อนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ที่ 1 kV/s จนกระทั่งเกิดเบรกดาวน์ จากนั้นจึงนำผลการทดสอบทั้ง 5 ชิ้น ไปหาค่าเฉลี่ย





รูปที่ 4.3 การจัดวางอุปกรณ์ทดสอบวัดค่าคงที่ของฉนวนและค่าสูญเสียของการฉนวน

แรงดันทดสอบเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 50 Hz ซึ่งสร้างขึ้นโดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงขนาด 100 kV 10 kVA และทำการวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับวงจรทดสอบด้วยตัวขูดแบ่งแรงดัน (C-Divider) ซึ่งมีความแม่นยำในการวัดอยู่ที่  $\pm 1\%$  แรงดันทดสอบถูกป้อนเข้าไประหว่างฉนวนกับอุปกรณ์ทดสอบจนกระทั่งเกิดเบรกดาวน์ แรงดันทดสอบถูกป้อนเข้าไประหว่างฉนวนกับอุปกรณ์ทดสอบจนกระทั่งเกิดเบรกดาวน์

เครื่องมือทดสอบและเครื่องมือวัด

- Digital Impulse Analyzer (MIA BS)

ตารางที่ 4.7 ค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบชิ้นงาน

พารามิเตอร์	การตั้งค่า
อุณหภูมิ	31.4 °C
ความชื้น	54 %
เส้นผ่านศูนย์กลางอิเล็กโทรด	20 mm
ความถี่	50 Hz

หลังจากเสร็จสิ้นจากการทดสอบป้อนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ที่ 1 kV/s จนกระทั่งเกิดเบรกดาวน์ จากนั้นจึงนำผลการทดสอบทั้ง 5 ชิ้น ไปหาค่าเฉลี่ย ดังแสดงในตารางที่ 4.8

**ตารางที่ 4.8** ผลการทดสอบความทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric Strength)

ชั้นที่	ความหนาของฉนวน (mm)	แรงดันเบรกดาวน์ (kV)	E <sub>b</sub> (kV/mm)
1	1.61	30.08	18.68
2	1.64	34.44	21.00
3	2.2	41.12	18.70
4	2.53	48.30	19.32
5	2.51	46.54	18.54
ค่าเฉลี่ย	2.10	40.10	19.25

ตารางที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบความทนต่อแรงดันไฟฟ้าของชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบการวิเคราะห์หลังจากการทดสอบพบว่าฉนวนเรซิน มีค่าความทนต่อแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย  $E_b = 19.25 \text{ kV/mm}$  ซึ่งโดยปกติแล้วค่าความทนต่อแรงดันไฟฟ้ายิ่งสูงยิ่งเป็นฉนวนที่มีคุณภาพดี

#### 4.2.3 ผลการทดสอบความทนต่อแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์

การทดสอบนี้เพื่อหาค่าความทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน เป็นการทดสอบความทนทานของฉนวนฟิวส์สวิตช์แรงต่ำต่อแรงดันเกินเสิร์จฟ้าผ่า (Lightning Surge) การทดสอบนั้นจะทำการป้อนแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน  $1.2/50 \mu\text{s}$  จากนั้นจึงเพิ่มค่าระดับแรงดันขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเกิดการวาบไฟระหว่างฐานฟิวส์สวิตช์แรงต่ำและจุดต่อลงกราวด์ มีค่าพารามิเตอร์สำหรับการทดสอบดังตารางที่ 4.9

เครื่องมือทดสอบและเครื่องมือวัด

- Digital Impulse Analyzer (MIA BS)

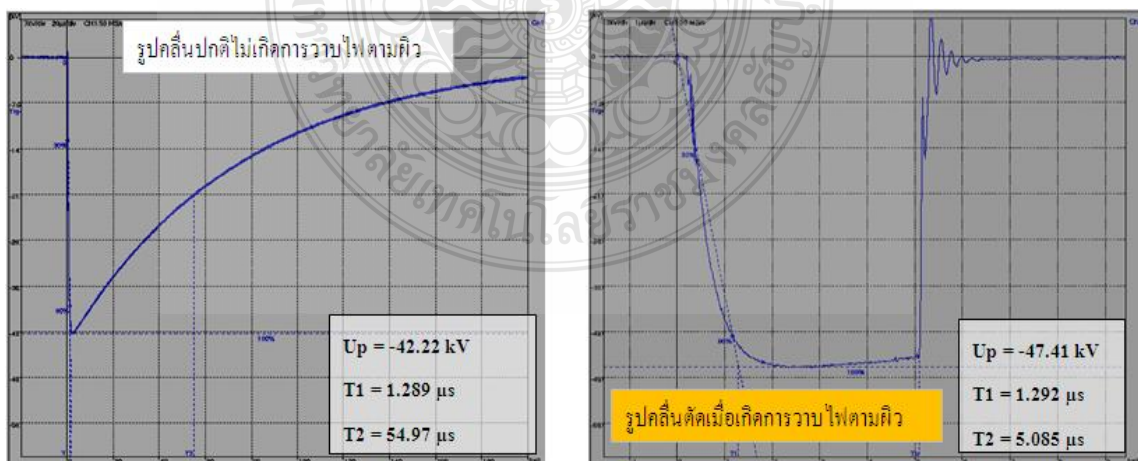
**ตารางที่ 4.9** ค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบชิ้นงาน

พารามิเตอร์	การตั้งค่า
อุณหภูมิ	33.6 °C
ความชื้น	48 %
ความถี่	50 Hz



รูปที่ 4.4 การจัดวางอุปกรณ์การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์เบรคดาวน์

จากการทดสอบดังรูปที่ 3.27 วงจรสมมูลของการสร้างแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้ามาตรฐาน ทำการต่อวัสดุและประกอบวงจรดังรูปที่ 4.4 ดำเนินการป้อนแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50  $\mu\text{s}$  โดยทำการทดสอบป้อนค่าระดับแรงดัน จนกระทั่งถึงระดับค่าสูงสุดที่วัสดุฉนวนสามารถทนได้คือ ไม่เกิดการวาบไฟตามผิว โดยสังเกตได้จากรูปคลื่นเต็ม หากเกิดวาบไฟตามผิวรูปคลื่นที่วัดได้จะเป็นรูปคลื่นตัด ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งเป็นการป้อนจำนวน 5 ครั้ง เสร็จแล้วเปรียบเทียบกับฉนวนชนิดอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.10



รูปที่ 4.5 รูปคลื่นปกติไม่เกิดการวาบไฟตามผิวและรูปคลื่นตัดเมื่อเกิดการวาบไฟต่อแรงดันอิมพัลส์

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์

ครั้ง	พอร์ชเลน (kV)	ยางธรรมชาติ 60:40 (kV)	เรซิน (kV)
1	36.36	36.45	42.48
2	36.38	36.31	42.28
3	36.40	36.59	42.15
4	36.48	36.67	42.22
5	36.44	36.79	41.96
ค่าเฉลี่ย	36.41	36.56	42.22

ตารางที่ 4.10 แสดงผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน 1.2/50  $\mu$ s ของวัสดุที่ได้จากการทดสอบการวิเคราะห์หลังจากการทดสอบพบว่าฉนวนเรซิน มีค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50  $\mu$ s สูงสุด 42.22 kV ซึ่งไม่ทำให้เกิดการวาบไฟหรือเกาะทะลุชิ้นงาน และเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดอื่นๆ พบว่าฉนวนเรซินสามารถทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานได้สูงสุด

#### 4.2.4 ผลการทดสอบหาค่า $U_{b50\%}$

จากการทดสอบดังรูปที่ 3.27 วงจรสมมูลของการสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน ทำการต่อวัสดุและประกอบวงจรดังรูปที่ 4.8 ดำเนินการป้อนแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน (ชั่วลบ) ป้อนเข้าไปให้กับวัสดุทดสอบ ถ้าหากไม่เกิดเบรกดาวน์ที่วัสดุทดสอบ ให้เพิ่มแรงดันขึ้น  $U_k + \Delta U$  แต่ถ้าเกิดเบรกดาวน์ที่วัสดุทดสอบที่แรงดัน ( $U_k$ ) ก็ให้ลดแรงดันเหลือเพียง  $U_k - \Delta U$  ดังนั้นค่าแรงดันที่ป้อนต่อไปจะขึ้นอยู่กับผลที่เกิดขึ้นจากการป้อนแรงดันครั้งที่ผ่านมา

เครื่องมือทดสอบและเครื่องมือวัด

- Digital Impulse Analyzer (MIA BS)

ตารางที่ 4.11 ค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบชิ้นงาน

พารามิเตอร์	การตั้งค่า
อุณหภูมิ	33.6 °C
ความชื้น	48 %

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบหาค่าแรงดันอิมพัลส์ 50% ด้วยวิธีปรับขึ้นลง (ขั้วลบ)

ครั้งที่	พอร์ชเลน (kV)		ยางผสม 60:40 (kV)		เรซิน (kV)	
	Break Down	Not Break Down	Break Down	Not Break Down	Break Down	Not Break Down
1		-36.03	-36.45		-44.77	
2	-36.59		-36.35			-43.85
3		-36.35		-35.52	-45.80	
4	-36.60		-35.78		-44.94	
5		-35.39		-35.51		-43.16
6		-35.97	-36.50		-44.33	
7	-36.36			-35.46		-44.11
8		-35.51	-36.38		-44.24	
9		-36.00		-35.52		-43.05
10	-36.86			-36.06	-44.59	
11	-36.45		-36.46			-42.90
12		-35.56	-36.25		-44.40	
13	-35.89			-35.91		-43.79
14		-35.60		-36.44	-44.93	
15	-36.33		-36.34			-43.00
16	-36.22			-36.47	-44.95	
17		-35.49	-36.86			-42.96
18	-36.00		-36.59			-43.73
19		-35.53		-36.42	-44.72	
20	-36.71		-36.77		-44.52	

วัสดุพอร์ชเลน

$$U_{50\%} = \frac{\sum n_v U_v}{\sum n} = \frac{-721.44}{20} = -36.072 \text{ kV}$$

วัสดุบางผสม 60:40

$$U_{50\%} = \frac{\sum n_v U_v}{\sum n} = \frac{-724.04}{20} = -36.202 \text{ kV}$$

วัสดุเรซิน

$$U_{50\%} = \frac{\sum n_v U_v}{\sum n} = \frac{-882.74}{20} = -44.137 \text{ kV}$$

ตารางที่ 4.12 แสดงผลการทดสอบหาค่าแรงดันอิมพัลส์ 50% ด้วยวิธีปรับขึ้น - ลง เพื่อหาค่าแรงดันเบรคดาวน์ 50% ( $U_{b50\%}$ ) ซึ่งเป็นค่าที่เกิดจากการเกิดเบรคดาวน์และไม่เกิดเบรคดาวน์ โดยการนำค่าทั้งสองมาคำนวณเพื่อหาค่าเฉลี่ยในการเกิดเบรคดาวน์ขึ้นที่ 50% ของการทดสอบ ซึ่งการวัดแรงดันอิมพัลส์มีความแตกต่างจากการวัดแรงดันกระแสตรงและกระแสสลับก็คือ การวัดแรงดันอิมพัลส์ไม่สามารถใช้วิธีค่อยๆ เพิ่มแรงดันสูงขึ้นจนกระทั่งเกิดการเบรคดาวน์ได้ แต่ต้องใช้อัตราการประจุให้กับตัวเก็บประจุแรงสูงของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ให้ได้แรงดันอัดประจุตามที่ต้องการก่อนแล้วจึงค่อยปล่อยประจุดีสชาร์จออกไป

จากการคำนวณค่าแรงดันอิมพัลส์ 50% ของฉนวนแต่ละชนิดคือ  $U_{b50\%}$  ของเซรามิกมีค่าเท่ากับ -36.072 kV ยางผสมมีค่าเท่ากับ -36.202 kV และเรซินมีค่าเท่ากับ -44.137 kV เมื่อทำการเปรียบเทียบกับฉนวนชนิดอื่นๆ แล้ว เรซินมีระดับค่าแรงดันอิมพัลส์ 50% สูงสุด

### 4.3 ผลการทดสอบเฉพาะแบบฟิวส์สวิตช์แรงต่ำตามมาตรฐาน IEC 60947-3

การทดสอบเฉพาะแบบมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบฟิวส์สวิตช์แรงต่ำที่ออกแบบมานั้น มีคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดหรือไม่ การทดสอบดังกล่าวจะมีลำดับการทดสอบ ดังนี้

#### 4.3.1 ผลการทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (Temperature Rise Test)

จากการทดสอบดังรูปที่ 3.29 จุดที่ทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น 8 จุด ทำการต่อวัสดุและประกอบวงจรดังรูปที่ 3.31 การติดตั้งและทดสอบวัดค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เครื่องกำเนิดกระแส 400 A และมีความถี่ 50 Hz ซึ่งเท่ากับพิกัดกระแสของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำใช้งานก็คือ กระแส 400 A 50 Hz ซึ่งฟิวส์สวิตช์ จะต้องอยู่ในสภาวะปิดวงจรดังกล่าวไว้ตามมาตรฐาน IEC 60947-3

ป้อนกระแสไฟฟ้าเท่ากับพิกัดกระแสใช้งานที่กำหนด (Rated Operational Currents,  $I_e$ ) สำหรับฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ โดยมีพิกัดสูงสุดเท่ากับ 400 A 50 Hz ผ่านฟิวส์สวิตช์แรงต่ำใช้สายตัวนำ

ขนาด 240 mm<sup>2</sup> ความยาวสายจากขั้วต่อสายแหล่งจ่ายถึงขั้วต่อสายฟิวส์สวิตช์แรงต่ำไม่น้อยกว่า 2 m ใช้เวลาในการป้อนกระแสไฟฟ้าทดสอบเป็นเวลา 3 ชั่วโมง และบันทึกค่าอุณหภูมิในแต่ละจุดดังรูปที่ 3.29 ทุกๆ 30 นาที เมื่อสิ้นสุดการทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของชิ้นส่วนต้องไม่เกินค่าที่กำหนด มีค่าพารามิเตอร์สำหรับการทดสอบดังตารางที่ 4.13

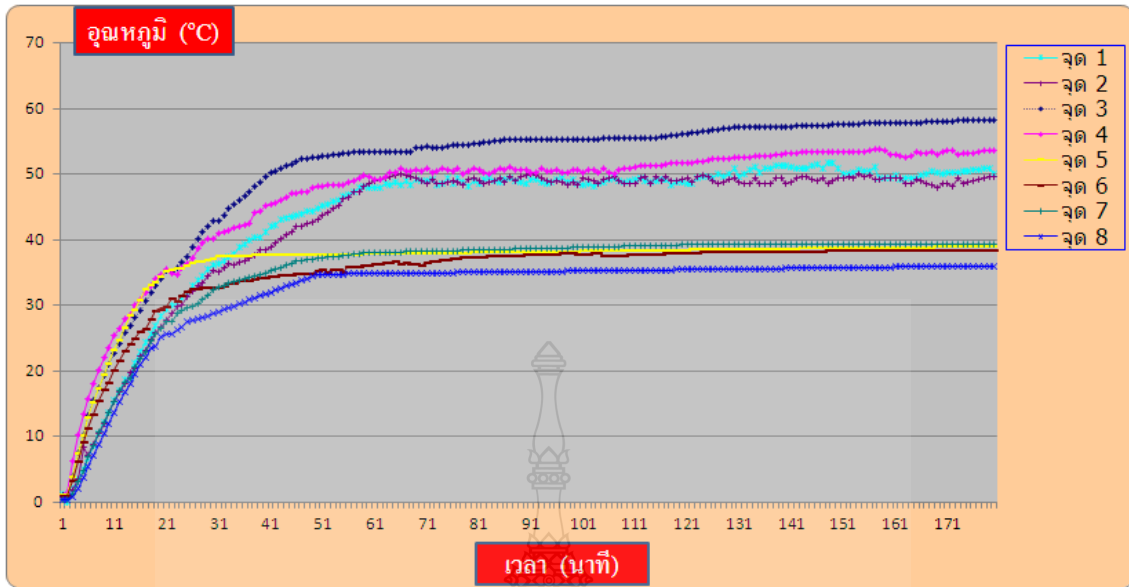
ตารางที่ 4.13 ค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบชิ้นงาน

พารามิเตอร์	การตั้งค่า
อุณหภูมิ	34.6 °C
ความชื้น	54 %
ความดัน	105 kPa

ตารางที่ 4.14 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเทียบกับระยะเวลาที่ทดสอบ

เวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ โดยรอบ (°C)	อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามจุดที่ทดสอบ (°C)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
0:00	31.0	0	0	0	0	0	0	0	0
0:30	32.7	36.2	35.3	42.9	40.2	37.1	32.8	32.3	28.7
1:00	34.0	48.3	48.5	56.8	51.7	37.9	37.2	38.3	34.8
1:30	34.4	48.6	48.8	56.9	52.5	38.2	37.7	38.6	35.1
2:00	34.6	49.9	49.1	57.5	52.8	38.5	38.0	39.0	35.4
2:30	34.7	50.1	49.4	57.8	53.5	38.8	38.4	39.1	35.7
3:00	34.8	50.8	49.7	58.5	53.6	39.1	38.5	39.2	36.0

ผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำฉนวนเรซิน แสดงดังตารางที่ 4.14 พบว่าค่าอุณหภูมิที่เพิ่มสูงสุดอยู่ที่จุด 3 เท่ากับ 58.5 °C ซึ่งเป็นจุดต่อระหว่างสายป้อนกับจุดต่อฉนวน โดยค่าอุณหภูมิดังกล่าวไม่เกินขีดจำกัดที่มาตรฐานกำหนด [3] จากตารางจะพบว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะมีค่าคงที่และเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 1 °C เมื่อเทียบกับเวลาต่อ 1 ชั่วโมง และอุณหภูมิเริ่มจะคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 90 นาที



รูปที่ 4.6 ผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทั้ง 8 จุด จากรูปที่ 3.29 ประกอบ

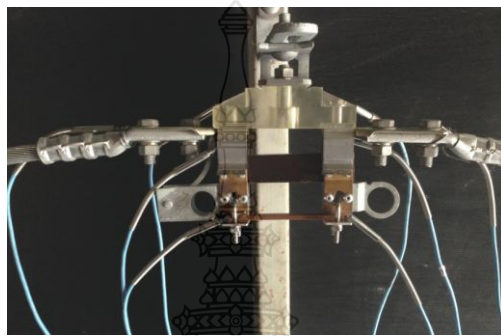
ผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของฟิวส์วิตซ์แรงต่ำฉนวนเรซิน แสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่า ค่าอุณหภูมิที่เพิ่มสูงสุดอยู่ที่จุด 3 ซึ่งเป็นจุดต่อระหว่างสายป้อนกับจุดต่อฉนวน โดยค่าอุณหภูมิดังกล่าวไม่เกินขีดจำกัดที่มาตรฐานกำหนด [3]

ตารางที่ 4.15 ผลการทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของแต่ละจุด

จุดที่ทดสอบ	อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (°C)	ขีดจำกัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (°C)	สถานะ
1	50.8	80	ผ่าน
2	49.7	80	ผ่าน
3	58.5	80	ผ่าน
4	53.6	80	ผ่าน
5	39.1	40	ผ่าน
6	38.5	40	ผ่าน
7	39.2	40	ผ่าน
8	36.0	40	ผ่าน



จากผลการทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของแต่ละจุดแสดงดังตารางที่ 4.15 และอุณหภูมิโดยรอบที่วัดได้เท่ากับ  $34.8^{\circ}\text{C}$  และเมื่อครบ 3 ชั่วโมง อุณหภูมิทุกจุดถึงค่าคงที่ตั้งแต่จุดที่ 1 ถึงจุดที่ 8 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่ำกว่าขีดจำกัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจึงผ่านการทดสอบและเป็นไปตามมาตรฐาน และจุดที่ 1 – 4 คือจุดต่อระหว่างสายป้อนกับจุดต่อฉนวนซึ่งมีอุณหภูมิที่สูง ส่วนจุดที่ 5 - 8 คือจุดของหน้าสัมผัสและที่ยึดพิวส์แรงต่ำมีอุณหภูมิที่ต่ำเนื่องจากฉนวนเรซินช่วยกระจายความร้อนออกไปด้วย



#### รูปที่ 4.7 การติดตั้งเซนเซอร์สำหรับการทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

#### 4.3.2 ผลการทดสอบสมบัติทางไดอิเล็กตริก (Dielectric Properties)

##### 1) ผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์

จากการทดสอบดังรูปที่ 3.27 วงจรสมมูลของการสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน ทำการต่อวัสดุและประกอบวงจรดังรูปที่ 3.28 การทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ การทดสอบความทนทานของฉนวนพิวส์สวิตช์แรงต่ำแรงดันเกินเสิร์จฟ้าผ่า (Lightning Surge) การทดสอบนั้นจะทำการป้อนแรงดันอิมพัลส์  $1.2/50 \mu\text{s}$  จำนวน 5 ครั้ง สำหรับแต่ละตำแหน่งการป้อนห่างกันไม่น้อยกว่า 1 วินาที ที่ระดับแรงดันอิมพัลส์  $14.8 \text{ kV}$  สำหรับตำแหน่งการป้อนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าระหว่างจุด A กับจุด B จุด A กับจุด C และจุด B กับจุด C โดยทำการป้อนแรงดันดังกล่าวระหว่างจุดต่อขั้วไฟฟ้าของพิวส์สวิตช์แรงต่ำ กับจุดต่อลงดินหรือจุดยึดฐานพิวส์สวิตช์แรงต่ำกับคอนเสาไฟฟ้าดังรูปที่ 4.8 และค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบชิ้นงาน ดังตารางที่ 4.16



รูปที่ 4.8 วงจรทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50  $\mu$ s

ตารางที่ 4.16 ค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบชิ้นงาน

พารามิเตอร์	การตั้งค่า
อุณหภูมิ	33.4 °C
ความชื้น	48 %
ความดัน	103 kPa

จากการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50  $\mu$ s ที่ระดับแรงดันอิมพัลส์ 14.8 kV สำหรับตำแหน่งการป้อนแรงดันอิมพัลส์ ระหว่างจุด A กับจุด B จุด A กับจุด C และจุด B กับจุด C จำนวน 5 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4.17 4.18 และ 4.19 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.17 ผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน 1.2/50  $\mu$ s (ที่จุด A, B)

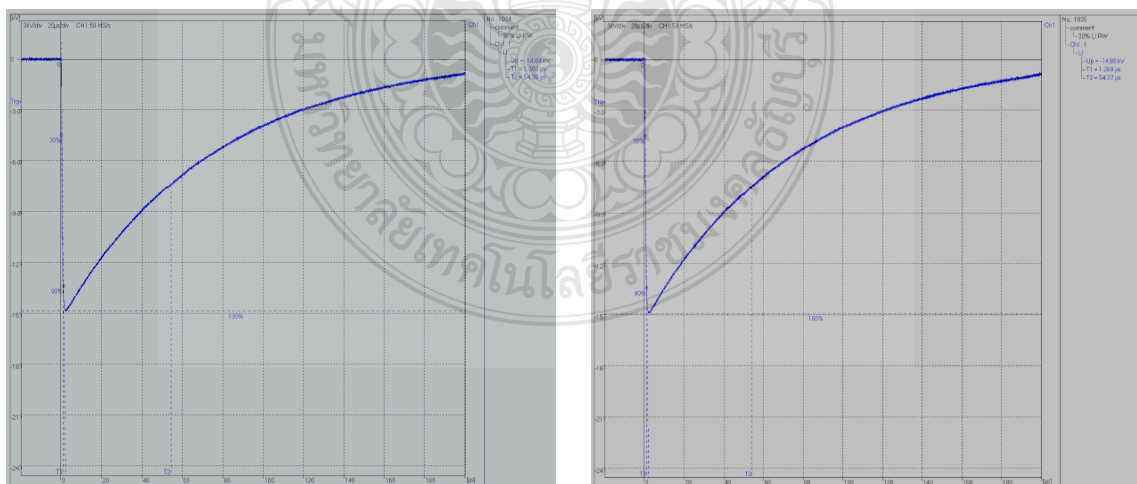
ครั้งที่	ค่าแรงดันยอด (kV)	เวลาหน้าคลื่น ( $\mu$ s)	เวลาหางคลื่น ( $\mu$ s)
1	14.73	1.299	54.58
2	14.75	1.287	54.53
3	14.71	1.291	54.44
4	14.85	1.296	55.48
5	14.81	1.288	54.57
เฉลี่ย	14.77	1.292	54.72

**ตารางที่ 4.18** ผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน 1.2/50  $\mu\text{s}$  (ที่จุด A, C)

ครั้งที่	ค่าแรงดันยอด (kV)	เวลาน้ำกลิ้ง ( $\mu\text{s}$ )	เวลาหางคลื่น ( $\mu\text{s}$ )
1	14.79	1.288	54.6
2	14.84	1.303	54.39
3	14.88	1.289	54.37
4	14.87	1.303	55.31
5	14.84	1.281	54.67
เฉลี่ย	14.84	1.293	54.67

**ตารางที่ 4.19** ผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน 1.2/50  $\mu\text{s}$  (ที่จุด B, C)

ครั้งที่	ค่าแรงดันยอด (kV)	เวลาน้ำกลิ้ง ( $\mu\text{s}$ )	เวลาหางคลื่น ( $\mu\text{s}$ )
1	14.89	1.298	55.21
2	14.86	1.283	54.12
3	14.72	1.291	54.64
4	14.83	1.292	55.03
5	14.77	1.279	54.59
เฉลี่ย	14.81	1.289	54.718

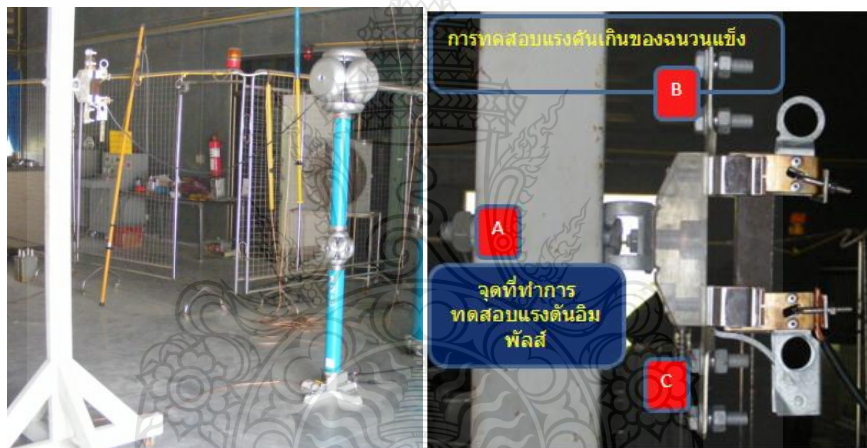


**รูปที่ 4.9** รูปคลื่นการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน 1.2/50  $\mu\text{s}$

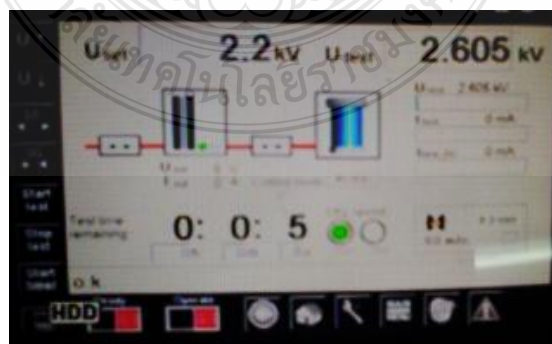
จากตารางที่ 4.17 – 4.19 คือผลการทดสอบฟิวส์สวิตช์แรงต่ำฉนวนเรซินด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน 1.2/50  $\mu\text{s}$  ซึ่งมีระดับแรงดันอิมพัลส์เฉลี่ยที่ 14.81 kV มีเวลาหน้าคลื่นเฉลี่ยที่ 1.291  $\mu\text{s}$  และมีเวลาหลังคลื่นเฉลี่ยที่ 54.70  $\mu\text{s}$  เป็นไปตามข้อกำหนด นอกจากนี้ฉนวนเรซินสามารถคงทนต่อระดับแรงดันตามมาตรฐานกำหนด โดยไม่ทำให้เกิดการวาบไฟตามผิว (Flashover) หรือเกิดการเบรคดาวน์ (Breakdown) ที่ฐานฟิวส์สวิตช์แรงต่ำแต่อย่างใด

2) ผลการทนทานต่อแรงดันเกินของฉนวนแข็ง

การทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกินของฉนวนแข็งด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำ ที่ระดับแรงดัน 2.2 kVrms เป็นเวลา 5 วินาที โดยทำการป้อนแรงดันดังกล่าว ระหว่างจุดต่อขั้วไฟฟ้าของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ กับจุดต่อลงดินหรือจุดยึดฐานฟิวส์สวิตช์แรงต่ำกับคอนเสาไฟฟ้า (B-A) ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 การจัดวางอุปกรณ์การทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกินกระแสสลับของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำฉนวนเรซิน



รูปที่ 4.11 การทดสอบความทนต่อแรงดันเกินของฉนวนที่ระดับแรงดัน 2.2 kVrms

จากการทดสอบโดยการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 2.2 kVrms เป็นเวลา 5 วินาที ระหว่างจุด A กับจุด B จุด A กับจุด C และจุด B กับจุด C ในระหว่างการทดสอบและหลังการทดสอบ ไม่ทำให้เกิดการวาบไฟตามผิว (Flashover) หรือเกิดการเบรคดาวน์ (Breakdown) ที่ฐานฟิวส์สวิตช์ แรงต่ำแต่อย่างใด

#### 4.3.4 ผลการทวนสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (Temperature Rise Verification)

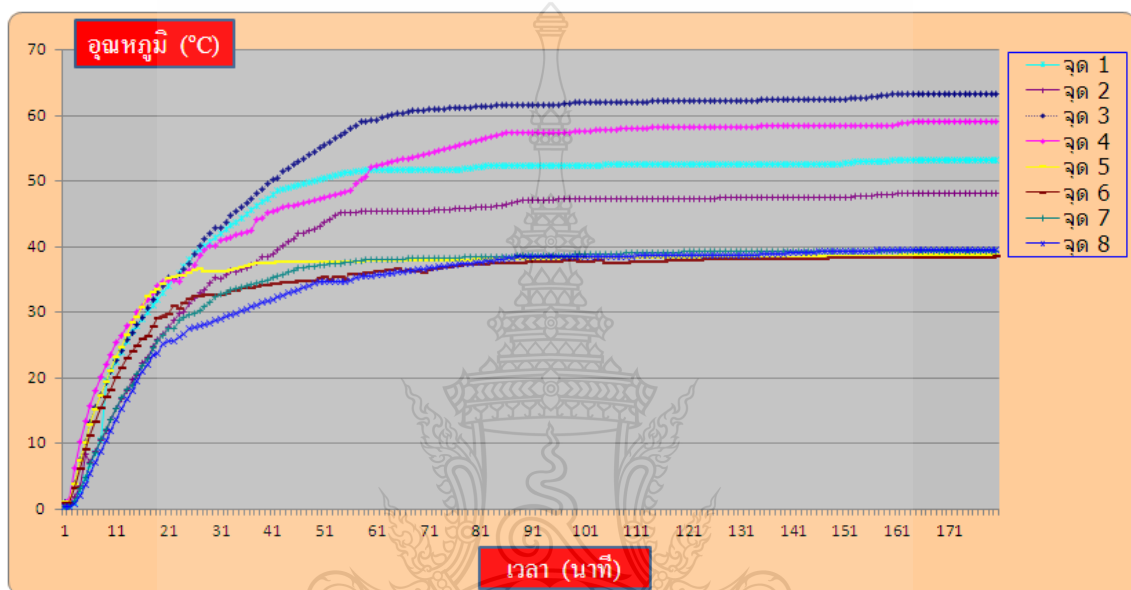
การทวนสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น คือ การนำชิ้นส่วนมาทำการทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และนำชิ้นส่วนชุดเดิมไปทดสอบการทดสอบเฉพาะแบบในหัวข้ออื่นๆ จากนั้นนำชิ้นส่วนชุดเดิมมาทำการทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอีกครั้ง ซึ่งจะใช้การทดสอบดังรูปที่ 3.29 จุดที่ทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น 8 จุด ทำการต่อวัสดุและประกอบวงจรดังรูปที่ 3.31 การติดตั้งและทดสอบวัดค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เครื่องกำเนิดกระแส 400 A และมีความถี่ 50 Hz ซึ่งเท่ากับพิกัดกระแสของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำใช้งานก็คือ กระแส 400 A 50 Hz ซึ่งฟิวส์สวิตช์ จะต้องอยู่ในสภาวะปิดวงจรดังกล่าวไว้ตามมาตรฐาน IEC 60947-3 ขั้วต่อสายและชิ้นส่วนที่สามารถเข้าถึงได้จะต้องมีค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นไม่เกินขีดจำกัดที่กำหนด

ดำเนินการทวนสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นกระแสพิกัด 400 A เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (180 นาที) และทำการติดตั้งเสมือนจริง สำหรับทวนสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น โดยติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ฟิวส์สวิตช์แรงต่ำจำนวน 8 จุด เหมือนเดิม

#### ตารางที่ 4.20 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเทียบกับระยะเวลาที่ทวนสอบ

เวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ โดยรอบ (°C)	อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามจุดที่ทดสอบ (°C)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
0:00	33	0	0	0	0	0	0	0	0
0:30	34.1	44.9	35.2	52.7	42.3	36.4	27.4	33.7	30.1
1:00	34.3	51.8	45.4	59.2	50.7	37.9	35.2	34.9	35.6
1:30	34.1	52.4	47.1	61.7	57.5	38.2	37.3	38.0	38.4
2:00	34.1	52.6	47.4	62.2	58.3	38.5	37.7	38.5	38.7
2:30	34.3	52.6	47.6	62.5	58.5	38.6	38.3	38.9	39.3
3:00	34.3	53.1	48.2	63.4	59.1	38.8	38.6	39.2	39.6

ผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำฉนวนเรซิน แสดงดังตารางที่ 4.20 พบว่า ค่าอุณหภูมิที่เพิ่มสูงสุดอยู่ที่จุด 3 เท่ากับ 63.4 °C ซึ่งเป็นจุดต่อระหว่างสายป้อนกับจุดต่อฉนวน โดย ค่าอุณหภูมิดังกล่าวไม่เกินขีดจำกัดที่มาตรฐานกำหนด [3] จากตารางจะพบว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะมี ค่าคงที่และเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 1 °C เมื่อเทียบกับเวลาต่อ 1 ชั่วโมงและอุณหภูมิเริ่มจะคงที่เมื่อเวลา ผ่านไป 90 นาที



รูปที่ 4.12 ผลการทวนสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทั้ง 8 จุด จากรูปที่ 3.29 ประกอบ

จากรูปที่ 4.12 ผลการทวนสอบอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำฉนวนเรซิน พบว่า ค่า อุณหภูมิที่เพิ่มสูงสุดอยู่ที่จุด 3 เหมือนเดิม แต่มีอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการทดสอบอุณหภูมิที่ เพิ่ม จาก 58.5 °C เป็น 63.4 °C คิดเป็น 7.73% แต่ค่าอุณหภูมิดังกล่าวไม่เกินขีดจำกัดที่มาตรฐาน กำหนด [3]



ตารางที่ 4.21 ผลการทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของแต่ละจุด

จุดที่ทดสอบ	อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (°C)	ขีดจำกัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (°C)	สถานะ
1	53.1	80	ผ่าน
2	48.2	80	ผ่าน
3	63.4	80	ผ่าน
4	59.1	80	ผ่าน
5	39.6	40	ผ่าน
6	38.6	40	ผ่าน
7	39.2	40	ผ่าน
8	38.8	40	ผ่าน

จากผลการทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของแต่ละจุดแสดงดังตารางที่ 4.21 และอุณหภูมิโดยรอบที่วัดได้เท่ากับ 34.3 °C และเมื่อครบ 3 ชั่วโมง อุณหภูมิทุกจุดถึงค่าคงที่ตั้งแต่จุดที่ 1 ถึงจุดที่ 8 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่ำกว่าขีดจำกัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจึงผ่านการทดสอบและเป็นไปตามมาตรฐาน และจุดที่ 1 – 4 คือจุดต่อระหว่างสายป้อนกับจุดต่อฉนวนซึ่งมีอุณหภูมิที่สูง ส่วนจุดที่ 5 - 8 คือจุดของหน้าสัมผัสและที่ยึดฟิวส์แรงต่ำมีอุณหภูมิที่ต่ำเนื่องจากฉนวนเรซินช่วยกระจายความร้อนออกไปด้วย

#### 4.4 สรุป

จากผลการออกแบบและทดสอบฉนวนเรซินสำหรับฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ เพื่อใช้เป็นแนวทางการศึกษา สำหรับการนำฉนวนดังกล่าวไปใช้ทดแทน ฉนวนแบบเซรามิกที่ใช้ในปัจจุบัน จากการศึกษาพบว่าฉนวนเรซิน มีคุณสมบัติคงทนต่อสภาวะทางกลตามมาตรฐาน D2240 D412 และ D149 อีกทั้งยังมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC 60947-3 เทียบเคียงฉนวนแบบเซรามิก โดยฉนวนเรซินที่ออกแบบมีคุณสมบัติทางกล คือ มีความแข็ง  $82 \pm 1$  Shore D รับแรงดึงได้สูงสุด  $37.89 \pm 4.5$  Mpa. และมีเปอร์เซ็นต์การยึดตัว  $500.7 \pm 24.25$  ตามลำดับ และมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าคือ มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz สูงสุด 19.25 kV/mm มีความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50  $\mu$ s ที่ระดับแรงดันสูงสุด 42.22 kV สามารถผ่านการทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกินของฉนวนแข็งตามมาตรฐานกำหนด และมีคุณสมบัติผ่านการทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเป็นอย่างดี

ดังนั้น จากผลการศึกษาวเคราะห์คุณสมบัติดังกล่าว จึงมั่นใจได้ว่า ฉนวนเรซินสามารถนำไปใช้ทดแทนฉนวนแบบเซรามิกสำหรับฟิวส์สวิตช์แรงต่ำได้อย่างเหมาะสม และในส่วนของ การทดสอบแบบติดตั้งใช้งานจริงรวมทั้งการทดสอบอายุการใช้งานนั้น คณะผู้วิจัยกำลังดำเนินการศึกษาและพัฒนาในขั้นตอนต่อไป





## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากผลการทดสอบฉนวนสำหรับฟิวส์สวิตช์แรงต่ำและการทดสอบฟิวส์สวิตช์ที่ฉนวนทำจากเรซิน ตามมาตรฐาน IEC 60947-3 เป็นการทดสอบความเป็นไปได้ที่จะนำเรซิน มาทำเป็นฉนวนไฟฟ้าที่จะนำไปติดตั้งกับชุดฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ โดยสามารถสรุปผลได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผล

5.1.1 การทดสอบคุณสมบัติทางกลและทางไฟฟ้าของวัสดุฉนวน ไม่ว่าจะเป็นการทดสอบผลกระทบต่อความร้อน ผลกระทบต่อน้ำมันและสารเคมี ผลการทดสอบที่ได้ทำให้ทราบถึงความทนทานของเรซินว่าใช้งานได้จริง และสามารถใช้อ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นต่อไป

5.1.2 การทดสอบค่าคงที่การฉนวนและค่าสูญเสียของการฉนวนของเรซิน ความทนทานต่อแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจากการทดสอบค่าคงที่การฉนวนมีค่าเท่ากับ  $3.20 \pm 0.02$  ค่าสูญเสียทางไดอิเล็กตริกมีค่าเท่ากับ  $0.0273 \pm 0.005$  ความทนทานต่อแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 19.25 kV และมีค่าความคงทนสูงสุด 42.22 kV โดยแสดงผลการทดสอบเป็นรูปคลื่นอิมพัลส์แบบเต็มคลื่น

5.1.3 การทดสอบเฉพาะแบบฟิวส์สวิตช์แรงต่ำที่ฉนวนทำจากเรซิน ตามมาตรฐาน IEC 60947-3

1) การทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ฟิวส์สวิตช์แรงต่ำที่ฉนวนทำจากเรซิน มีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นไม่เกินขีดจำกัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60947-3

2) การทดสอบสมบัติทางไดอิเล็กตริก ฟิวส์สวิตช์แรงต่ำที่ฉนวนทำจากเรซิน ผ่านการทดสอบการทนสอบความทนต่อแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50  $\mu$ s ที่ค่าแรงดัน 14.8 kV และการทดสอบการทนสอบความทนทานต่อแรงดันเกินของฉนวนแข็งที่แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 2,200 Vrms. โดยไม่เกิดการวาวไฟตามผิว การเบรกดาวน์ของฉนวนแต่อย่างใด

5.1.4 ข้อสำคัญของเรซินคือ มีกระบวนการผลิตที่ง่าย ราคาไม่แพงและสามารถลดน้ำหนักลงได้ประมาณ 44 % เมื่อเทียบกับวัสดุเดิม

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการออกแบบตัวฉนวนสำหรับฟิวส์สวิตช์แรงต่ำควรมีการปรับปรุงการกระจายความร้อนของตัวฉนวนให้มากกว่าเดิม เพื่อให้ฉนวนกระจายความร้อนมากกว่านี้

5.2.2 มีเรซิน อีกหลายชนิดที่น่าสนใจนำมาศึกษาในการเพิ่มเสถียรภาพของระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลังด้านแรงต่ำ เช่น อีพ็อกซี ยางพารา และ เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ เป็นต้น

### 5.3 ปัญหาในการทดสอบและข้อยกเว้น

5.3.1 การแตกของเรซินหลังจากถอดออกจากแม่พิมพ์เนื่องจากใส่ตัวทำแข็งเยอะเกินไป

5.3.2 การทดสอบบางประเภทไม่สามารถทดสอบได้ภายในประเทศไทยและมีค่าใช้จ่ายสูง เช่น Making and Breaking Capacities, Operational Performance, Conditional Short Circuit Current and Overload Test ตามลำดับ



## รายการอ้างอิง

- [1] นิตติพงษ์ ปานกลาง อนุรักษ์ พันธุ์คง และกฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์ “การออกแบบฉนวนยางธรรมชาติสำหรับฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 35 (EECON-35), 12 – 14 ธันวาคม 2555.
- [2] A.B.J Reece and T.W. Preston, “Finite Element Methods in Electrical Power Engineering”, Oxford University Press Inc., New York, 2000
- [3] IEC 60947-3, " Low – Voltage Switchgear and Control Gear – Part 3: Switch, Disconnectors, Switch –Disconnectors and Fuse-Combination Units”, Edition 2.2, 2005
- [4] Amnart Suksri., “Surface Tracking of Electrical Insulation Test via Inclined Plane Method”, KKU Engineering Journal Vol.31 No.1 (45-57) January-March 2004.
- [5] ASTM D2240 - 05 Standard Test Method for Rubber Property - Durometer Hardness, Book of Standards Volume: 09.01, 2010
- [6] ASTM D412 – 06a Standard Test Method for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomer – Tension, Book of Standards Volume: 09.01, 2013
- [7] ASTM D149 - 09 Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials at Commercial Power Frequencies, Book of Standards Volume: 10.01, 2013
- [8] ASTM D150 - 11 Standard Test Methods for AC Loss Characteristics and Permittivity (Dielectric Constant) of Solid Electrical Insulation, Book of Standards Volume: 10.01, 2013
- [9] ISO188:2007 Rubber, Vulcanized or Thermoplastic -Accelerated Ageing and Heat Resistance Tests, 4<sup>th</sup> Edition, 2007
- [10] ISO1817:2011 Rubber, Vulcanized or Thermoplastic - Determination of the Effect of Liquids, 4<sup>th</sup> Edition, 2007
- [11] สำรวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, พิมพ์ครั้งที่ 3, มีนาคม 2549
- [12] วรวิทย์ จันท์สุวรรณ “วิชาเคมีประยุกต์” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, 2554
- [13] คุณสมบัติของเรซิน “การสืบค้นข้อมูลทางอินเทอร์เน็ต” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <https://www.muikwang.com>, 2553. [สืบค้นเมื่อ 10 พฤษภาคม 2555]

## รายการอ้างอิง (ต่อ)

- [14] รักษาดิ ชัยวิเศษ ชลดา เกสร “การศึกษาเบื้องต้นถึงการทดสอบฟิวส์สวิตช์แรงต่ำตามมาตรฐาน IEC” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2554
- [15] รศ.ดร. จตุพร วุฒิกนกกาญจน์ “Polymer Characterization and Analysis” คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี(มจธ), 2012





**ภาคผนวก**



EPM0660/56

**Report of Sample Analysis**

**Issued Date** : 2 July 2013  
**Customer** : Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
 39 Muhi, Rangsit-Nakhonnayok RD., Klong Hok,  
 Thanyaburi, Pathum Thani 12110  
 Tel : 0 2549 4990-2 Fax : 0 2549 4993  
**Serviced by** : Electrical Properties Measurement Laboratory,  
 Analytical and Testing Research Unit,  
 National Metal and Materials Technology Center  
**Date received** : 27 June 2013  
**Date analyzed** : 1 July 2013  
**Sample** : Resin  
**Identification no.** : No data from the customer  
**Instruments** : Precision Impedance Analyzer (4294A)  
 Dielectric Test Fixture (HP 16451B)  
**Test method** : Dielectric Constant and Dissipation Factor  
**Conditions** : Temperature 23°C  
 Relative Humidity 50%  
 Diameter of Electrode 38 mm  
 Frequency 1MHz  
 ASTM standard D 150

**Sample Preparation and measurement procedures :**

- The surface of the specimen was cleaned with alcohol and dried before testing.
- The specimen thickness was measured.
- The specimens had been left at the temperature of  $23^{\circ}\text{C} \pm 0.2^{\circ}\text{C}$  and  $50\% \pm 2\%$  relative humidity for 48 hrs.
- The capacitance was measured at the frequency of 1MHz.
- The dielectric constant ( $\epsilon_r$ ) and Dissipation Factor (D) were determined.

EPM0660/56

1/2

**Results :**

Specimen	Dielectric Constant ( $\epsilon_r$ ) $\pm$ SD	Dissipation Factor (D) $\pm$ SD
Resin	3.20 $\pm$ 0.02	0.0273 $\pm$ 0.0005

**Interpretation/Opinions :** None

**Work performed by :**



(Mr. Bundit Putasang)  
Scientific Officer 2

**Approved by:**




(Dr. Teerapon Yamwong)  
Researcher 2

**Remarks**


1. MTEC does not allow any alteration or modification of this report, or any part of this report, without prior formal written permission from MTEC.
2. MTEC will not accept liability for any damage whatsoever, resulting directly or indirectly, from using data, results, conclusions or recommendations in this report for the purpose of designing, manufacturing or for other purposes.
3. Experimental results are only valid for the specimens tested.

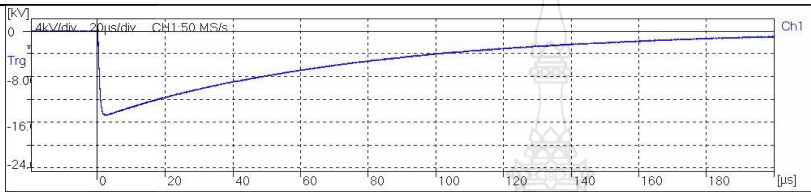
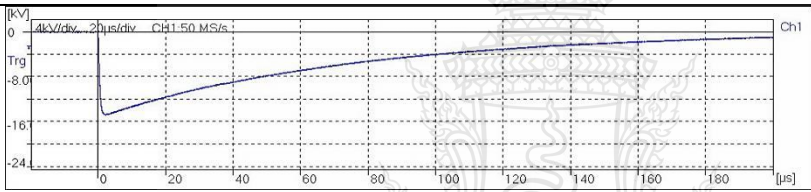
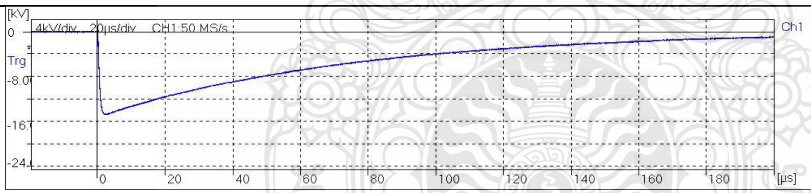
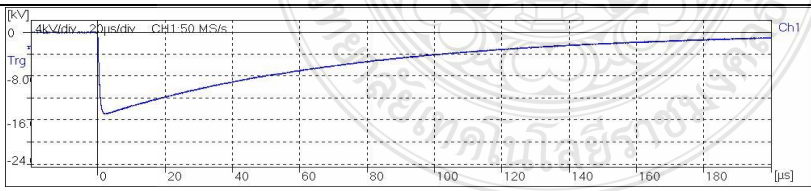
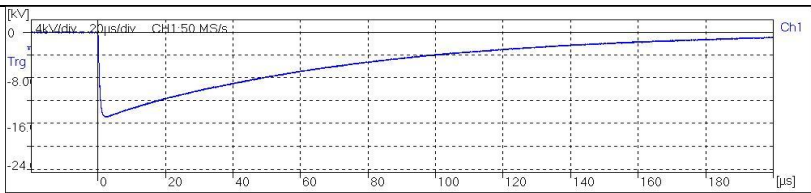



Project	Protocol		
LT_SW1	LI 14.8-kV Negative Polarity B-A		
Inspector:		Date:	
RMUTT-highvoltage		19/01/2014	

### **Impulse Test: LT1**

LI – LIGHTNING IMPULSE			
No.	Ut/Up [kV]	T1 [μs]	T2/Tc [μs]
1039	-14.73	1.299	54.58
1040	-14.75	1.287	54.53
1041	-14.71	1.291	54.44
1042	-14.85	1.296	55.48
1043	-14.81	1.288	54.57


Inspector :	RMUTT-highvoltage	
Project:	LT_SW1	
Page:	2/2	
Date:	20/12/2013	

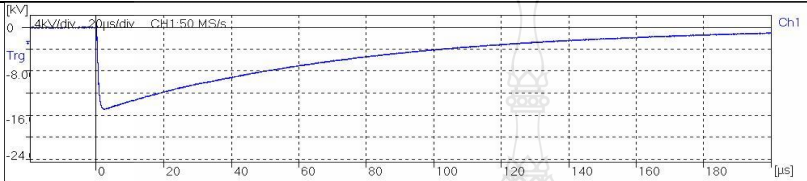
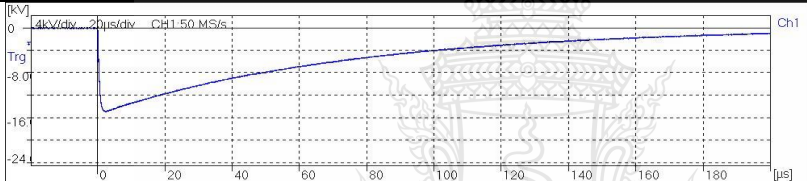
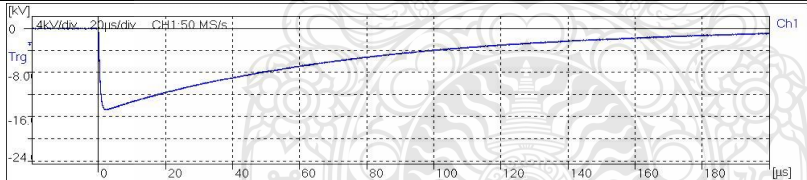
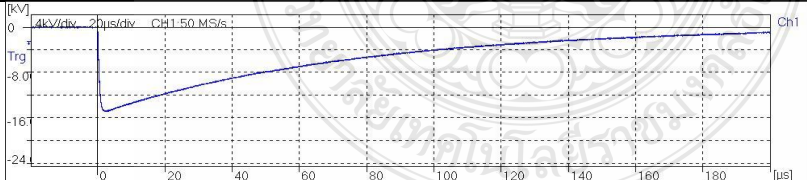
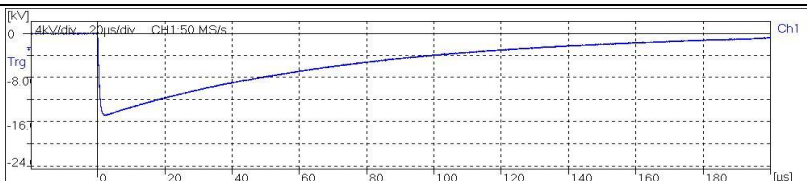
<b>LI-Lightning Impulse Pictures</b>	
 <p><b>30% LI RW</b></p>	No. = 1039 Ut/Up = -14.73 kV T1 = 1.299 $\mu$ s T2/Tc = 54.58 $\mu$ s
 <p><b>30% LI RW</b></p>	No. = 1040 Ut/Up = -14.75 kV T1 = 1.287 $\mu$ s T2/Tc = 54.53 $\mu$ s
 <p><b>30% LI RW</b></p>	No. = 1041 Ut/Up = -14.71 kV T1 = 1.291 $\mu$ s T2/Tc = 54.44 $\mu$ s
 <p><b>30% LI RW</b></p>	No. = 1042 Ut/Up = -14.85 kV T1 = 1.296 $\mu$ s T2/Tc = 55.48 $\mu$ s
 <p><b>30% LI RW</b></p>	No. = 1043 Ut/Up = -14.81 kV T1 = 1.288 $\mu$ s T2/Tc = 54.57 $\mu$ s


Project	Protocol		
LT_SW1	LI 14.8-kV Negative Polarity B-C		
Inspector: RMUTT-highvoltage			Date: 19/01/2014

### Impulse Test: LT1

LI – Lightning Impulse			
No.	Ut/Up [kV]	T1 [μs]	T2/Tc [μs]
1048	-14.89	1.298	55.21
1049	-14.86	1.283	54.12
1050	-14.72	1.291	54.64
1051	-14.83	1.292	55.03
1052	-14.77	1.279	54.59


Inspector:	RMUTT-highvoltage	
Project:	LT_SW1	
Page:	103 / 9	
Date:	19/01/2014	

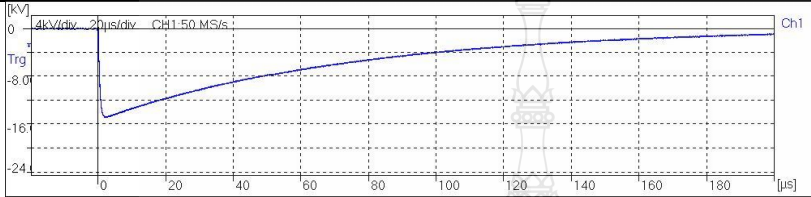
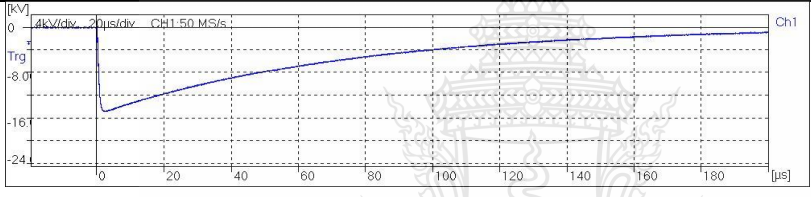
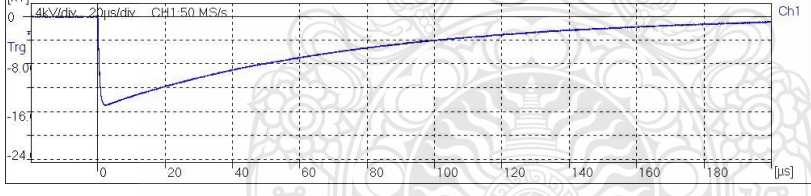
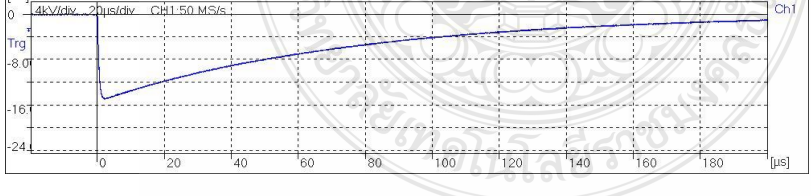
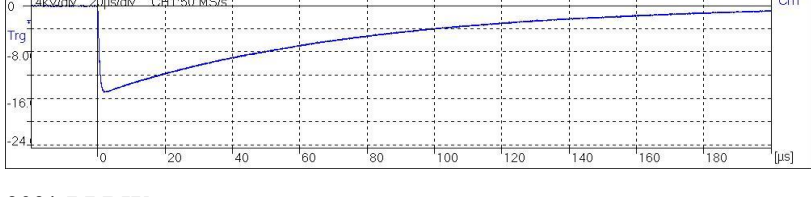
<b>LI-Lightning Impulse Pictures</b>	
	No. = 1048  Ut/Up = -14.89 kV  T1 = 1.298 μs  T2/Tc = 55.21 μs
<b>30% LI RW</b>	
	No. = 1049  Ut/Up = -14.86 kV  T1 = 1.283 μs  T2/Tc = 54.12 μs
<b>30% LI RW</b>	
	No. = 1050  Ut/Up = -14.72 kV  T1 = 1.291 μs  T2/Tc = 54.64 μs
<b>30% LI RW</b>	
	No. = 1051  Ut/Up = -14.83 kV  T1 = 1.292 μs  T2/Tc = 55.03 μs
<b>30% LI RW</b>	
	No. = 1052  Ut/Up = -14.77 kV  T1 = 1.279 μs  T2/Tc = 54.59 μs
<b>30% LI RW</b>	

Project LT_SW1	Protocol	
	LI 14.8-kV Negative Polarity C-A	
Inspector: RMUTT-highvoltage		Date: 19/01/2014

### **Impulse Test: LT1**

LI – Lightning Impulse			
No.	Ut/Up [kV]	T1 [μs]	T2/Tc [μs]
1033	-14.79	1.288	54.60
1034	-14.84	1.303	54.39
1035	-14.88	1.289	54.37
1036	-14.87	1.303	55.31
1037	-14.84	1.281	54.67

Inspector:	RMUTT-highvoltage	
Project:	LT_SW1	
Page:	105 / 9	
Date:	19/01/2014	

<b>LI-Lightning Impulse Pictures</b>	
 <p><b>30% LI RW</b></p>	<p>No. = 1033</p> <p>Ut/Up = -14.79 kV</p> <p>T1 = 1.288 μs</p> <p>T2/Tc = 54.60 μs</p>
 <p><b>30% LI RW</b></p>	<p>No. = 1034</p> <p>Ut/Up = -14.84 kV</p> <p>T1 = 1.303 μs</p> <p>T2/Tc = 54.39 μs</p>
 <p><b>30% LI RW</b></p>	<p>No. = 1035</p> <p>Ut/Up = -14.88 kV</p> <p>T1 = 1.289 μs</p> <p>T2/Tc = 54.37 μs</p>
 <p><b>30% LI RW</b></p>	<p>No. = 1036</p> <p>Ut/Up = -14.87 kV</p> <p>T1 = 1.303 μs</p> <p>T2/Tc = 55.31 μs</p>
 <p><b>30% LI RW</b></p>	<p>No. = 1037</p> <p>Ut/Up = -14.84 kV</p> <p>T1 = 1.281 μs</p> <p>T2/Tc = 54.67 μs</p>



**การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ  
พลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6**

**The 6<sup>th</sup> Thailand Renewable Energy for Community Conference**

**TREC-6**  
**13-15 พฤศจิกายน 2556**  
**ณ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม**

CP ไฟฟ้าชุมชน  
CF เชื้อเพลิงชุมชน  
CT ความร้อนชุมชน  
EC การประหยัดพลังงาน  
CE สิ่งแวดล้อมชุมชน





คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิตรวจสอบทางวิชาการ

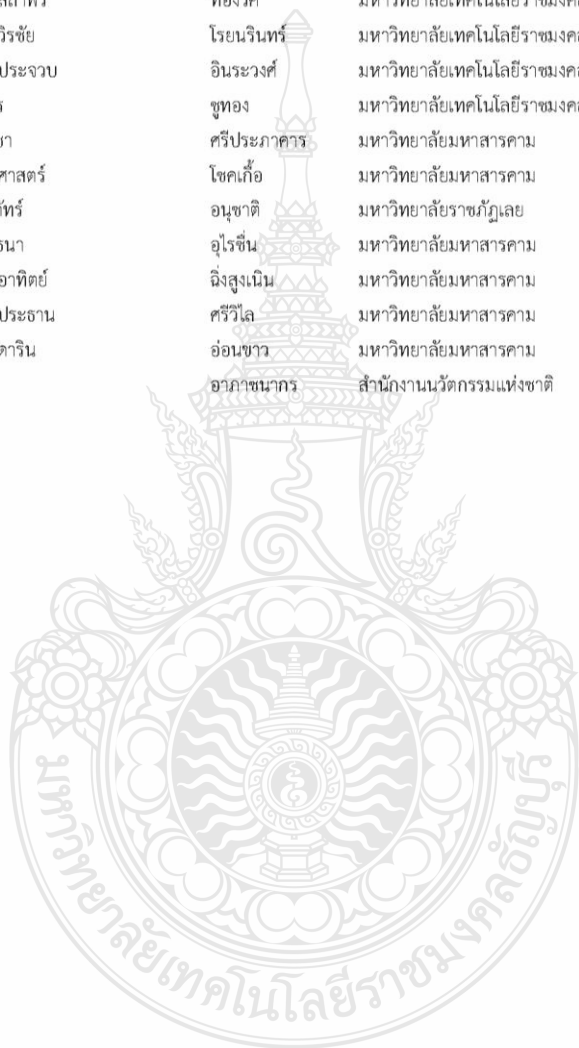
การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 6

ชื่อ	สกุล	มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.สิงห์ทอง	พัฒนเศรษฐานนท์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ อีร์พจน์	พุทธวิภูภักดิ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ศักดิ์เดช	สังคพัฒน์	มหาวิทยาลัยราชภัฏกาฬสินธุ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมตะ	ทัศนภักดิ์	มหาวิทยาลัยศรีประทุม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิสิษฐ์	มณีโชติ	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรกริ	ศรีรินทร์ฉัตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาณุ	ประทุมเนตรรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์	ภูมิภักดีพิชญ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อำนาจ	เรืองวาริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วารุณี	อริยวิริยะนันท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์	เกตุจ้อย	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสิทธิ์	ธนรักษ์	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิสิษฐ์	มณีโชติ	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณุช	แจ่งสว่าง	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรรงค์	เหล่าสุวรรณ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต	กฤษดาคม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนิรุท	มุกกันณ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุสรณ์	แสงประจักษ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วีระวุฒิ	อรุณวรรณะ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง	ปลั่งกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศุภกิจ	วรศิลป์ชัย	ศูนย์เทคโนโลยีโลหะแห่งชาติ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัฒนาพล	มีนา	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ ดร.รัฐศักดิ์	พรหมมาศ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ดร.กิตติศักดิ์	วิธินันท์กิตติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อาจารย์ ดร.บวรกิตติ	เนคมานุรักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ดร.ศุภชัย	ฤทธิเจริญวิทย์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ ดร.ปรเมษฐ์	จันทร์เพ็ญ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ ดร.สุชาติ	โอชคลัง	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ ดร.อภิพงษ์	พุ่มคำ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ ดร.วิจิตรา	สิงห์หิรัญบุสรณ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ ดร.นิชดา	สุวแพทย์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ ดร.สุภกร	หาญสูงเนิน	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ ดร.สุรชัย	จันทร์ศรี	มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ

คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิตรวจสอบทางวิชาการ

การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 6

ชื่อ	สกุล	มหาวิทยาลัย
อาจารย์ ดร.เพชรรัตน์	ใจบุญ	มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร
อาจารย์ ดร.พิมลพรรณ	กำพลานนท์วัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร.วรจิต	เศรษฐพรศ	มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
อาจารย์ ดร.วิจิตรา	สิงห์หิรัญสุนทรณ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ ดร.สถาพร	ทองวิค	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร.วิรัชชัย	โรยณรินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร.ประจวบ	อินระวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
อาจารย์ นุอร	ชูทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ปรีชา	ศรีประภาคาร	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ วุฒิสาสตร์	โชคเกื้อ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ อีร์ภัทร์	อนุชาติ	มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย
อาจารย์ ยุทธนา	อุไรชื่น	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ ดร.อาทิตย์	ฉิ่งสูงเนิน	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ ดร.ประจักษ์	ศรีวิไล	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ ดร.ดาเร็น	อ่อนขาว	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ดร. อ้าพล	อรภาชนกร	สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ



## สารบัญ

บทความวิจัย: ไฟฟ้าชุมชน (CP)	หน้า
CP001 การวิเคราะห์การเชื่อมต่อนทางไฟฟ้าของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก TEG12750D ด้วยการทดลองเปรียบเทียบกับกรจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MatLab Simulink นายคณิต พิมพ์คำไหล	233
CP002 การทดสอบการผลิตไฟฟ้าของกังหันลมแกนนอนแบบใช้กังหันสองชุดติดตั้งบนแกนเดียวกัน นายวินัย บุญน้อย	242
CP003 การประเมินศักยภาพพลังงานลมจากข้อมูลสถานีตรวจวัดอุตุณิยมหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา นายวารสิทธิ์ ศรีบุญ	251
CP004 เครื่องวัดพลังงานและคำนวณค่าไฟฟ้าของหลอดแอลอีดีฟลูออเรสเซนต์กับหลอดฟลูออเรสเซนต์ ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์แบบเวลาจริง นายผดุง กิจแสวง	259
CP005 การควบคุมการแกว่งความถี่ต่ำของระบบเชื่อมโยงพลังงานทดแทนในชนบท นายอมร อ้นกรอง	267
CP006 การผลิตไฟฟ้าจากคลื่นทะเลสำหรับชุมชนห่างไกล นางสาวณัฐวรรณ หรั่งแก้ว	276
CP007 การควบคุมกำลังแอกทิฟโรตตันกำลังเซลล์เชื้อเพลิงในระบบจำหน่ายโดยใช้ตัวแปลงผันพีดับเบิลยูเอ็ม นายบรรณณัติ บริบูรณ์	280
CP008 การศึกษาและออกแบบวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบสองทิศทางสำหรับระบบพลังงานทดแทนจากเซลล์แสงอาทิตย์ นางสาวเสาวนีย์ กันตะ	290
CP009 ศึกษาการออกแบบฟิวส์สวิตช์แรงต่ำโดยใช้ฉนวนเรซิน นายวิทยา โสสีทา	297
CP010 การจำลองเส้นโค้งสมรรถนะของกังหันลมแบบแกนนอน นายอภิชาติ ไชยจันทร์	305
CP011 การศึกษาชุดควบคุมประจุไฟฟ้าแบบสมาร์สำหรับแบตเตอรี่ในระบบไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ นายยุทธพงษ์ ทองช่วง	314
CP012 การออกแบบกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กแบบครอสโฟลด์ด้วยโปรแกรมทางพลศาสตร์ของไทย นายบัณฑิต เสร็จกิจ	322
CP013 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพใบกังหันลมด้วยโปรแกรมทางพลศาสตร์ของไทย นายชาคริต จินลอย	332
CP014 การออกแบบระบบไฟโตโวลตาอิกสำหรับชุมชนในชนบทไทย นายมนตรี สุขเศรษฐ์	337
CP015 การวิเคราะห์ผลการออกแบบหม้อแปลงเตสลา ที่ใช้การสวิตช์แบบอิเล็กทรอนิกส์แทนสปาร์กแกปโดยการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ นายสุพจน์ วรจิพรหมมา	346



CP009

ศึกษาการออกแบบฟิวส์สวิตช์แรงต่ำโดยใช้ฉนวนเรซิน  
Investigate and Design Low Tension Fuse Switch by Resin Insulator

วิทยา โสสีทา พินิจ จิตจริง และ วันชัย ททรัพย์สิงห์  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
39 หมู่ 1 ถนนรังสิต นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110 โทร: 0-2549-3571  
E-mail: witty\_na@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้ นำเสนอศึกษาการออกแบบฉนวนฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ โดยใช้ฉนวนเรซินแบบใหม่ที่พัฒนาขึ้น การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวนเรซินด้วยโปรแกรมไฟไนเอลิเมนต์ พบว่าจุดที่เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ จุดที่มีการเชื่อมต่อกับสายป้อน และวัสดุฉนวนผ่านการทดสอบคุณสมบัติตามมาตรฐาน ASTM D2240 ASTM D412 และ ASTM D149 จากการทดสอบพบว่าวัสดุฉนวนมีความแข็งเท่ากับ  $82 \pm 1$  Shore D และสามารถรับแรงดึงได้สูงสุดเท่ากับ  $37.89 \pm 4.5$  MPa และมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าประมาณ 19.24 kV/mm นอกจากนี้ ฟิวส์สวิตช์แรงต่ำยังผ่านการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า และการทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกินของฉนวนแข็งที่ระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ความถี่ 50 Hz รวมถึงการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มที่กระแสฟัด 400 A ในห้องปฏิบัติการตามมาตรฐาน IEC 60947-3 ทั้งนี้ฉนวนเรซินยังสามารถทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50  $\mu$ s สูงสุด 35.51 kV ซึ่งไม่ทำให้เกิดการรวบไฟหรือเจาะทะลุขึ้นงาน

คำสำคัญ: ฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ, ฉนวนเรซิน, สนามไฟฟ้า

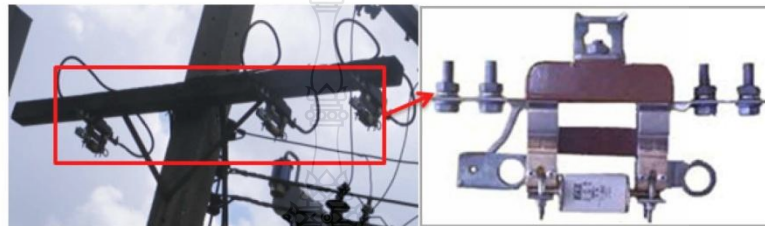
1. บทนำ

ในปัจจุบันการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและการไฟฟ้านครหลวง มีการใช้ฟิวส์สวิตช์แรงต่ำที่มีฐานฉนวนทำมาจากวัสดุเซรามิกมากกว่า 95% เนื่องจากฉนวนเซรามิกนั้นมีคุณสมบัติที่เหมาะสม ไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติทางกลทางไฟฟ้า ทางความร้อนและทนต่อสภาพแวดล้อม มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน แต่เนื่องจากกระบวนการและขั้นตอนในการผลิตที่ยุ่งยาก สิ้นเปลืองพลังงาน จึงได้มีผู้คิดค้นวัสดุชนิดอื่นขึ้นมาทดแทน ได้แก่ ฉนวนยางผสม [1]

ในส่วนของงานวิจัยฉบับนี้ ผู้เขียนมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาออกแบบฉนวนฟิวส์สวิตช์แรงต่ำด้วยวัสดุเรซิน เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำมาใช้ทดแทนวัสดุฉนวนเซรามิกอีกทางเลือกหนึ่ง โดยมีกรณีวิเคราะห์ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ [2] จากนั้นจะทำการออกแบบชิ้นงานจริงเพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติทางกล ทางความร้อนและทางไฟฟ้า โดยที่ฉนวนเรซินที่ได้ทำการวิจัยนี้สามารถผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน [3] ซึ่งฉนวนเรซินที่พัฒนาขึ้นต้องมีคุณสมบัติสามารถทนทานต่อสภาพใช้งานเท่าเทียมหรือดีกว่าฉนวนเซรามิกแบบเดิมและข้อสำคัญคือ มีกระบวนการผลิตที่ง่ายและราคาไม่แพง

## 2. มาตรฐานฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ

ในปัจจุบันการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ได้กำหนดคุณสมบัติและมาตรฐานการทดสอบฟิวส์สวิตช์แรงต่ำตามมาตรฐาน IEC 60947-3 [3] ซึ่งครอบคลุมสำหรับฟิวส์สวิตช์แรงต่ำที่มีพิกัดแรงดัน 500 V และพิกัดกระแสใช้งานสูงสุด 400 A การติดตั้งใช้งานฟิวส์สวิตช์แรงต่ำจะถูกติดตั้งบนคอนสายบริเวณที่มีการติดตั้งหม้อแปลงระบบจำหน่ายแรงต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การติดตั้งฟิวส์สวิตช์แรงต่ำพิกัด 500 V, 400 A

ฟิวส์สวิตช์แรงต่ำที่นำมาใช้เป็นต้นแบบในการพัฒนาฉนวนจะมีรูปร่างลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2 (ก) ฉนวนเซรามิกเดิมของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ (ข) ฉนวนยางผสมยางอีพ็อกซี [1] และ (ค) ฉนวนเรซิน มีน้ำหนักเท่ากับ 0.52, 0.27 และ 0.28 กิโลกรัมตามลำดับ และจากการทดสอบความแข็งด้วยดูโรมิเตอร์ (Durometer) ฉนวนมีความแข็งเท่ากับ 88 ชอร์ดี (Shore D) เปรียบเทียบตัวอย่างฉนวนฟิวส์สวิตช์แรงต่ำแสดงในรูปที่ 2



( ก ) ฉนวนเซรามิก



( ข ) ฉนวนยางผสมยางอีพ็อกซี



( ค ) ฉนวนเรซิน

รูปที่ 2 เปรียบเทียบฉนวนแต่ละชนิด

### 3. วัสดุฉนวนและการทดสอบคุณสมบัติทางกล

วัสดุฉนวนเรซินที่ใช้ทำฉนวนสำหรับฟิวส์สวิตช์ มีคุณสมบัติความเป็นฉนวนที่ดี ทนความร้อนและทนทานต่อสภาพแวดล้อมซึ่งจะมีการผสมระหว่างตัวเรซินและตัวทำให้แข็งเพื่อให้เรซินแข็งตัว โดยทั่วไปการแข็งตัวของเรซินแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงที่ 1) Gel time คือช่วงหลังจากเติมตัว catalyst แล้วจนเรซินจับตัวเป็นวุ้น ช่วงที่ 2) Cure time คือ ช่วงที่เรซินแข็งตัวเต็มที่และเป็นช่วงที่เรซินเย็นตัวลงหลังจากที่มีความร้อนสูงในขณะทำปฏิกิริยาของเรซิน

จากคุณสมบัติในตารางที่ 1 จะนำเรซินไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฉนวนกว้าง 100 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตรและหนา 1.0 มิลลิเมตร เพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติทางกลและทางไฟฟ้า การทดสอบประกอบด้วย การทดสอบความแข็ง (ASTM D2240), การทดสอบสมบัติการรับแรงดึง (ASTM D412), การทดสอบทนทานต่อการยึดตัว รวมถึงการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (ASTM D149) การทดสอบโดยห้องปฏิบัติการทดสอบของศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ จากการทดสอบพบว่า วัสดุฉนวนเรซินมีค่าความแข็งเท่ากับ  $82 \pm 1$  Shore D สามารถรับแรงดึงได้เท่ากับ  $37.89 \pm 4.5$  MPa ตามลำดับและมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าประมาณ 19.24 kV/mm. ดังแสดงในตารางที่ 1

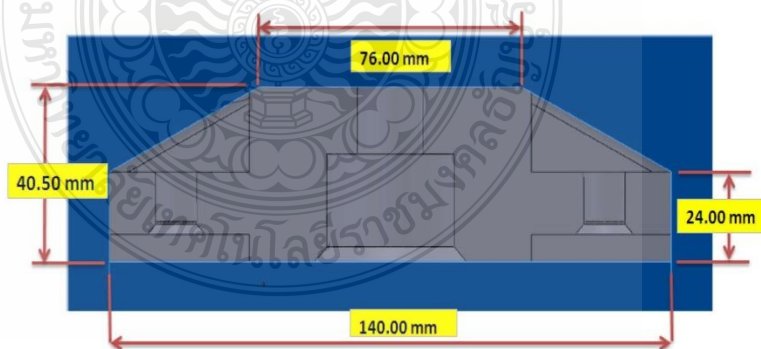
ตารางที่ 1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุฉนวนเรซินกับวัสดุอื่นๆ[4]

คุณสมบัติ	PORCLAIN	NR+EPDM (60:40) [1]	RESIN
Hardness, Shore A, D	88	46.7 $\pm$ 3	82.0 $\pm$ 1
Tensile Strength, MPa	10.34 - 17.24	10.09 $\pm$ 0.58	37.89 $\pm$ 4.5

### 4. การออกแบบและจำลองสนามไฟฟ้า

#### 4.1 การออกแบบฉนวนสำหรับฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ

ในส่วนของ การออกแบบ ผู้วิจัยได้ทำการกำหนดขนาดรูปร่างและลักษณะของฉนวนฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งมีขนาดและรูปร่างดังรูปที่ 3 โดยการออกแบบดังกล่าวอ้างอิงขนาดมาตรฐานตามข้อกำหนด IEC [3] และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค



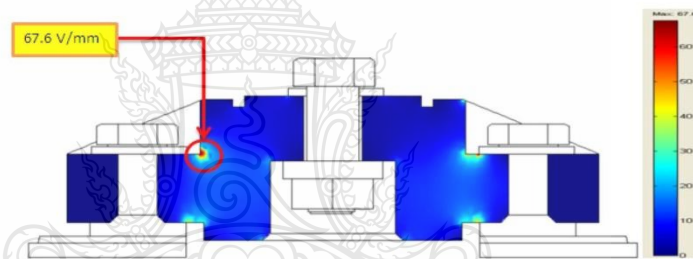
รูปที่ 3 แบบจำลองของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ



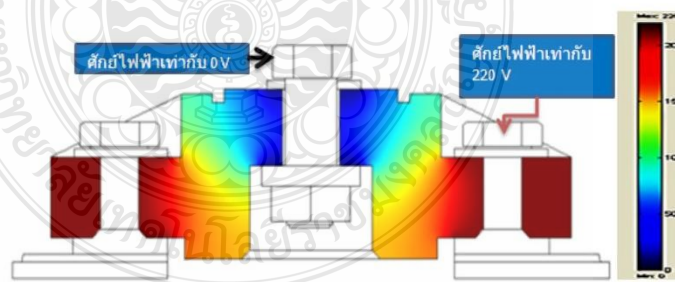
#### 4.2 การจำลองผลสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าด้วยคอมพิวเตอร์

สำหรับการวิเคราะห์ผลจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าและการกระจายตัวศักย์ไฟฟ้าภายในเนื้องนวนเรซิน ได้ทำการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แสดงดังรูปที่ 4 ตามลำดับ บริเวณที่เป็นฉนวนเรซินจะถูกแบ่งเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยมที่ใช้ในการคำนวณเท่ากับ 14,692 เอลิเมนต์ และจำนวนโหนดทั้งหมดเท่ากับ 7,514 โหนด และมีขอบเขตในการคำนวณประกอบด้วย

- ขอบเขตการวิเคราะห์เป็นฉนวนอากาศและมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 1.0
- ฉนวนเรซินมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 3.2-3.9 [5-6]
- บริเวณที่เป็นฉนวนและตัวนำทั้งหมดกำหนดให้ไม่มีประจุค้าง (Space Charge) และฉนวนเรซินเป็นฉนวนสมบูรณ์แบบ (Perfect Dielectric) ซึ่งไม่มีค่าความนำไฟฟ้า
- แบบจำลองจะละลายในส่วนที่เป็นฟิวส์ (High Rupture Capacity Fuses) และขั้วต่อสายไฟฟ้าที่ปลายทั้งสองการ
- ค่าพิกัดกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับ (Tolerance) เท่ากับ  $1 \times 10^{-6}$  [1]



(ก) ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในเนื้องนวนเรซินแข็ง



(ข) การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าภายในเนื้องนวนเรซิน

รูปที่ 4 ผลจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าและการกระจายตัวศักย์ไฟฟ้าด้วยคอมพิวเตอร์

จากการวิเคราะห์ผลการจำลองสนามไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4 (ก) จะทำให้รู้ว่าจุดที่เกิดสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ จุดที่มีการเชื่อมต่อกับสายป้อน ซึ่งมีค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 67.6 V/mm ดังนั้นเมื่อเทียบกับสนามไฟฟ้าสูงสุดของฉนวนเรซินแล้ว(19.24kV/mm) จึงไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อฉนวนเรซิน และรูปที่ 4 (ข) คือการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าภายในเนื้อฉนวนเรซิน ตามลำดับ

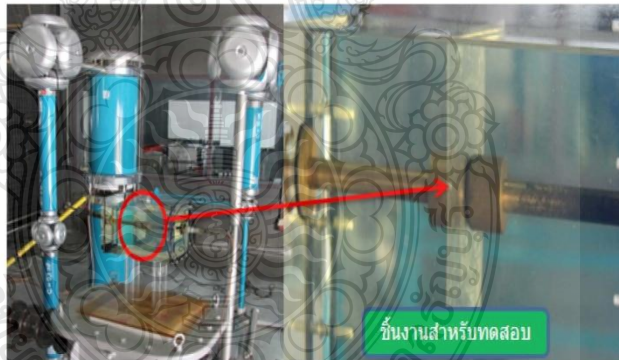
จากผลการจำลองฉนวนเรซินฟิวส์สวิตช์แรงต่ำที่ผ่านการออกแบบโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จะถูกนำไปขึ้นรูปแม่พิมพ์สำหรับขั้นตอนการผลิตฉนวนฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ โดยใช้วิธีการหล่อ ซึ่งเป็นขบวนการขึ้นรูปที่ง่ายและไม่ยุ่งยาก เหมาะกับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างไม่ซับซ้อน เรซินเมื่อผสมกับตัวทำแข็งแล้วสามารถแข็งตัวได้เองที่อุณหภูมิห้อง ใช้เวลาประมาณ 30 ถึง 120 นาที การทำให้เรซินคงรูปหรือเรียกว่าเกิดการเชื่อมต่อน้ำไปมาของโมเลกุล

### 5. การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ

ในส่วนของ การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้านั้น ได้แบ่งวิธีการทดสอบเป็น 3 หัวข้อหลัก โดยอ้างถึงวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน

#### 5.1 ผลการทดสอบค่าความทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric Strength)

ดำเนินการจัดเตรียมวัสดุทดสอบขนาด 100 x 100 mm หนาประมาณ 1-2 mm จำนวน 5 ชิ้น จัดวางลงในภาชนะทดสอบที่บรรจุด้วยฉนวนน้ำมันเพื่อป้องกันการวาวไฟตามผิว โดยวางชั้นอยู่ระหว่างอิเล็กโทรดทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 2 cm ทำการต่อวงจรทดสอบดังรูปที่ 5 และทำการป้อนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ที่ 1 kV/s จนกระทั่งเกิดเบรกดาวน์ จากนั้นจึงนำผลการทดสอบทั้ง 5 ชิ้น ไปหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 5 การทดสอบฉนวนเรซินต่อความคงทนแรงดันไฟฟ้า

จากผลการทดสอบพบว่าฉนวนเรซินที่ทำการออกแบบ มีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย  $E_b = 19.24 \text{ kV/mm}$

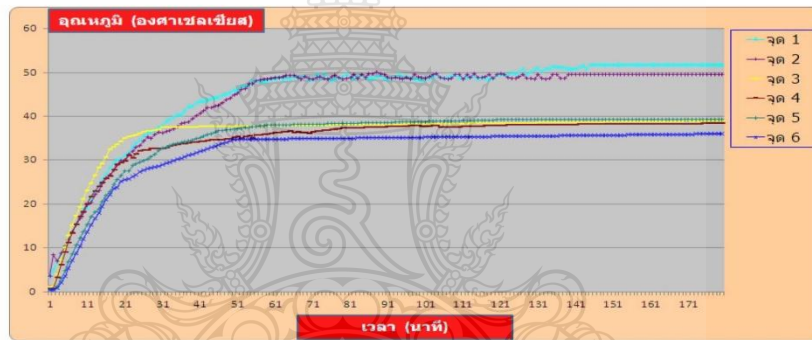


**5.2 ผลการทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (Temperature Rise Test)**

ดำเนินการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มที่กระแสฟัด 400 A เป็นเวลา 3 ชั่วโมง(180 นาที) และทำการติดตั้งเสมือนจริง ดังรูปที่ 6 (ก) โดยติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ฟิวส์สวิตซ์แรงต่ำจำนวน 6 จุด



(ก) การติดตั้งและทดสอบวัดค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น 6 จุด



(ข) ผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทั้ง 6 จุด

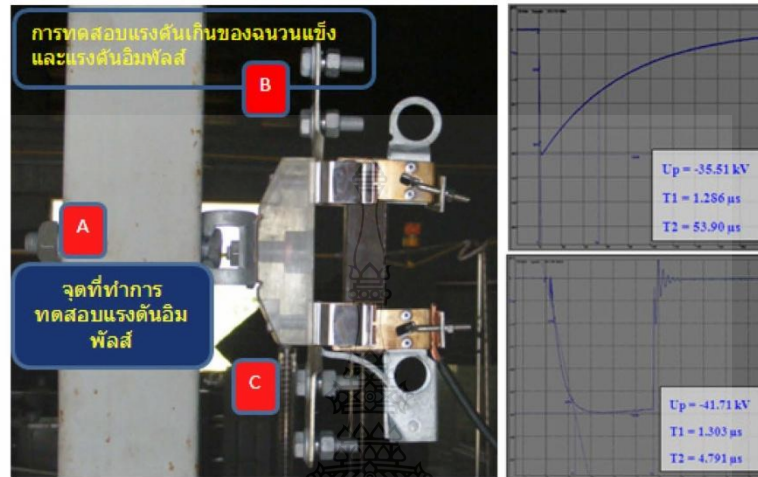
รูปที่ 6 การทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

ผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของฟิวส์สวิตซ์แรงต่ำฉนวนเรซิน แสดงดังรูปที่ 6 (ข) จากผลการทดสอบพบว่า ค่าอุณหภูมิที่เพิ่มสูงสุดอยู่ที่จุด 1 ซึ่งเป็นจุดต่อระหว่างสายบ่อนกับจุดต่อฉนวน โดยค่าอุณหภูมิดังกล่าวไม่เกินขีดจำกัดที่มาตรฐานกำหนด [3]

**5.3 ผลการทดสอบ ความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าและแรงดันกระแสสลับความถี่ต่ำ**

เป็นการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60947-3 ซึ่งประกอบด้วยการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50  $\mu$ s ที่ระดับแรงดัน 14.8 kV [3] และการทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกินของฉนวนแข็ง ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำ ที่ระดับแรงดัน 2.2 kVrms เป็นเวลา 5 วินาที

โดยทำการบ่อนแรงดันดังกล่าว ระหว่างจุดต่อขั้วไฟฟ้าของฟิวส์สวิตซ์แรงต่ำ กับจุดต่อลงดินหรือจุดยึดฐานฟิวส์สวิตซ์แรงต่ำกับคอนเส้าไฟฟ้า (C-A) ดังรูปที่ 7 (ซ้ายมือ)



รูปที่ 7 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า และแรงดันเกินกระแสสลับของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำฉนวนเรซิน

ผลการทดสอบฟิวส์สวิตช์แรงต่ำฉนวนเรซินด้วยแรงดันกระแสสลับความถี่ต่ำ ไม่ทำให้เกิดการวาบไฟตามผิว (Flashover) หรือเกิดการเบรคดาวน์ (Breakdown) ที่ฐานฟิวส์สวิตช์แรงต่ำแต่อย่างใด และในส่วนของผลการทดสอบ ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50  $\mu$ s สามารถทนต่อระดับแรงดันตามมาตรฐานกำหนด และมีค่าความคงทนสูงสุด 35.51 kV โดยแสดงผลการทดสอบเป็นรูปคลื่นเต็มอิมพัลส์ ดังรูปที่ 7 (ขวามือบน) นอกจากนี้ ยังได้ทำการทดสอบ ค่าแรงดันเบรคดาวน์สถิติ 50% ซึ่งแสดงผลการทดสอบเป็นรูปคลื่นตัดอิมพัลส์ ดังรูปที่ 7 (ขวามือล่าง) โดยมีค่าแรงดันที่ค่ายอด 41.71 kV ซึ่งเป็นตัวอย่างการหาค่าแรงดันอิมพัลส์เบรคดาวน์ 50 % ( $U_{b50\%}$ )

## 6. สรุป

การออกแบบฉนวนที่ทำจากเรซินสำหรับฟิวส์แรงต่ำ เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการนำเสนอในการใช้ทดแทน ฉนวนแบบเซรามิกที่ใช้ในปัจจุบัน จากการศึกษาพบว่าเรซินมีคุณสมบัติคงทนต่อสภาวะทางกลตามมาตรฐาน D2240, D412 และ D149 อีกทั้งยังมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC 60947-3 โดยเฉพาะฉนวนเรซินที่ออกแบบมีคุณสมบัติทางกล คือ วัสดุมีความแข็ง  $82 \pm 1$  Shore D รับแรงดึงได้สูงสุด  $37.89 \pm 4.5$  Mpa เปอร์เซ็นการยืดตัว  $500.7 \pm 24.25$  ตามลำดับ และมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าคือ มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 19.24 kV/mm ทนต่อแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50  $\mu$ s ที่แรงดันสูงสุด 35.51 kV และมีคุณสมบัติผ่านการทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น การทดสอบทนต่อแรงดันเกินของฉนวนแข็ง เพื่อเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบจำหน่ายแรงต่ำในปัจจุบัน ฉนวนที่ทำจากเรซินจึงเหมาะสมอย่างมากสำหรับใช้ทดแทนฉนวนแบบเซรามิก โดยใช้เป็นแนวทางเพื่อศึกษาและพัฒนาสำหรับใช้งานจริงต่อไป และในส่วนของ การทดสอบแบบติดตั้งใช้งานจริงรวมทั้งการทดสอบอายุการใช้งานนั้น คณะผู้วิจัยกำลังดำเนินการศึกษาและพัฒนาในขั้นตอนต่อไป



เอกสารอ้างอิง

- [1] นิตติพงษ์ ปานกลาง อนุรักษ์ พันธุ์คงและกฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์ “การออกแบบฉนวนยางธรรมชาติสำหรับฟิวส์ลิตซ์แรงต่ำ”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 35 (EECON-35), 12 – 14 ธันวาคม 2555.
- [2] A.B.J Reece and T.W. Preston, “Finite Element Methods in Electrical Power Engineering “, Oxford University Press Inc., New York, 2000
- [3] IEC 60947-3, “Low – Voltage Switchgear and Control Gear – Part 3: Switch, Disconnectors, Switch –Disconnectors and Fuse-Combination Units”, Edition 2.2, 2005
- [4] พูลศักดิ์ โกษีย์ภรณ์ “วิชาศัทยไฟฟ้า” คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- [5] จตุพร วุฒิกนกกาญจน์ “Polymer Characterization and Analysis” คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (มจธ)
- [6] สำราญ สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, พิมพ์ครั้งที่ 3, มีนาคม 2549





# การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 36

The 36<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference (EECON 36)

11-13 ธันวาคม 2556

ณ เฟลิกซ์ ริเวอร์แคว รีสอร์ท จ.กาญจนบุรี



มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี  
Rajabhat Kurang University  
No. 1, 2488-2489





Reviewer	Organization
Amnat Suksri	Khon Kaen University
Amnoi Ruengwaree	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Amorn Jiraseree-amornkun	Mahanakorn University of Technology
Anon Namin	Rajamangala University of Technology Lanna
Anupap Meesomboon	Khon Kaen University
Anuree Lorsawatsiri	Mahanakorn University of Technology
Anuwat Jangwanitert	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Aphibal Pruksanubal	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Apichai Bhatranand	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Apirada Namsang	Civil Aviation Training Center Thailand
Apiwat Lek-uthai	Chulalongkorn University
Arkhom Mounghaodaeng	Srinakharinwirot University
Arkorn Kaewrawang	Khon Kaen University
Arnon Isaramongkolrak	Mahanakorn University of Technology
Arporn Teeramongkonrasmee	Chulalongkorn University
Arthit Sode-Yome	Siam University
Atthapol Ngaopitakkul	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Benjamas Panomruttanarug	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Bongkarn Homnan	Dhurakij Pundit University
Bongkoj Sookananta	Ubonratchathani University
Boonchuay Supmonchai	Chulalongkorn University
Boonlert Suechoey	South-East Asia University
Boonruk Chipipop	Rangsit University
Boonsri Kaewkham-ai	Chiang Mai University
Boonyang Plangklang	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Budhapon Sawetsakulanond	Mahanakorn University of Technology
Bundit Thipakorn	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Chainarong Klimanee	Srinakharinwirot University
Chaiwit Chat-uthai	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Chaiyan Jettanasen	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Chaiyaporn Lothongkam	Mahanakorn University of Technology
Chaiyo Thammarat	South-East Asia University
Chaiyut Sumpavakup	Mahanakorn University of Technology
Chanchai Dechthummarong	Rajamangala University of Technology Lanna
Chanchara Tangwongsan	Chulalongkorn University



Reviewer	Organization
Channarong Banmongkol	Chulalongkorn University
Chanwit Boonchuay	Rajamangala University of Technology Rattanakosin
Charnchai Pluempitwiriyaewej	Chulalongkorn University
Chatchai Suppittaksakul	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Chawasak Rakpenthai	University of Phayao
Chiranut Sa-ngiamsak	Khon Kaen University
Chirasak Sinsukudomchai	South-East Asia University
Chirawat Wattanapanich	Walailak University
Chirdpong Deelertpaiboon	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Chowarit Mitsantisuk	Kasetsart University
Chutham Sawigun	Mahanakorn University of Technology
Danucha Prasertsom	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Decha Wilairat	Mahidol University
Denchai Worasawate	Kasetsart University
Duang-arthit Srimoon	Rangsit University
Dulpichet Rerkpreedapong	Kasetsart University
Dusit Thanapatay	Kasetsart University
Ekapon Siwapornsathain	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Jakkree Srinonchat	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Jeerasuda Koseeyaporn	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Jirasak Chanwutitum	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Jitkomut Songsiri	Chulalongkorn University
Jonglak Pahasa	University of Phayao
Jukkrit Kluabwang	Rajamangala University of Technology Lanna
Jukkrit Tagapanij	Mahanakorn University of Technology
Kamon Jirasereeamornkul	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Kanadit Chetpattananondh	Prince of Songkla University
Kanchana Silawarawet	Siam University
Kanjanapan Sukvichai	Kasetsart University
Keerati Chayakulkheeree	Sripatum University
Khanittha Kaewdang	Ubonratchathani University
Kiatiyuth Kveeyarn	Kasetsart University
Kiattisin Kanjanawanishkul	Maharakham University
Kittisak Tripipatpornchai	Rangsit University
Kittiwann Nimkerdphol	Rajamangala University of Technology Thanyaburi





Reviewer	Organization
Kobchai Dejhan	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Komsan Hongesombut	Kasetsart University
Komson Daroj	Ubonratchathani University
Krischonme Bhumkittipich	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Krissada Asavaskulkiet	Mahidol University
Krit Angkeaw	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Kulyos Audomvongseree	Chulalongkorn University
Kunnthphong Srisathit	Rajamangala University of Technology Rattanakosin
Kusumal Chalermyanont	Prince of Songkla University
Kwanchai Eurviriyankul	Rajamangala University of Technology Lanna
Mana Sriyudthsak	Chulalongkorn University
Manop Aorpimai	Mahanakorn University of Technology
Miti Ruchanurucks	Kasetsart University
Mongkol Konghirun	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Mongkol Raksapatcharawong	Kasetsart University
Monthon Nawong	Dhurakij Pundit University
Montree Siripruchyanun	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Montri Karnjanadecha	Prince of Songkla University
Montri Somdunyanok	Rajamangala University of Technology Rattanakosin
Naebboon Hoonchareon	Chulalongkorn University
Nalin Sidahao	Mahanakorn University of Technology
Napat Sra-i-um	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Nararat Ruangchaijatupon	Khon Kaen University
Narong Buabthong	Thammasat University
Narong Yoothanom	Sripatum University
Nathabhat Phankong	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Nattachote Rugthaicharoencheep	Rajamangala University of Technology Phra Nakhon
Nattapong Phanthuna	Rajamangala University of Technology Phra Nakhon
Nattavut Chayavanich	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Nattaya Klairuang	Kasetsart University
Nattha Jindapetch	Prince of Songkla University
Natthaphob Nimpitiwan	Bangkok University
Nimit Boonpirom	Sripatum University
Nisachon Tangsangjumvisai	Chulalongkorn University
Nophadon Wiwatcharagoses	King Mongkut's University of Technology North Bangkok



#### Reviewer

Nuntiya Chaiyabut  
Ong-Art Sadmai  
Opas Chutatape  
Pairote Thongprasri  
Paisarn Sonthikorn  
Paitoon Rakluea  
Pakorn Kaewtrakulpong  
Panich Intra  
Parnjit Damrongkulkamjorn  
Pasist Suwanapingkarl  
Patamaporn Sripadungtham  
Peerapol Yuvapoositanon  
Peerayot Sanposh  
Pennapa Pairodomonchai  
Petch Nantivatana  
Phaisan Ngamjanyaporn  
Phumin Kirawanich  
Phunsak Thiennviboon  
Pichai Aree  
Pichet Wisartpong  
Pinit Jitjing  
Pinit Thepsatorn  
Pipat Prommee  
Pisit Liutanakul  
Pisit Vanichchanunt  
Pisit Wisutmethheekorn  
Piya Warabuntaweasuk  
Poonlap Lamsrichan  
Pornchai Phukpattaranont  
Pracha Yeunyongkul  
Prajub Pawarangkoon  
Pramin Artrit  
Pranchalee Samanpiboon  
Prasopchok Hothongkham  
Prayoot Akkaraekthalin

#### Organization

Bangkok University  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
Rangsit University  
Kasetsart University  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Rajamangala University of Technology Lanna  
Kasetsart University  
Rajamangala University of Technology Phra Nakhon  
Kasetsart University  
Mahanakorn University of Technology  
Udon Thani Rajabhat University  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
Sripatum University  
Rangsit University  
Mahidol University  
Kasetsart University  
Thammasat University  
Mahanakorn University of Technology  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
Srinakharinwirot University  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
Mahanakorn University of Technology  
Bangkok University  
Kasetsart University  
Prince of Songkla University  
Rajamangala University of Technology Lanna  
Mahanakorn University of Technology  
Khon Kaen University  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Rajamangala University of Technology Rattanakosin  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok





Reviewer	Organization
Preecha Kocharoen	Sripatum University
Punyaphat Phumiphak	Mahanakorn University of Technology
Rardchawadee Silapunt	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Raungrong Suleesathira	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Rawid Banchuin	Siam University
Rungsimant Sitdhikorn	Mahanakorn University of Technology
Sakchai Thipchaksurat	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Sakorn Po-Ngam	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Saliltip Sinthusonthisat	Mahanakorn University of Technology
Samphan Phrompichai	Mahanakorn University of Technology
Samroeng Hintamai	Sripatum University
Sanchai Dechanupaprittha	Kasetsart University
Santitham Prom-on	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Sanun Srisuk	Nakhon Phanom University
Sarawan Wonga	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Sarawuth Chaimool	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Sarinee Ouitrakul	Kasetsart University
Sawat Bunnjaweht	Mahanakorn University of Technology
Seangrawee Buakaew	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Sermsak Uatrongjit	Chiang Mai University
Sirichai Dangeam	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Sirichai Wattanasophon	Kasetsart University
Siroj Sirisukprasert	Kasetsart University
Sirivat Poonvasin	Kasetsart University
Sirivit Taechajedcadarungsri	Khon Kaen University
Siriwich Tadsuan	South East Asia University
Siwapon Srisonphan	Kasetsart University
Somboon Nuchprayoon	Chiang Mai University
Somboon Sooksatra	Rangsit University
Somchai Hiranvarodom	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Somchat Jiriwibhakorn	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Sommart Sang-ngern	Mahanakorn University of Technology
Sompob Polmai	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Somporn Sirisumrannukul	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Songkran Kantawong	Bangkok University



Reviewer	Organization
Songphol Kanjanachuchai	Chulalongkorn University
Songrit Maneewongvatana	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Sorawat Chivapreecha	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Srijidtra Charoenlarppopparut	Kasetsart University
Srisakdi Jangjit	Kasetsart University
Suchart Yammen	Naresuan University
Suchin Trirongjitmoah	Ubonratchathani University
Sudchai Boonto	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Sumate Naetiladdanon	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Suneat Pranonsatit	Kasetsart University
Supakit Kawdungta	Rajamangala University of Technology Lanna
Supalak Sathiracheewin	Kasetsart University
Supatana Auethavekiat	Chulalongkorn University
Supattana Nirukkanaporn	Rangsit University
Surachai Chaitusaney	Chulalongkorn University
Surachoke Thanapitak	Mahidol University
Surapan Airphaiboon	King Mongkut's Institute of technology Ladkrabang
Surapong Suwankawin	Chulalongkorn University
Suree Pumrin	Chulalongkorn University
Suthathip Maneewongvatana	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Suwat Pattaramalai	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Tanet Wonghong	Bangkok University
Tanin Duangjan	Srinakharinwirot University
Tasaneey Chayavanich	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Teerasak Somsak	Rajamangala University of Technology Lanna
Teerasit Kasetkasem	Kasetsart University
Terdpun Choogorn	Nakhon Sawan Rajabhat University
Thamvarit Singhavilai	Mahidol University
Thanadol Pritranan	Mahidol University
Thanakorn Khongdeach	Kasetsart University
Thanapong Thanasaksiri	Chiang Mai University
Theerayod Wiangtong	Mahanakorn University of Technology
Thidarat Tawsook	Bangkok University
Thong Lantharthong	Rajamangala University of Technology Phra Nakhon
Thumrongrat Amornraksa	King Mongkut's University of Technology Thonburi



**Reviewer**

Titipong Lertwiryaprapa  
Toempong Phetchakul  
Trin Saengsuwan  
Ukrit Mankong  
Umarin Sangpanich  
Upady Hatthasin  
Uthane Supatti  
Uthen Kamnarn  
Veerachai Malyavej  
Viboon Chunkag  
Vichai Saelee  
Vijit Kinnaree  
Vinai Silaruam  
Virote Pirajnanchai  
Vishnu Thonglek  
Vorapong Silaphan  
Vuttiapon Tarateeraseth  
Wachira Chongburee  
Walisa Romsaiyud  
Wanchai Chankaipol  
Wanchai Chimchayee  
Wanchai Khamsen  
Wanchai Pijitrojana  
Wanchai Subsingha  
Wanchak Lenwari  
Wannarat Suntiamorntut  
Wanwisa Thaiwirod  
Warakorn Srichavengsup  
Warayut Kampeerawat  
Warut Suampun  
Wason Tanjaroen  
Watcharee Veerakachen  
Wattanapong Kurdthongmee  
Wekin Piyarat  
Werapon Chiracharit

**Organization**

King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
King Mongkut Institute of Technology Ladkrabang  
Kasetsart University  
Chiang Mai University  
Kasetsart University  
Rajamangala University of Technology Lanna  
Kasetsart University  
Rajamangala University of Technology Lanna  
Mahanakorn University of Technology  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
South-East Asia University  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Mahanakorn University of Technology  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
Rajamangala University of Technology Lanna  
Mahanakorn University of Technology  
Srinakharinwirot University  
Kasetsart University  
Siam University  
Sripatum University  
University of the Thai Chamber of Commerce  
Rajamangala University of Technology Lanna  
Thammasat University  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Prince of Songkla University  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
Thai-Nichi Institute of Technology  
Khon Kaen University  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Kasetsart University  
Kasetsart University  
Walailak University  
Srinakharinwirot University  
King Mongkut's University of Technology Thonburi



#### Reviewer

Wibool Piyawattanametha  
Wijitra Petchakit  
Wiklom Teerapabkajorndet  
Wilaiporn Lee  
Witoon Prommee  
Witthawas Pongyart  
Worakarn Wongsachua  
Worapol Pongpech  
Worawat Nakawiro  
Wuthiporn Loetwassana  
Wuttipong Kumwilaisak  
Yan Zhao  
Yongyuth Naras  
Yongyuth Permpoontanalarp  
Yutana Chongjarearn  
Yuttana Kumsuwan  
Yuttapong Jiraksopakun  
Yutthana Kanthaphayao

#### Organization

National Electronics and Computer Technology Center  
Walailak University  
Prince of Songkla University  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
Rajamangala University of Technology Lanna  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
Ubonratchathani University  
Dhurakij Pundit University  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Mahanakorn University of Technology  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Chulalongkorn University  
Siam University  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Dhurakij Pundit University  
Chiang Mai University  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi



## สารบัญ

PW021	A Study of Fault Characteristics and Its Effect to 115 kV Submarine Cable System.	81
PW022	Impact of Small and Large Induction Motors on Power System Loading	85
PW023	A Study of Distribution Feeder Reconfiguration for Power Loss Reduction by Distribution Automation System	89
PW024	Reliability Evaluation of Electrical Substation Considering Load Growth and Financial Worth	93
PW025	Policy-based Power Development Planning Considering Fuel Constraints	97
PW026	PD Detection in Power Transformers Using Acoustic Emission Method and Time Difference of Arrival Technique	101
PW027	เทคนิคการตรวจวัดและระบุตำแหน่งการเกิดสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์ AE (Acoustic Emission) และ HFCT (High Frequency Current Transducer)	105
PW028	The Effect of Nano- $Al_2O_3$ on Electrical Tree Propagation under Operating Temperature Stress	109
PW029	ผลของการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าและความยาวของอิเล็กโทรดต่อการลดก๊าซมลพิษจากไอเสียรถยนต์	113
PW030	การศึกษาคุณสมบัติของหยดน้ำกับจนวนแข็งอีพ็อกซีเรซินรูปวงกลมภายใต้สนามไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง	117
PW031	การควบคุมความถี่ระบบไมโครกริดด้วยกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดบ่อนสองทางซึ่งติดตั้ง ตัวควบคุมที่ปรับค่าได้ด้วยพีซีล่อจิกชนิดซูลิโนซึ่งทำให้เหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค	121
PW032	Analysis of Optimal Sizing for DG in Electric Power Distribution Systems	125
PW033	Fault Locating in 115 kV System of Lumlukka Substation in form of Geographic Coordinate	129
PW034	Modeling of PV Generation System with PV and PQ control	133
PW035	Supplementary Load Frequency Control in Smart Grid using Plug-in Electric Vehicles Concerning Impact of Communication Delay	137
PW036	Design and Testing Low Tension Fuse Switch Base Resin Insulator	141
PW037	Voltage-Time Characteristics of suspension insulator in the 24 kV distribution system	145
PW038	Steep Front Impulse Voltage Generation for Testing Suspension Insulators	149
PW039	การตรวจสอบการจุดชนวนของโหมด A และ D โดยใช้อิเล็กโทรดสปาร์คแกปชนิดสามขั้ว	153
PW040	Electrical Model of Air-Core Reactors	157
PW041	115 kV Load Transfer by Automatic Transfer Switch Computer Program	161



## การออกแบบและทดสอบฟิวส์วิตช์แรงต่ำโดยใช้ฐานฉนวนเรซิน Design and Testing Low Tension Fuse Switch Base Resin Insulator

วิทยา โสสีทา พินิจ จิตจริง และ วันชัย ทรัพย์สิงห์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ 1 ถนนรังสิต นครนายก ตำบลคลองท่า อำเภอดำเนินสะดวก จังหวัดราชบุรี 12110 โทร: 0-2549-3571 E-mail: witty\_na@hotmail.com

PW036

### บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้ นำเสนอการออกแบบฉนวนฟิวส์วิตช์แรงต่ำ โดยใช้ฐานฉนวนเรซินแบบใหม่ที่พัฒนาขึ้น วัสดุฉนวนผ่านการทดสอบคุณสมบัติตามมาตรฐาน ASTM D2240, ASTM D412 และ ASTM D149 จากการทดสอบพบว่าวัสดุฉนวนมีความทนต่อแรงดันไฟฟ้าประมาณ 19.25 kV/mm นอกจากนี้ ฟิวส์วิตช์แรงต่ำยังผ่านการทดสอบความทนต่อแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า และการทดสอบความทนต่อแรงดันเกินของฉนวนแข็งที่ระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ความถี่ 50 Hz รวมถึงการทดสอบอุณหภูมิที่กระแสฟลักซ์ 400 A ในห้องปฏิบัติการตามมาตรฐาน IEC 60947-3 ทั้งนี้ฉนวนเรซินยังสามารถทนต่อแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า 1.2/50  $\mu$ s สูงสุด 42.22 kV(BIL) ซึ่งไม่ทำให้เกิดการวางไฟหรือเขาหวั่นงา

คำสำคัญ: ฟิวส์วิตช์แรงต่ำ, ฉนวนเรซิน, สนามไฟฟ้า

### Abstract

This paper presented a new design of insulator for low-tension fuse switch. The developing insulator is Resin. It has been also tested and approved for electrical and mechanical properties according to ASTM D2240, ASTM D412 and ASTM D149 standard. From testing results, it could be withstand maximum power frequency voltage about 19.25 kV/mm. In addition, the low-tension fuse switch has been tested in laboratory referring to IEC 60947-3 standard. The low-tension fuse switch could be withstand impulse voltage (1.2/50  $\mu$ s) and AC power frequency voltage 50 Hz, respectively along with the temperature rise test at 400 A rated current. Therefore, the new insulator could be withstand impulse voltage (1.2/50 $\mu$ s) about 42.22 kV(BIL) maximum without any flash over or puncher.

Keywords: LT Fuse Switch, Resin Insulator, Electric Field

### 1. บทนำ

ในปัจจุบันการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและการไฟฟ้านครหลวง มีการใช้ฟิวส์วิตช์แรงต่ำที่มีฐานฉนวนทำมาจากวัสดุเซรามิกมากกว่า 95% เนื่องจากฉนวนเซรามิกนั้นมีคุณสมบัติที่เหมาะสม ไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติทางกล ทางไฟฟ้า ทางความร้อนและทนต่อสภาพแวดล้อม มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน แต่เนื่องจากกระบวนการและขั้นตอนในการผลิตที่ยุ่งยาก สิ้นเปลืองพลังงาน จึงได้มีผู้คิดค้นวัสดุชนิดอื่นขึ้นมาทดแทน ได้แก่ ฉนวนยางผสม [1] ซึ่งงานวิจัยฉบับดังกล่าวนี้เป็นงานวิจัยเพื่อส่งเสริมอุตสาหกรรมชาติของไทยอีกด้วย

ในส่วนของงานวิจัยฉบับนี้ ผู้เขียนมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาออกแบบฉนวนฟิวส์วิตช์แรงต่ำด้วยวัสดุเรซิน เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำมาใช้ทดแทนวัสดุฉนวนเซรามิกอีกทางเลือกหนึ่ง โดยมีการวิเคราะห์ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ [2] จากนั้นจะทำการออกแบบชิ้นงานจริง เพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติทางกล ทางความร้อนและทางไฟฟ้า โดยที่ฉนวนเรซินที่ได้ทำการวิจัยนี้สามารถผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน [3] ซึ่งฉนวนเรซินที่พัฒนาขึ้นต้องมีคุณสมบัติสามารถทนทานต่อสภาพใช้งานเท่าเทียมหรือดีกว่าฉนวนเซรามิกแบบเดิมและต้องสำคัญคือ มีกระบวนการผลิตที่ง่ายและราคาไม่แพง

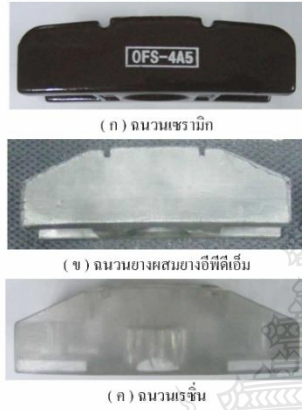
### 2. มาตรฐานฟิวส์วิตช์แรงต่ำ

ในปัจจุบันการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ได้กำหนดคุณสมบัติและมาตรฐานการทดสอบฟิวส์วิตช์แรงต่ำตามมาตรฐาน IEC 60947-3 [3] ซึ่งครอบคลุมสำหรับฟิวส์วิตช์ที่มีฟลักซ์แรงดัน 500 V และฟลักซ์กระแสใช้งานสูงสุด 400 A การติดตั้งใช้งานฟิวส์วิตช์แรงต่ำจะถูกติดตั้งบนคอนสายบริเวณที่มีการติดตั้งมือแปลงระบบจำหน่ายแรงต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การติดตั้งฟิวส์วิตช์แรงต่ำฟลักซ์ 500 V, 400 A

จำนวนฟิวส์สวิตช์แรงต่ำที่นำมาใช้ในการศึกษาวิจัยจะมีรูปร่างลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2 (ก) จำนวนขรมิกของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ (ข) จำนวนขสมยงอิทีดีเอ็ม [1] และ (ค) จำนวนเรซิน มีน้ำหนักเท่ากับ 0.52, 0.27 และ 0.29 กิโลกรัมตามลำดับ และจากการทดสอบความแข็งด้วยดูโรมิเตอร์ (Durometer) จำนวนมีความแข็งเท่ากับ 88 ชอร์ดี (Shore D)



รูปที่ 2 เปรียบเทียบขนวนแต่ละชนิด

3. คุณสมบัติวัสดุขนวนและการทดสอบทางกล

วัสดุขนวนเรซินที่ใช้ทำขนวนสำหรับฟิวส์สวิตช์ มีคุณสมบัติความเป็นขนวนที่ดี ทนความร้อนและทนทานต่อสภาพแวดล้อมซึ่งจะมีการผสมระหว่างตัวเรซินและตัวทำปฏิกิริยาเพื่อให้ออกแข็งตัว โดยทั่วไปการแข็งตัวของเรซินแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงที่ 1) Gel time คือช่วงหลังจากเติมตัว catalyst แล้วจนเรซินจับตัวเป็นขนวน ช่วงที่ 2) Cure Time คือ ช่วงที่เรซินแข็งตัวเต็มที่และเป็นช่วงที่เรซินเย็นตัวลงหลังจากที่มีความร้อนสูงในขณะทำปฏิกิริยาของเรซิน

จากคุณสมบัติขนวนเรซินในตารางที่ 1 จะทำการขึ้นรูปเป็นแผ่นขนวนกว้าง 100 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตรและหนา 1.0 มิลลิเมตร เพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติทางกลประกอบด้วย การทดสอบความแข็ง (ASTM D2240), การทดสอบสมบัติการรับแรงดึง(ASTM D412), การทดสอบความทนทานต่อการขีดตัว การทดสอบดังกล่าวดำเนินการโดยห้องปฏิบัติการทดสอบของศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ จากการทดสอบพบว่า วัสดุขนวนเรซินมีความแข็งเท่ากับ 82 ± 1 Shore D ก่อนการบ่มแรง สามารถรับแรงดึงได้เท่ากับ 37.89 ± 4.5 MPa ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 1

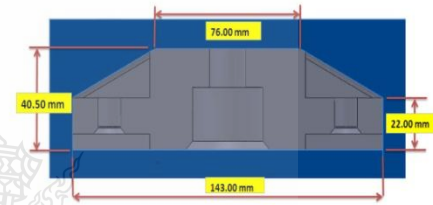
ตารางที่ 1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุขนวนเรซินกับวัสดุอื่นๆ [4]

คุณสมบัติ	PORCHLAIN	NR-EPDM [1]	RESIN (60:40)
Hardness, Shore A, D	88 ± 2	46.7±3	82.0±1
Tensile Strength, MPa	10.34 - 17.24	10.09±0.58	37.89±4.5

4. การออกแบบและจำลองสนามไฟฟ้า

4.1 การออกแบบขนวนสำหรับฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ

ในส่วนของกรออกแบบ ผู้วิจัยได้ทำการกำหนดขนาดรูปร่างและลักษณะของขนวนฟิวส์สวิตช์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งมีขนาดและรูปร่างดังรูปที่ 3 โดยการออกแบบดังกล่าวอ้างอิงขนาดมาตรฐานตามข้อกำหนด IEC [3] และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

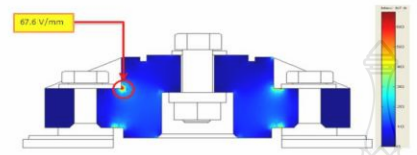


รูปที่ 3 ขนาดรูปร่างของฟิวส์สวิตช์แรงต่ำ

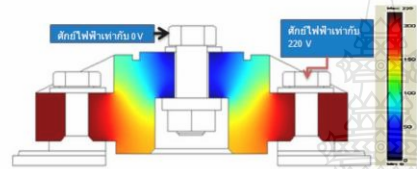
4.2 การจำลองสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าด้วยคอมพิวเตอร์

สำหรับการวิเคราะห์ผลจำลองสนามไฟฟ้าและการกระจายตัวศักย์ไฟฟ้าและทิศทางของศักย์ไฟฟ้าภายในเนื้อขนวนเรซิน ได้ทำการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แสดงดังรูปที่ 4 ตามลำดับ บริเวณที่เป็นขนวนเรซินจะถูกแบ่งเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยมที่ใช้ในการคำนวณเท่ากับ 14,692 เอลิเมนต์ และจำนวนโหนดทั้งหมดเท่ากับ 7,514 โหนด และมีขอบเขตในการคำนวณประกอบด้วย

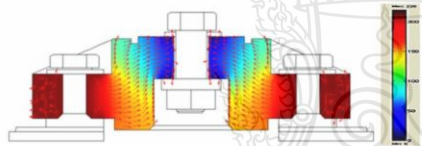
- ขอบเขตการวิเคราะห์เป็นขนวนอากาศและมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 1.0
- ขนวนเรซินมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 3.2-3.9 [5-6]
- บริเวณที่เป็นขนวนและตัวนำทั้งหมดกำหนดค่าให้มีประจุว่าง (Space Charge) และขนวนเรซินเป็นขนวนสมบูรณ์แบบ (Perfect Dielectric) ซึ่งไม่มีค่าความนำไฟฟ้า
- แบบจำลองจะละลายในส่วนที่เป็นฟิวส์ (High Rupture Capacity Fuses) และขั้วต่อสายไฟฟ้าที่ปลายทั้งสอง
- การคำนวณกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนอินยอม (Tolerance) เท่ากับ 1x10<sup>-6</sup> [1]



(ก) ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในเนื่องจนวนแรงดัน



(ข) กระแสตัวของศักย์ไฟฟ้าภายในเนื่องจนวนแรงดัน



(ค) ทิศทางของศักย์ไฟฟ้าภายในเนื่องจนวนแรงดัน

รูปที่ 4 การวิเคราะห์ผลสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าด้วยคอมพิวเตอร์

จากการวิเคราะห์ผลการจำลองสนามไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4 (ก) จะทำให้รู้ว่าจุดที่เกิดสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ จุดที่มีการเชื่อมต่อกับสายป้อน ซึ่งมีค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 67.6 V/mm ดังนั้นเมื่อเทียบกับสนามไฟฟ้าสูงสุดของฉนวนแรงดันแล้ว จึงไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อฉนวนแรงดัน และรูปที่ 4 (ข) และ (ค) คือการกระจายตัวและทิศทางของศักย์ไฟฟ้าภายในเนื่องจนวนแรงดัน ตามลำดับ

จากผลการจำลองฉนวนแรงดันที่วัสดุที่ทำการออกแบบโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จะถูกนำไปขึ้นรูปแม่พิมพ์สำหรับขั้นตอนการผลิตฉนวนที่วัสดุที่แรงค่า โดยใช้วิธีการหล่อ ซึ่งเป็นขบวนการขึ้นรูปที่ง่ายและไม่ยุ่งยาก เหมาะกับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างไม่ซับซ้อน วัสดุเมื่อผสมกับตัวทำแข็งแล้วสามารถแข็งตัวได้เองที่อุณหภูมิห้อง ใช้เวลาประมาณ 30 ถึง 120 นาที การทำให้เรซินคงรูปหรือเรียกว่าเกิดการเชื่อมต่อน้ำไปมาระหว่างสายโซ่ของโมเลกุล

**5. การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าวัสดุที่แรงค่า**

ในส่วนของการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่แน่นอน ได้แบ่งวิธีการทดสอบเป็น 3 หัวข้อหลัก โดยอ้างอิงวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน

**5.1 ผลการทดสอบกำลังทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric Strength)**

ดำเนินการจัดเตรียมวัสดุทดสอบขนาด 100 x 100 มม หนาประมาณ 1-2 มม จำนวน 5 ชิ้น จัดวางลงในภาชนะทดสอบที่บรรจุด้วยฉนวนน้ำมันเพื่อป้องกันการรบกวนไฟลัดวงจร โดยวางชั้นอยู่ระหว่างอิเล็กโตรดทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม ทำการต่อวงจรทดสอบดังรูปที่ 5 และทำการป้อนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ที่ 1 kV/s จนกระทั่งเกิดประกายไฟ จากนั้นจึงนำผลการทดสอบทั้ง 5 ชิ้น ไปหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 5 การทดสอบฉนวนแรงดันขึ้นต่อความทนแรงดันไฟฟ้า

จากผลการทดสอบพบว่าฉนวนแรงดันที่ทำการออกแบบ มีความทนต่อแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย  $E_b = 19.25 \text{ kV/mm}$

**5.2 ผลการทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (Temperature Rise Test)**

ดำเนินการทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มที่กระแสที่กระแส 400 A เป็นเวลา 3 ชั่วโมง(180 นาที) และทำการวัดค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 6 (ก) โดยวัดค่าอุณหภูมิที่วัสดุที่แรงค่าจำนวน 8 จุด



(ก) การวัดค่าและทดสอบวัดค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น 8 จุด



(ข) ผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทั้ง 8 จุด

รูปที่ 6 การทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

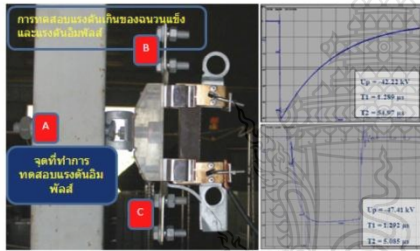


ผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของฟิวส์สวิทช์แรงต่ำจำนวนเพิ่มขึ้นแสดงดังรูปที่ 6 (ข) จากผลการทดสอบพบว่า ค่าอุณหภูมิที่เพิ่มสูงสุดอยู่ที่จุด 3 ซึ่งเป็นจุดต่อระหว่างสายป้อนกับจุดต่อฉนวน โดยค่าอุณหภูมิดังกล่าว ไม่เกินขีดจำกัดที่มาตรฐานกำหนด [3]

**5.3 ผลการทดสอบ ความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าและแรงดันเกินกระแสสลับความถี่ต่ำ**

เป็นการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60947-3 ซึ่งประกอบด้วย การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50  $\mu$ s ที่ระดับแรงดัน 14.8 kV [3] และการทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกินของฉนวนแห้ง ด้วยแรงดันไฟฟ้าที่กระแสสลับความถี่ต่ำ ที่ระดับแรงดัน 2.2 kVrms เป็นเวลา 5 วินาที

โดยทำการป้องกันแรงดันดังกล่าว ระหว่างจุดต่อขั้วไฟฟ้าของฟิวส์สวิทช์แรงต่ำ กับจุดต่อลงดินหรือจุดยึดฐานฟิวส์สวิทช์แรงต่ำกับคอนแทกไฟฟ้า (B-A) ดังรูปที่ 7 (ซ้ายมือ)



รูปที่ 7 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า และแรงดันเกินกระแสสลับของฟิวส์สวิทช์แรงต่ำจำนวนเพิ่มขึ้น

ผลการทดสอบฟิวส์สวิทช์แรงต่ำจำนวนเพิ่มขึ้นด้วยแรงดันกระแสสลับความถี่ต่ำ ไม่ทำให้เกิดการวาวไฟตามผิว (Flashover) หรือเกิดการเบรคดาวน์ (Breakdown) ที่ฐานฟิวส์สวิทช์แรงต่ำแต่อย่างใด และในส่วนของผลการทดสอบ ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50  $\mu$ s สามารถทนต่อระดับแรงดันตามมาตรฐานกำหนด และมีค่าความคงทนสูงสุด 42.22 kV (BIL) โดยแสดงผลการทดสอบเป็นรูปคลื่นเต็มอิมพัลส์ ดังรูปที่ 7 (ขวามือบน) นอกจากนี้ ยังได้ทำการทดสอบ ค่าแรงดันเบรคดาวน์สถิติ 50% ซึ่งแสดงผลการทดสอบเป็นรูปคลื่นคัตอิมพัลส์ ดังรูปที่ 7 (ขวามือล่าง) โดยมีค่าแรงดันที่คายอด 47.41 kV ซึ่งเป็นตัวอย่างการหาค่าแรงดันอิมพัลส์เบรคดาวน์ 50% ( $U_{50\%}$ )

**6. สรุป**

จากผลการออกแบบและทดสอบฉนวนจำนวนเพิ่มขึ้นสำหรับฟิวส์สวิทช์แรงต่ำ เพื่อใช้เป็นแนวทางการศึกษา สำหรับการนำฉนวนดังกล่าว

ไปใช้ทดแทน ฉนวนแบบเซรามิกที่ใช้ในปัจจุบัน จากการศึกษาพบว่า ฉนวนจำนวนเพิ่มขึ้น มีคุณสมบัติทนต่อสภาวะทางกลตามมาตรฐาน D2248, D142 และ D149 อีกทั้งยังมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC 60947-3 เทียบเคียงฉนวนแบบเซรามิก โดยฉนวนจำนวนเพิ่มขึ้นที่ออกแบบมีคุณสมบัติทางกล คือ มีความแข็ง  $82 \pm 1$  Shore D รับแรงดึงได้สูงสุด  $37.89 \pm 4.5$  Mpa. และมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัว  $500.7 \pm 24.25$  ตามลำดับ และมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าคือ มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz สูงสุด 19.25 kV/mm มีความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50  $\mu$ s ที่ระดับแรงดันสูงสุด 42.22 kV(BIL) สามารถผ่านการทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกินของฉนวนแห้งตามมาตรฐานกำหนด และมีคุณสมบัติผ่านการทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเป็นอย่างดี

ดังนั้น จากผลการศึกษาวิเคราะห์คุณสมบัติดังกล่าว จึงมั่นใจได้ว่า ฉนวนจำนวนเพิ่มขึ้นสามารถนำไปใช้ทดแทนฉนวนแบบเซรามิกสำหรับฟิวส์สวิทช์แรงต่ำได้อย่างเหมาะสม และในส่วนของ การทดสอบแบบติดตั้งใช้งานจริงรวมทั้งการทดสอบอายุการใช้งานนั้น คณะผู้วิจัยกำลังดำเนินการศึกษาและพัฒนาในขั้นต่อไป

**เอกสารอ้างอิง**

- [1] นิธิพงศ์ ปานกลาง, อนุภักดิ์ พันธังและกฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดิ์พิชญ์ “การออกแบบฉนวนยางธรรมชาติสำหรับฟิวส์สวิทช์แรงต่ำ”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 35 (EECON-35), 12 – 14 ธันวาคม 2555.
- [2] A.B.J Reece and T.W. Preston, “Finite Element Methods in Electrical Power Engineering”, Oxford University Press Inc., New York, 2000
- [3] IEC 60947-3, “Low – Voltage Switchgear and Control Gear – Part 3: Switch, Disconnectors, Switch –Disconnectors and Fuse-Combination Units”, Edition 2.2, 2005
- [4] มุทศศักดิ์ โกษิยาภรณ์ “วิชาสวิตช์ไฟฟ้า” คณะวิศวกรรมศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- [5] จตุพร วุฒิกนกกาญจน์ “Polymer Characterization and Analysis” คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (มจธ)
- [6] ตำรา วังชัชวาล, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, พิมพ์ครั้งที่ 3, มีนาคม 2549



นายวิชา โสสีทา กำลังศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สาขางานวิจัยที่สนใจได้แก่ วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, วัสดุฉนวนไฟฟ้า

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 36 (EECON-36) 11 - 13 ธันวาคม 2556 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายวิชา โสสีทา
วัน เดือน ปี	3 สิงหาคม 2520
ที่อยู่	1 หมู่ 3 ต.บัวขาว อ.กุฉินารายณ์ จ.กาฬสินธุ์ 46110
การศึกษา	
พ.ศ. 2543	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง จากมหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2543 – 2548	พนักงานบริษัทฮานา เซมิคอนดักอิเล็กทรอนิกส์ มหาชน จำกัด จ. พระนครศรีอยุธยา
พ.ศ. 2548 – 2552	พนักงานบริษัทไลท้ออน อิเล็กทรอนิกส์ (ประเทศไทย) จำกัด จ. ปทุมธานี
พ.ศ. 2552 – ปัจจุบัน	พนักงานบริษัทฮานา เซมิคอนดักอิเล็กทรอนิกส์ มหาชน จำกัด จ. พระนครศรีอยุธยา
เบอร์โทร	0863265372
อีเมล	wittayas@ayt.hanabk.th.com, witty_na@hotmail.com