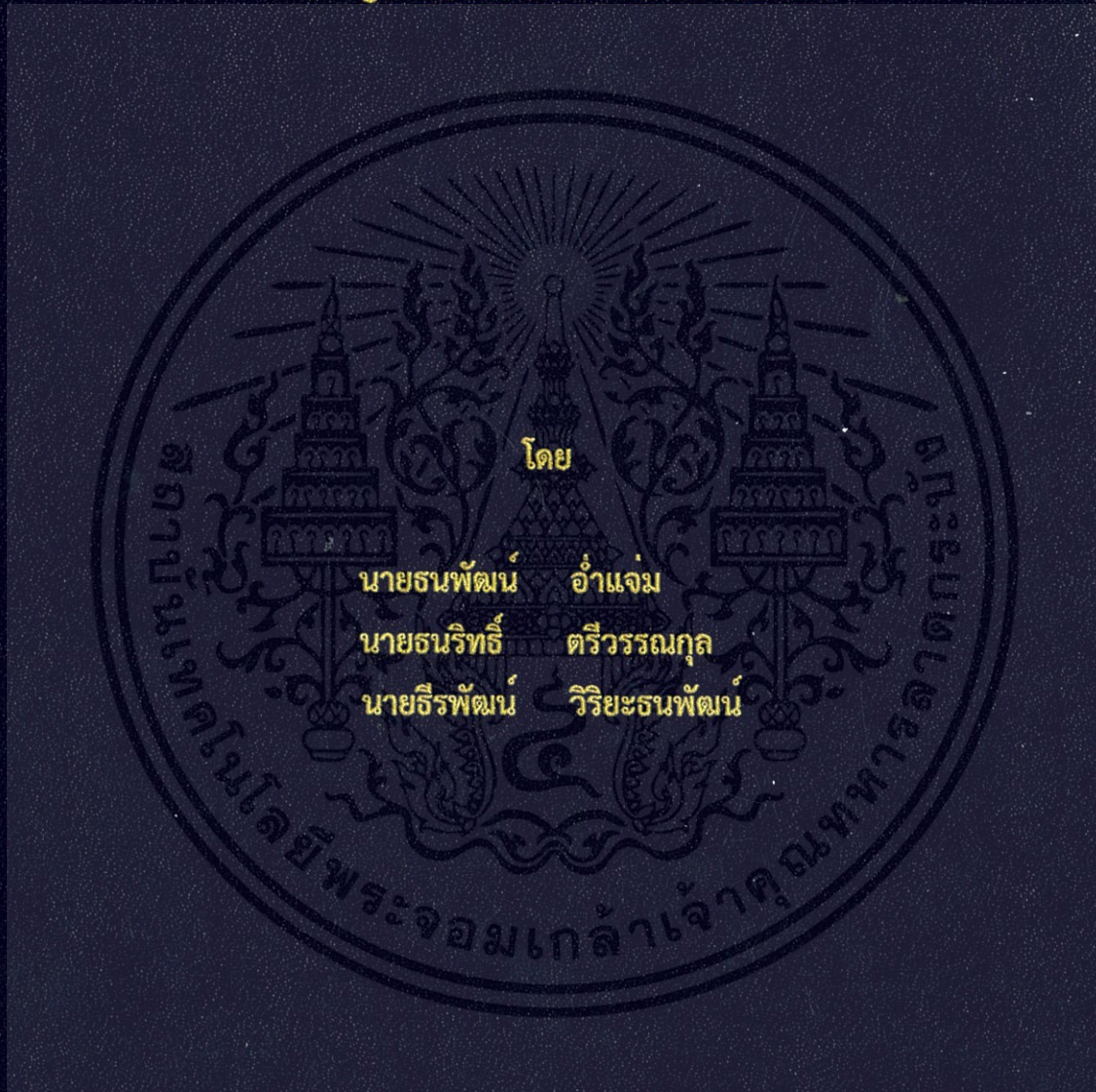


การออกแบบชุดทดลองสร้างชุดทดสอบความคงทน
ต่อแรงดันกระแสสลับในสภาวะเปียก
Design and Construction of AC withstand
voltage test under wet condition



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

การออกแบบชุดทดลองสร้างชุดทดสอบความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับในสภาวะเปียก
Design and Construction of AC withstand voltage test under wet condition



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND CONSTRUCTION OF AC WITHSTAND VOLTAGE TEST
UNDER WET CONDITION



A PAPER SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BECHER OF ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2557

การออกแบบชุดทดลองสร้างชุดทดสอบความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับในสภาวะเปียก
Design and Construction of AC withstand voltage test under wet condition



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.พีรฤติ ยุทธโกวิท
ผศ.วรกัลป์ ลิ้มเจริญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2557

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบชุดทดลองสร้างชุดทดสอบความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับในสภาวะเปียก

ผู้จัดทำ



1. นาย ธนพัฒน์ อ่ำแจ่ม
2. นาย ธนริทธิ์ ตริวิรรณกุล
3. นาย อธิพัฒน์ วิริยะธนพัฒน์

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีรวุฒิ ยุทธโกวิท)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วรกมลป์ ลี้มเจริญ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและสร้างชุดทดสอบความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับในสภาวะเปียก

นายธนพัฒน์ อ่ำแจ่ม

นายธนริทธิ์ ตริวรรณกุล

นายธีรพัฒน์ วิริยะธนพัฒน์

ผศ.ดร.พีรฤดี ยุทธโกวิท

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.วรกัลป์ ลิ้มเจริญ

อาจารย์ที่ปรึกษา

บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและประกอบสร้างชุดทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันกระแสสลับภายในสภาวะเปียก โดยชุดทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันกระแสสลับภายในสภาวะเปียกจะประกอบด้วย ชุดสร้างน้ำปราศจากประจุ (Deionization water) ชุดจำลองฝนเทียม และแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ โดยการออกแบบชุดทดสอบนี้จะอ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบ IEEE Std 4 (2013), IEC 60060-1 (2010), ANSI C29.1-1988 และมอก.354-2523 โดยชุดสร้างน้ำปราศจากประจุจะสร้างน้ำที่มีสภาพนำไฟฟ้า (Conductivity) ที่มีค่าต่ำ (0 ถึง 4 $\mu\text{S}/\text{cm}$) และเพื่อให้มีสภาพนำไฟฟ้าที่เหมาะสมตามที่มาตรฐานกำหนด (85 – 115 $\mu\text{S}/\text{cm}$) จึงต้องมีการผสมน้ำกับสารละลายเกลือ โดยชุดจำลองฝนเทียมสามารถพ่นน้ำลงบนตัวอย่างลูกถ้วยฉนวนด้วยอัตราการหยดของน้ำตามมาตรฐาน (แนวราบและแนวตั้ง 1 - 2 mm) ซึ่งแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับประกอบด้วยหม้อแปลงทดสอบ ขนาด 5 kVA 100 kV และชุดควบคุมการปรับแรงดันและระบบการตัดวงจรเมื่อกระแสเกินที่เกิดจากการเกิดเบรกดาวน์ของอุปกรณ์ทดสอบ เพื่อเป็นการยืนยันความสามารถในการทดสอบของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจึงได้ทำการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันกระแสสลับภายในสภาวะเปียกของอุปกรณ์ทดสอบ คือ ลูกถ้วยฉนวน 2 ชนิด ได้แก่ ชนิด 52-1 และ ชนิด 52-4 ที่ผ่านการทดสอบจากผู้ผลิตและได้รับการรับรองจากมาตรฐานแล้ว (ทดสอบที่แรงดัน 30kV และ 50kV สำหรับลูกถ้วยชนิด 52-1 และชนิด 52-4 ตามลำดับ เป็นเวลา 1 นาที) จากการทดสอบพบว่าลูกถ้วยฉนวนสามารถผ่านการทดสอบด้วยชุดทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันกระแสสลับภายในสภาวะเปียกที่ออกแบบและประกอบสร้างขึ้น นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบแรงดันวาบไฟตามผิวเปียกของลูกถ้วยทั้งสองชนิดที่แรงดัน 35 kV และ 54 kV พบว่าระบบป้องกันกระแสเกินทำงานได้เป็นอย่างดีโดยหม้อแปลงทดสอบไม่เกิดความเสียหายจากการทดสอบวาบไฟตามผิว จากการทดลองทั้งหมดนี้สามารถสรุปได้ว่าชุดทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันกระแสสลับภายในสภาวะเปียกชุดนี้สามารถทำการทดสอบได้ตามมาตรฐาน

DESIGN AND CONSTRUCTION OF AC WITHSTAND VOLTAGE TEST UNDER WET CONDITION

Tanapat	Umjaem	
Tanarit	Treewannakuln	
Theerapat	Viriyathanapat	
Asst.Prof.Dr.Peerawut	Yutthagowith	Advisor
Asst.Prof.Worrakan	Limcharoen	Advisor

Abstract

This project presents design and construct of an AC withstand voltage test system under wet condition. This system consists of a deionized water filter, an artificial rain spray and an AC voltage source. The design and construction of the AC withstand voltage test system under wet condition are based on IEEE Std 4 (2013), IEC 60060-1 (2010), ANSI C29.1-1988 and TIS.354-1980 standard. The deionized water filter can produce deionization water with low conductivity of 0 to 4 $\mu\text{S}/\text{cm}$. To obtain the water conductivity (85 – 115 $\mu\text{S}/\text{cm}$) according to the standard, the deionized water has to be mixed with sodium chloride solution. The artificial rain spray can produce the artificial rain to the test object with the standard flow rate (horizontally and vertically of 1 to 2 mm). The AC voltage source consist of a testing transformer (5kVA 100kV), a voltage controller and a fault protection system are used to disconnect the circuit to protect the over current which do the damage on the transformer windings when breakdown occurred. To confirm the testing ability of the developed system, the testing system was used in the AC voltage withstand test on the certificated ANSI class 52-1 and ANSI class 52-4 insulators (tested at 30kV for ANSI class 52-1 and 50kV for ANSI class 52-4) under the wet condition. From the experimental results, the developed system can utilize well for the AC voltage withstand test under the wet condition. Moreover the AC flashover voltage test was carried out on the insulators (35 kV for ANSI class 52-1 and 54kV for ANSI class 52-4) and the protection system can work well in disconnection of the AC voltage source without damage on the testing transformer. It can be concluded that developed stem can employ well in AC voltage withstand and flashover voltage tests according to the standard requirement.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยเหลือสนับสนุนในหลายด้านจากหลายๆท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.พีรวุฒิ ยุทธโกวิท, ผศ.วรภัทร์ ลิ้มเจริญ, รศ.ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล และผศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษา และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่ได้ให้การช่วยเหลือในด้านความรู้ทั้งทางทฤษฎีและทางปฏิบัติ และให้การสนับสนุนในการหาทุนเพื่อใช้ในการทำโครงการ

ขอขอบพระคุณ คุณปณยวีร์ ฉายศิริ ที่ได้กรุณาให้การดูแล ช่วยเหลือ และแนะนำข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการมาโดยตลอด รวมถึงได้ให้ความกรุณาตรวจแก้ไขปริญญานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณพี่ๆปริญญโทและปริญญเอก เพื่อนๆห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงและห้องปฏิบัติการอื่นๆ น้องๆภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ทุกคนที่ได้ช่วยเหลือในการทำโครงการนี้ให้ผ่านพ้นไปได้ด้วยดี

นอกจากนี้ผู้จัดทำต้องขอขอบคุณ คุณนครศักดิ์ แสงศรี เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้เบิกใช้เครื่องมือ รวมถึงคุณนิตยา นากสุข และคุณสุภารัตน์ พุ่มย้อย เจ้าหน้าที่ห้องธุรการที่ให้ความเมตตาและดูแลมาโดยตลอด

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจอีกทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
Abstract	II
กิจติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VI
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	2
1.4 วิธีที่ใช้ในโครงการ	2
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	4
1.7 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า	5
2.1.1 ชนิดของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า	5
2.1.2 ลักษณะสมบัติที่สำคัญของลูกถ้วยฉนวน	8
2.2 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ	9
2.2.1 เงื่อนไขของน้ำที่ใช้ในการทดสอบ	9
2.2.2 การเตรียมวัสดุทดสอบ	9
2.2.3 การเก็บตัวอย่างน้ำที่ใช้ทดสอบ	10
2.2.4 กระบวนการทำให้วัสดุทดสอบเปียกก่อนการทดสอบ	11
2.2.5 ข้อจำกัดในการทดสอบความคงทนต่อแรงดันในสภาวะเปียก	11
2.2.6 การติดตั้งลูกถ้วยแบบแขวนเพื่อทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันในสภาวะเปียก	12
2.2.7 การควบคุมแรงดันทดสอบ	12
2.2.7.1 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันความถี่ต่ำในสภาวะเปียก	12
2.2.7.2 การทดสอบวาบไฟตามผิวความถี่ต่ำในสภาวะเปียก	14
2.2.8 การปรับแก้ค่าเนื่องจากผลของความดันอากาศ, อุณหภูมิและความชื้น	17
2.3 น้ำปราศจากไอออน	20
2.3.1 กระบวนการผลิตน้ำปราศจากไอออน	20
2.3.2 กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน	22
2.3.3 ความแตกต่างระหว่าง Separate bed และ mixed bed	22

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.4 การวัดปริมาณไอออน	23
2.3.5 ระดับความบริสุทธิ์ตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง	23
บทที่ 3 การออกแบบ	25
3.1 แนวคิดพื้นฐาน	25
3.2 การออกแบบหัวพ่นน้ำ	26
3.3 การออกแบบแนวหัวพ่นน้ำ	28
3.4 ระยะปลอดภัย	33
3.5 การติดตั้งแนวหัวพ่นน้ำ	33
3.5.1 การหาอัตราเร็วน้ำจากปลายหัวพ่นน้ำ	33
3.5.2 การคำนวณการเคลื่อนที่ของน้ำแบบโปรเจกไทล์	33
3.6 การติดตั้งวัตถุทดสอบ	35
3.7 การคำนวณคุณสมบัติของชุดมอเตอร์ปั้มน้ำ	35
3.8 การออกแบบถังเก็บน้ำที่ใช้ในการทดสอบ	37
3.9 การออกแบบภาชนะเก็บตัวอย่างน้ำ	37
3.10 การออกแบบวงจรทดสอบ	38
3.11 การประกอบสร้างชุดทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันในสภาวะเปียก	39
บทที่ 4 การทดสอบและผลการทดสอบ	45
4.1 การทดสอบผสมน้ำเพื่อใช้ในการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันในสภาวะเปียก	45
4.2 การติดตั้งชุดทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันในสภาวะเปียก	47
4.2.1 การติดตั้งแนวหัวพ่นน้ำ	47
4.2.2 การติดตั้งวงจรทดสอบและวัตถุทดสอบ	51
4.3 ขั้นตอนการทดสอบภายใต้สภาวะเปียก	55
4.4 ผลการทดสอบ	56
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	57
5.1 สรุป	57
5.2 อุปสรรค ข้อเสนอแนะ และแนวทางการแก้ไข	58
เอกสารอ้างอิง	59
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก บทควมวิขาการ	61
ภาคผนวก ข มาตรฐาน IEEE Std 4 TM -2013	66
ภาคผนวก ค มาตรฐาน IEC 60060-1, Edition 3.0 - 2010	71
ภาคผนวก ง มาตรฐาน ANSI C29.1-1988	75
ภาคผนวก จ มาตรฐาน ANSI C29.2-1992	94
ภาคผนวก ฉ มาตรฐาน ANSI C29.8-1985	106
ภาคผนวก ช มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม	110

เอกสาร **ประวัติผู้เขียน** ที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

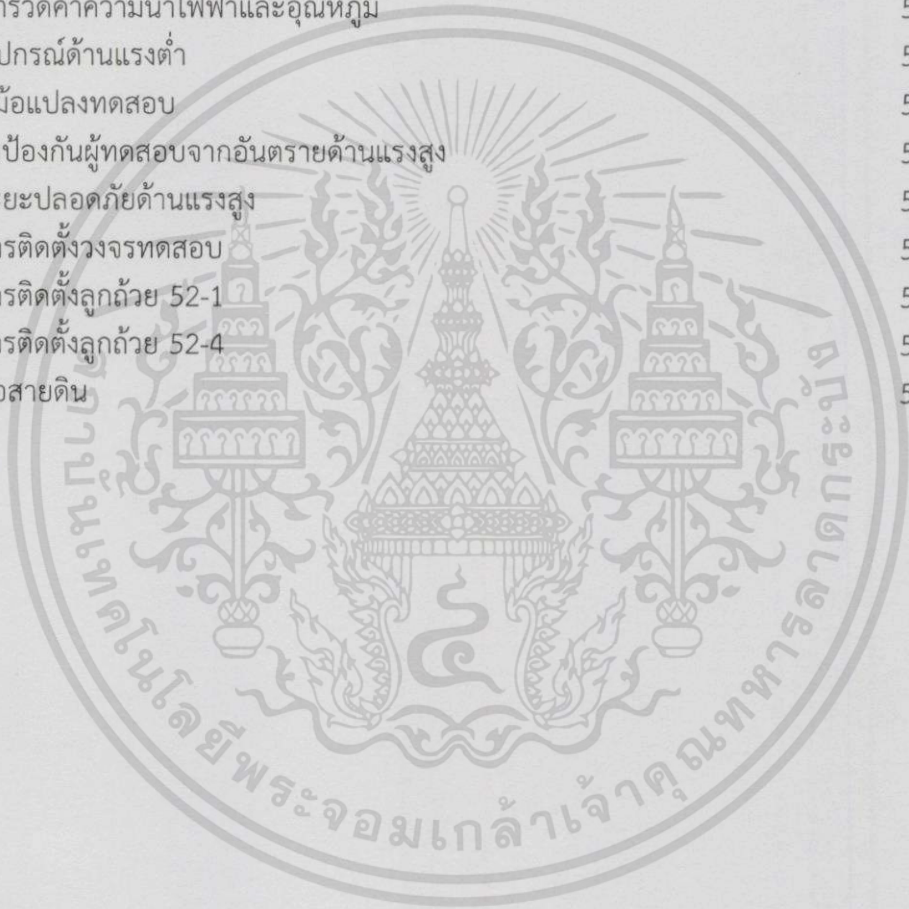
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลูกถ้วยชนิดต่างๆ	7
2.2 ตัวอย่างภาชนะสะสมน้ำ	10
2.3 ตัวอย่างของหัวฉีดจากมาตรฐาน	11
2.4 การติดตั้งลูกถ้วยแบบแขวน	12
2.5 ลูกถ้วยแขวนชนิด ball-and-socket ในระบบสายส่ง (ANSI Class 52-3, 52-5, 52-8, และ 52-11)	15
2.6 ลูกถ้วยแขวนชนิดเครวิส (Clevis) ในระบบสายส่ง (ANSI Class 52-4, 52-6, 52-10, และ 52-12)	16
2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมบูรณ์ (g/m^3) อุณหภูมิแวดล้อม ($^{\circ}C$) และความชื้นสัมพัทธ์ (%)	19
2.8 ลำดับขั้นตอนการกรอง	20
2.9 หลักการของรีเวอร์สออสโมซิส	21
3.1 กระบวนการผลิตน้ำในการทดสอบ	25
3.2 หัวฉีดทองเหลืองต้นแบบ (แยกส่วน)	26
3.3 หัวฉีดทองเหลืองต้นแบบ (ระบุขนาด)	27
3.4 ข้อต่อระหว่างแนว	28
3.5 ตำแหน่งปลายท่อสำหรับใส่ Pressure Gauge	28
3.6 แนวท่อสำหรับชุดพ่นน้ำและระยะต่างๆ	29
3.7 คานเหล็กฉากรับแรงสำหรับ 1 แนวหัวพ่นน้ำและระยะของ ยูโบลต์ ขนาด 3/4"	30
3.8 คานเหล็กฉากวางบนบ่ารับแรง	31
3.9 ส่วนด้านข้างของคานเหล็กฉากและบ่ารับแรง	32
3.10 ระยะการติดตั้งแนวหัวพ่นน้ำและตำแหน่งลูกถ้วย	34
3.11 การออกแบบการติดตั้งวัตถุทดสอบ	35
3.12 การออกแบบภาชนะสะสมน้ำในแนวราบ (ชาย) และในแนวตั้ง (ขวา)	37
3.13 การออกแบบวงจรทดสอบความคงทนต่อแรงดันในสภาวะเปียก	38
3.14 ส่วนหัวพ่นน้ำทองเหลืองและระยะต่างๆ	39
3.15 แนวหัวพ่นน้ำยึดกับเหล็กฉากรับแรงโดยแขวนบนนั่งร้านด้วยยูโบลต์, ระยะต่างๆ และจุดแก้ไข (วงกลมสีแดง)	40
3.16 แนวหัวพ่นน้ำยึดกับเหล็กฉากรับแรงโดยแขวนบนนั่งร้านด้วยยูโบลต์แนวเฉียง	41
3.17 ถังเก็บน้ำขนาด 100 ลิตร จำนวน 3 ถัง	42
3.18 ป้อนน้ำ	42
3.19 Nameplate ของป้อนน้ำที่เลือกใช้	43
3.20 ภาชนะเก็บน้ำตัวอย่างในแนวตั้ง	43
3.21 ภาชนะเก็บตัวอย่างน้ำในแนวราบ	44

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 การทดสอบผสมน้ำปริมาณ 100 ลิตร กับเกลือปริมาณต่างๆ	46
4.2 การวัดค่าความนำไฟฟ้า	46
4.3 การติดตั้งแนวหัวฉีด, ลูกถ้วย และระยะต่างๆ	48
4.4 การติดตั้งถังน้ำและปั้ม	48
4.5 การเก็บตัวอย่างน้ำที่ตกกระทบในแนวตั้ง	49
4.6 การเก็บตัวอย่างน้ำที่ตกกระทบในแนวราบ	49
4.7 การวัดปริมาณน้ำเพื่อหาอัตราการหยดของหยดน้ำ	50
4.8 การวัดค่าความนำไฟฟ้าและอุณหภูมิ	50
4.9 อุปกรณ์ด้านแรงต่ำ	51
4.10 หม้อแปลงทดสอบ	52
4.11 รั้วป้องกันผู้ทดสอบจากอันตรายด้านแรงสูง	52
4.12 ระยะปลอดภัยด้านแรงสูง	53
4.13 การติดตั้งวงจรทดสอบ	53
4.14 การติดตั้งลูกถ้วย 52-1	54
4.15 การติดตั้งลูกถ้วย 52-4	54
4.16 บ่อสายดิน	55



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 เงื่อนไขของหยดน้ำ	9
2.2 ขอบเขตและค่าพิกัดความคงทนต่อแรงดันในสภาวะเปียกความถี่ต่ำของลูกถ้วยแขวนและลูกถ้วยหลัก (Cap and Pin Type)	13
2.3 ขอบเขตและค่าพิกัดแรงดันวาบไฟตามผิวในสภาวะเปียกความถี่ต่ำของลูกถ้วยแขวนชนิดบอลและซอคเกต (Ball and socket) ในระบบสายส่ง (ANSI Class 52-3, 52-5, 52-8, และ 52-11)	15
2.4 ขอบเขตและค่าพิกัดแรงดันวาบไฟตามผิวในสภาวะเปียกความถี่ต่ำของลูกถ้วยแขวนชนิดเครวิส (Clevis) ในระบบสายส่ง (ANSI Class 52-4, 52-6, 52-10, และ 52-12)	16
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า g และค่า m ในการหาค่าแก้	18
2.6 ไอออนชนิดต่างๆที่ผสมอยู่ในน้ำ	21
2.7 American Society for Testing and Materials (ASTM) D1193-91	23
2.8 ASTM Electronics and Semiconductor Grade Water (D5127-99)	24
2.9 National Committee for Clinical Laboratory Standards (NCCLS) – 1988	24
2.10 College of American Pathologists (CAP) – 1988	24
4.1 ความสัมพันธ์ของค่าความนำไฟฟ้าของน้ำที่ผ่านกระบวนการกรองรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) และน้ำที่ผ่านกระบวนการกรองเอาประจุออก (Deionization) ปริมาณ 100 ลิตร ($\mu\text{S}/\text{cm}$) และปริมาตรเกลือ (cc)	45
4.2 อัตราการหยดของหยดน้ำในแนวตั้งและราบ (mm/min), อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) และค่าความนำไฟฟ้าจากภาชนะเก็บตัวอย่าง ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	47
4.3 ค่าพิกัดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	51
4.4 ผลการทดสอบลูกถ้วยขนาด 52-1 ที่แรงดันไฟฟ้า 30 kV	56
4.5 ผลการทดสอบลูกถ้วยขนาด 52-4 ที่แรงดันไฟฟ้า 50 kV	56
4.6 ผลการทดสอบการเกิดวาบไฟตามผิวลูกถ้วย 52-1	56
4.7 ผลการทดสอบการเกิดวาบไฟตามผิวลูกถ้วย 52-4	56

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบไฟฟ้าแรงดันสูงในประเทศไทยมักถูกติดตั้งอยู่กลางแจ้ง เช่น สายตัวนำ เสาไฟฟ้าแรงสูง รวมไปถึงสถานีไฟฟ้าย่อยที่มักเป็นแบบกลางแจ้งโดยมีอากาศเป็นฉนวน (Air Insulator Substation) ในประเทศไทยลูกถ้วยฉนวนเป็นฉนวนที่ถูกนำมาใช้งานในระบบส่งจ่าย และระบบจำหน่ายมากที่สุด โดยเฉพาะลูกถ้วยฉนวนแบบแขวน ซึ่งมีความสะดวกในการใช้งาน กล่าวคือสามารถเพิ่มหรือลดจำนวนลูกถ้วยได้ตามระดับแรงดันที่ใช้งานในระบบ หน้าที่ที่สำคัญอีกประการของลูกถ้วยฉนวนคือ การรับแรงทางกล ไม่ว่าจะเป็นแรงดึง หรือแรงกดของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบไฟฟ้าแรงสูง นอกจากนี้ลูกถ้วยฉนวนจะต้องสามารถทนต่อแรงดันใช้งานในระบบ และจะต้องเกิดการวาวไฟตามผิวหากมีแรงดันเกินเกิดขึ้นในระบบเพื่อให้แรงดันเกินลงสู่ดินโดยเร็วที่สุด ซึ่งแรงดันเกินที่เกิดขึ้นอาจเกิดขึ้นได้ตามธรรมชาติ หรือการกระทำของมนุษย์ เช่น แรงดันเกินที่เกิดจากฟ้าผ่า (Lightning Impulse) และแรงดันเกินที่เกิดจากการสับสวิตช์ (Switching Impulse) นอกจากนี้ลูกถ้วยฉนวนส่วนใหญ่ยังมักถูกติดตั้งอยู่กลางแจ้ง มาตรฐานจึงกำหนดให้ลูกถ้วยฉนวนต้องผ่านการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันในสภาวะเปียก กล่าวคือเมื่อลูกถ้วยฉนวนถูกติดตั้งและใช้งานในขณะที่ฝนตก ลูกถ้วยฉนวนจะต้องไม่เกิดการวาวไฟตามผิวผ่านหยดน้ำของฝนในขณะที่มีการจ่ายแรงดันอยู่ในระบบ

ปัจจุบันการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันในสภาวะเปียกในประเทศไทยยังมีอยู่เป็นจำนวนน้อยมาก ยกตัวอย่างเช่น ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (บางพลี) เป็นต้น ในโครงการนี้จึงได้ทำการออกแบบและประกอบสร้างชุดต้นแบบชุดทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันในสภาวะเปียก โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE Std 4 (2013) [1], IEC 60060-1 (2010) [2], ANSIC29.1-1988 [3] และมอก.354-2523 [4] เพื่อนำไปใช้ในการทดสอบและการวิจัยในทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง อีกทั้งยังเป็นการลดการนำเข้าจากต่างประเทศและเพิ่มศักยภาพให้กับ ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบและสร้างชุดทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันในสภาวะเปียก
2. เพื่อศึกษาการทดสอบลูกถ้วยฉนวนในสภาวะเปียก
3. เพื่อรองรับงานทดสอบทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง
4. เพื่อส่งเสริมให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการทดสอบลูกถ้วยฉนวนแบบแขวนในสภาวะเปียก
2. ออกแบบและประกอบสร้างชุดทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันในสภาวะเปียกของลูกถ้วยฉนวน
3. ทำการทดสอบความคงทนต่อแรงดันในสภาวะเปียกของลูกถ้วยฉนวน
4. ทำปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ

1. ศึกษาทฤษฎีและมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันในสภาวะเปียก
2. ศึกษาทฤษฎีและมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับหัวพ่นน้ำเพื่อใช้ในการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันในสภาวะเปียก
3. ออกแบบและจำลองรูปแบบของชุดหัวพ่นน้ำเพื่อใช้ในการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันในสภาวะเปียก
4. ทำการประกอบสร้างชุดหัวพ่นน้ำเพื่อใช้ในการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันในสภาวะเปียก
5. ทำการทดสอบชุดทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันในสภาวะเปียก
6. ปรับปรุงและแก้ไขชุดทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันในสภาวะเปียกให้เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด
7. จัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.5 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

แผนการทำงาน	ปีการศึกษา 2557												
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	
1. ศึกษาทฤษฎี และมาตรฐาน ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ ความคงทนต่อแรงดันในสภาวะ เปียก	←-----→												
2. ศึกษาทฤษฎี และมาตรฐาน ที่เกี่ยวข้องกับหัวพ่นน้ำ ทดสอบความคงทนต่อแรงดัน ในสภาวะเปียก	←-----→												
3. ออกแบบและจำลอง รูปแบบของชุดหัวพ่นน้ำ ทดสอบความคงทนต่อแรงดัน ในสภาวะเปียก	←-----→												
4. ทำการสร้างชุดหัวพ่นน้ำ ทดสอบความคงทนต่อแรงดัน ในสภาวะเปียก	←-----→												
5. ทำการทดสอบความคงทน ต่อแรงดันในสภาวะเปียก					←-----→								
6. ปรับปรุงและพัฒนาชุดหัว พ่นน้ำทดสอบความคงทนต่อ แรงดันในสภาวะเปียก					←-----→								
7. วิเคราะห์ปรับปรุงผลการ ทดสอบ									←-----→				
8. จัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับ สมบูรณ์									←-----→				

หมายเหตุ ←-----→ คือ ระยะเวลาปฏิบัติงานที่วางแผนไว้

 ←-----→ คือ ระยะเวลาปฏิบัติงานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. เพื่อออกแบบและสร้างชุดหัวพ่นน้ำเพื่อใช้ในการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันกระแสสลับในสภาวะเปียกได้ตามมาตรฐานที่กำหนด
2. มีความรู้ความเข้าใจในการออกแบบและทดสอบชุดหัวพ่นน้ำเพื่อใช้ในการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันกระแสสลับในสภาวะเปียก
3. มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการปรับปรุงค่าความต้านทานของน้ำที่ใช้ในการทดสอบ
4. เพื่อวิเคราะห์และปรับปรุงชุดหัวพ่นน้ำเพื่อใช้ในการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันสูงกระแสสลับในสภาวะเปียกได้ตามข้อกำหนดที่ตั้งไว้
5. ชุดหัวพ่นน้ำเพื่อใช้ในการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันกระแสสลับในสภาวะเปียกที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้นเพื่อใช้รองรับงานที่เกี่ยวข้องกับงานทำสอบและงานวิจัยในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง

1.7 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

วรศักดิ์ กาจจัดโรค และ คณะ, “การออกแบบสร้างเครื่องปรับสภาพความต้านทานน้ำเพื่อใช้ในการทดสอบลูกถ้วยฉนวนในสภาวะเปียก”, ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, 2546

จักรพันธ์ พรารณานฤดี และ คณะ, “การออกแบบและสร้างห้องทดสอบลูกถ้วยฉนวนในสภาวะเปรอะเปื้อน”, ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันในสภาวะเปียกในโครงการนี้จะมุ่งเน้นทดสอบลูกถ้วยแบบแขวนโดยเฉพาะ ในบทนี้จึงขอกล่าวถึง มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ วิธีการทดสอบ คุณสมบัติของลูกถ้วยแบบแขวน และการเตรียมน้ำที่ใช้ในการทดสอบ

2.1 ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า [5]

ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า (Insulators) คืออุปกรณ์ฉนวนที่ใช้สำหรับยึดโยงหรือรองรับภาระทางกลจากตัวนำไฟฟ้าและทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้าให้กับตัวนำในระบบไฟฟ้าแรงสูง เพื่อป้องกันการลัดวงจรลงดินเนื่องจากศักย์ไฟฟ้าของตัวนำมีค่ามากกว่าศักย์ดิน และใช้ยึดตัวนำไฟฟ้าให้อยู่ในตำแหน่งที่ติดตั้งอย่างมั่นคงไม่แกว่งหรือเคลื่อนไหวเข้าหากันจนอาจทำให้เกิดอุบัติเหตุขึ้นได้ ทั้งนี้ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ายังถูกใช้อย่างแพร่หลายในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงและระบบจำหน่ายไฟฟ้าอีกด้วย

ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าสามารถแบ่งตามวัสดุที่ใช้ผลิตได้สามประเภท คือ ลูกถ้วยพอร์ซเลน (Porcelain), ลูกถ้วยแก้ว (Toughened glass), และลูกถ้วยจากสารสังเคราะห์ เช่น ยาง อีพอกซี เสริมใยแก้ว และคาร์บอนไฟเบอร์ เป็นต้น โดยลูกถ้วยแต่ละชนิดจะมีพื้นที่ในการติดตั้งและใช้งานแตกต่างกัน เช่น ติดตั้งภายในอาคารหรือในพื้นที่ที่ความชื้นต่ำจะนิยมใช้ลูกถ้วยฉนวนสารสังเคราะห์ ติดตั้งภายนอกอาคารหรือกลางแจ้ง ใช้ลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน เนื่องจากมีความคงทนต่อสภาพอากาศ เป็นต้น

2.1.1 ชนิดของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า

นอกจากการแบ่งประเภทของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าตามวัสดุที่นำมาผลิตขึ้นแล้ว ยังสามารถแบ่งชนิดของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้านี้ตามการใช้งานได้อีกด้วย เนื่องจากลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าแต่ละชนิดมีการใช้งาน การติดตั้ง ระดับแรงดันไฟฟ้าใช้งานแตกต่างกัน จึงมีการแบ่งชนิดลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (มอก.) [4] ซึ่งร่างตามมาตรฐาน American National Standard Institute (ANSI) [3] ได้ดังนี้

1. ลูกถ้วยก้านตรง (Pin Insulator) ใช้ยึดสายไฟฟ้าให้ตรึงอยู่กับที่โดยการวางพาดสายไฟฟาลงที่ร่องสายไฟที่อยู่ส่วนบนของลูกถ้วย ตัวลูกถ้วยมีส่วนประกอบเป็นปีกหลายชั้นซ้อนกัน ในส่วนของร่องพาดสายไฟนี้จะมีการเคลือบสารกึ่งตัวนำไว้เพื่อป้องกันคลื่นวิทยุที่อาจไปก่อภาวะระบบสื่อสารภายในระบบ

2. ลูกถ้วยก้านตรงแบบพ็อก (Fox type pin insulator) ถูกใช้มากในพื้นที่ที่มีมลภาวะและการเปราะเปื้อนเกิดขึ้นสูง เนื่องจากลูกถ้วยแบบนี้มีลักษณะโดยพื้นฐานเหมือนกับลูกถ้วยก้านตรงทุกประการ หากแต่มีการเพิ่มระยะรั้วและระยะป้องกันให้มากขึ้น

3. ลูกถ้วยแท่ง (Line post insulator) ลักษณะคล้ายลูกถ้วยก้านตรง ต่างที่บริเวณคอจะมีความตันและยาวกว่า ส่วนรองรับสายด้านบนทำจากพอร์ซเลน ส่วนฐานล่างมีแท่นโลหะยึดเป็นก้านตรง ทำให้เกิดการเจาะทะลุเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าได้ยาก

4. ลูกถ้วยแท่งก้านตรง (Pin post insulator) มีคุณสมบัติในการป้องกันการเจาะทะลุทางไฟฟ้าได้ดีกว่าลูกถ้วยก้านตรงแบบพีก การใช้งานเหมือนกันคือใช้ในบริเวณที่มีมลภาวะและการเปราะเปื้อนสูง

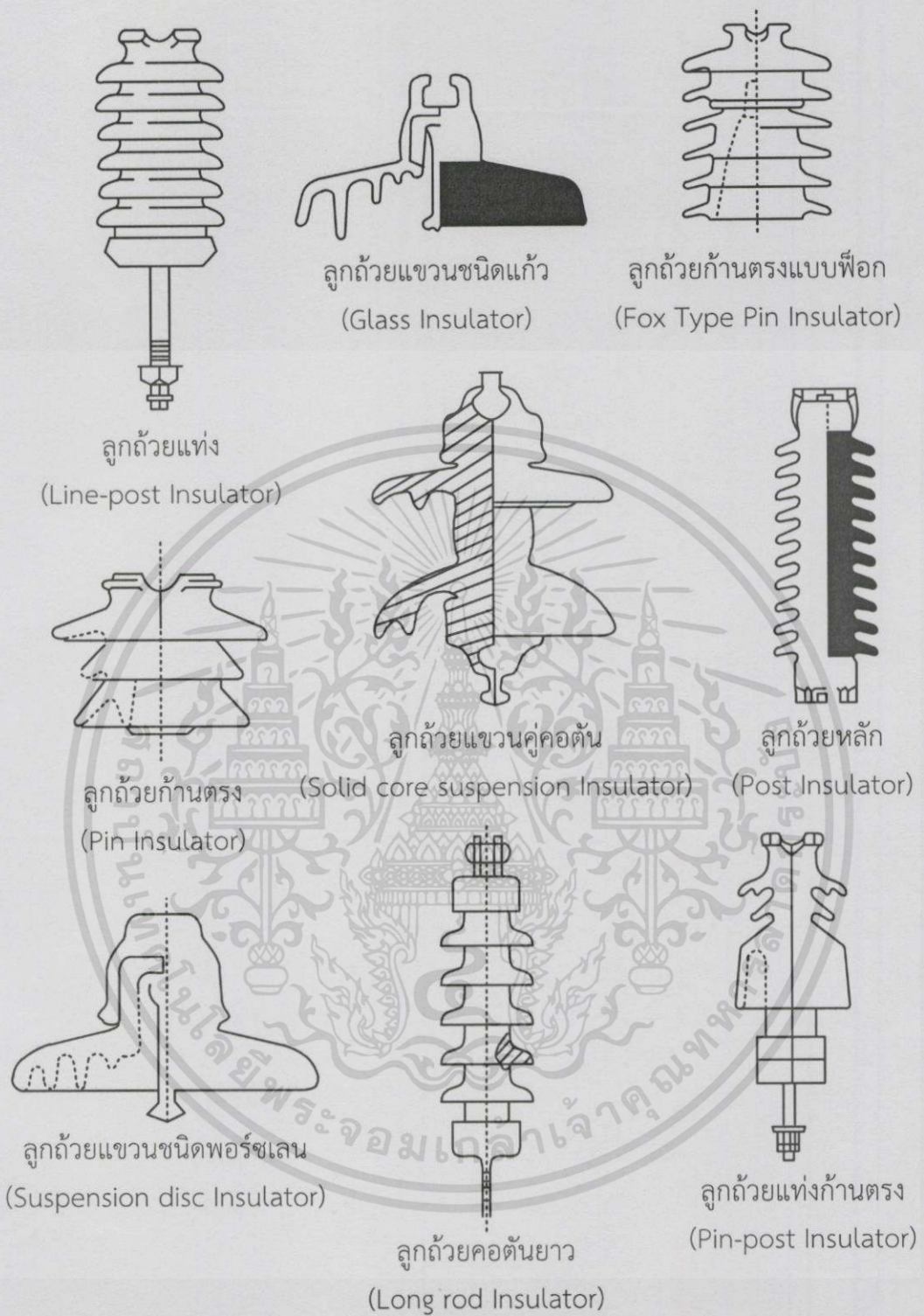
5. ลูกถ้วยหลัก (Post insulator) ส่วนยอดบนและฐานล่างมีการใช้หัวครอบโลหะ เพื่อใช้เป็นจุดยึดตัวเองกับฐานหรือยึดต่อกับลูกถ้วยอันถัดไป โดยทั่วไปแล้วใช้สำหรับยึดบัสบาร์หรือสวิตช์ตัดตอน

6. ลูกถ้วยแขวน (Suspension insulator) เป็นลูกถ้วยแรงสูงที่สามารถแขวนต่อกันหลายลูกเป็นพวงเพื่อเพิ่มความสามารถในการทนแรงดันสูงได้ ลูกถ้วยชนิดนี้มีฝาครอบโลหะที่มีรูเพื่อใช้ในการห้อยเกี่ยวกับลูกถ้วยอันต่อไป

7. ลูกถ้วยแขวนคูก่อตัน (Solid core suspension insulator) มีลักษณะเหมือนการนำลูกถ้วยแขวนธรรมดามาต่อกันโดยส่วนที่ต่อกันนั้นมีฉนวนพอร์ซเลนเป็นแท่งคอก่อตัน จุดเด่นคือลดการเกิดการเจาะทะลุบริเวณหัวลูกถ้วย

8. ลูกถ้วยคอกตันยาว (Long rod insulator) เป็นลูกถ้วยแรงสูงซึ่งมีลักษณะเป็นแท่งตันและปีกมีลักษณะเหมือนปีกของลูกถ้วยก้านตรง ลูกถ้วยชนิดนี้สามารถทนแรงดันได้สูงมาก ฉะนั้นความยาวของลูกถ้วยแต่ละท่อนอาจมีความยาวถึง 100 เซนติเมตร ในประเทศไทยยังไม่นิยมใช้ลูกถ้วยชนิดนี้เนื่องจากมีราคาสูง

ในโครงการนี้จะขอก้าวถึงในส่วนของลูกถ้วยแขวน (Suspension insulator) เป็นหลัก เพราะเป็นลูกถ้วยที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 2.1 ลุกถ้วยฉนวนชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 ลักษณะสมบัติที่สำคัญของลูกถ้วยฉนวน [5]

ลูกถ้วยฉนวนจำเป็นที่จะต้องทนทานต่อสภาพอากาศได้ทุกรูปแบบ ลูกถ้วยฉนวนนี้จะต้องทนทานต่อ แรงทางกล อุณหภูมิ ปฏิกริยาทางเคมี และแรงดันไฟฟ้า ที่กระทำต่อตัวลูกถ้วยฉนวนได้ ซึ่งลักษณะสมบัติที่สำคัญต่อลูกถ้วยเหล่านี้เป็นผลมาจาก วัสดุที่นำมาผลิตและการออกแบบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า จึงต้องมีการอธิบายคำศัพท์ที่เกี่ยวข้องกับรูปทรงของลูกถ้วยฉนวนที่สำคัญดังนี้

1. ระยะรั่ว (leakage distance) คือ ระยะที่ได้จากการวัดตั้งแต่จุดที่ยึดสายตัวนำไปยังจุดที่ยึดลูกถ้วย โดยการวัดไปตามผิวของลูกถ้วยระหว่างสองจุดนั้น

2. ระยะรั่วป้องกัน (Protective leakage distance) คือระยะที่ไม่เปียกฝนซึ่งโดยปกติแล้วเป็นระยะภายในกายของลูกถ้วย

3. ระยะอาร์ก (Arcing distance) คือ ระยะที่สั้นที่สุดโดยวัดจากอิเล็กโตรดหนึ่งถึงอิเล็กโตรดหนึ่งผ่านตัวกลางหรืออากาศ ระยะอาร์กนี้แบ่งเป็น

3.1 ระยะอาร์กแห้ง (Dry arcing distance) ระยะที่สั้นที่สุดที่วัดผ่านตัวกลางที่ล้อมรอบลูกถ้วยฉนวนระหว่างอิเล็กโตรดในการทดสอบการวาบไฟตามผิวแห้ง

3.2 ระยะอาร์กเปียก (Wet arcing distance) ระยะที่สั้นที่สุดที่วัดผ่านตัวกลางที่ล้อมรอบลูกถ้วยฉนวนระหว่างอิเล็กโตรดในการทดสอบการวาบไฟตามผิวเปียก คุณสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวน ที่นำมาพิจารณาเลือกใช้ลูกถ้วยฉนวนให้เหมาะสม มีดังนี้

1 แรงดันวาบไฟตามผิวแห้งความถี่ต่ำ (Low frequency dry flashover voltage) หมายถึง ค่าเฉลี่ยของแรงดันกระแสสลับความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ที่ทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวลูกถ้วยในสภาวะแห้ง

2 แรงดันวาบไฟตามผิวเปียกความถี่ต่ำ (Low frequency wet flashover voltage) หมายถึง ค่าเฉลี่ยของแรงดันกระแสสลับความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ที่ทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวลูกถ้วยในสภาวะเปียก

3 แรงดันไฟฟ้าวาบตามผิวอิมพัลส์วิกฤติ (Critical impulse flashover voltage) หมายถึง ค่าวาบไฟตามผิวบนลูกถ้วย 50% เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน 1.2/50 ไมโครวินาที แบ่งเป็น ชั่วบวกและชั่วลบ

4 ความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ (Impulse withstand voltage) อาจทำได้โดยการป้อนแรงดันตามที่กำหนด 15 ครั้งในแต่ละชั่ว และยอมให้เกิดการวาบไฟตามผิวได้ไม่เกิน 2 ครั้ง หรือหาได้จากค่าวาบไฟตามผิว 50% คือหาค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์โดยอาศัยสถิติ ดังแสดงในสมการ 2.1

$$U_{w90\%} = U_{50\%} (1-3\sigma) = 0.96U_{50\%} \quad (2.1)$$

เมื่อ σ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน มีค่าเท่ากับ 0.03 เมื่อการกระจายเป็นปกติ

5 แรงดันไฟฟ้าเจาะผ่าน (Puncture voltage) แรงดันที่ทำให้เกิดการเจาะทะลุผ่านเนื้อฉนวนของลูกถ้วย โดยเฉพาะลูกถ้วยที่มีเนื้อฉนวน (พอร์ซเลนหรือแก้ว) มีความหนาระหว่างอิเล็กโตรดน้อยกว่าระยะอาร์ก เช่น ลูกถ้วยแขวน ลูกถ้วยก้านตรง เป็นต้น

6 แรงดันไฟฟ้ารบกวนคลื่นวิทยุ (Radio influence voltage - RIV) คือ ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดโคโรน่านบนลูกถ้วยฉนวน โครน่าจะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนระบบวิทยุ ระบบสื่อสาร หรือระบบควบคุม ขึ้นได้ โดยส่วนมากแล้วจะเกิดขึ้นในบริเวณจุดต่อสายไฟหรือพาดสายไฟเนื่องจากเป็นบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง ในกรณีนี้จะมีการเคลือบสารกึ่งตัวนำบริเวณร่องพาดสายไฟหรือจุดต่อสายเอาไว้เพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น การเคลือบสารตัวนำนี้จะทำให้ค่าแรงดันโคโรน่าเริ่มเกิด (U_1) มีค่าสูงขึ้น แต่ในขณะเดียวกันจะทำให้แรงดันเบรกดาวน (U_b) มีค่าลดลง มาตรฐานจึงมีการกำหนดให้ลูกถ้วยฉนวนที่ใช้ในบริเวณชุมชนต้องมีการเคลือบสารกึ่งตัวนำเพื่อลดปัญหาสัญญาณรบกวนจากโคโรน่าที่เกิดขึ้น

นอกจากลักษณะทางไฟฟ้าที่ได้กล่าวมาแล้ว ยังมีลักษณะทางไฟฟ้าอื่นๆ อีกมากมายซึ่งสามารถดูได้จากมาตรฐานของลูกถ้วยชนิดนั้นๆ

2.2 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ

เพื่อให้การทดสอบและผลจากการทดสอบมีความถูกต้องและยอมรับได้จึงใช้มาตรฐานในการกำหนดเงื่อนไขต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ โดยมาตรฐานที่ใช้ในกำหนดนั้นจะมีด้วยกัน 4 มาตรฐานด้วยกันคือ IEC 60060-1 [2], IEEE Std.4 [1], ANSI C29.1 [3] และ มอก. [4] โดยหัวข้อที่มาตรฐานเหล่านี้กำหนดได้แก่

2.2.1 เงื่อนไขของน้ำที่ใช้ในการทดสอบ [1,2]

เมื่อฝนในธรรมชาติไม่สามารถจำลองได้ การทดสอบในสภาวะเปียกจึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อจัดทำมาตรฐานที่เกี่ยวกับสมรรถนะของอุปกรณ์ภายใต้เงื่อนไขจำเพาะของหยดน้ำที่จำลองขึ้น โดยเงื่อนไขสำหรับการทดสอบในสภาวะเปียกที่ต่างกัันนั้นถูกระบุไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เงื่อนไขของหยดน้ำ

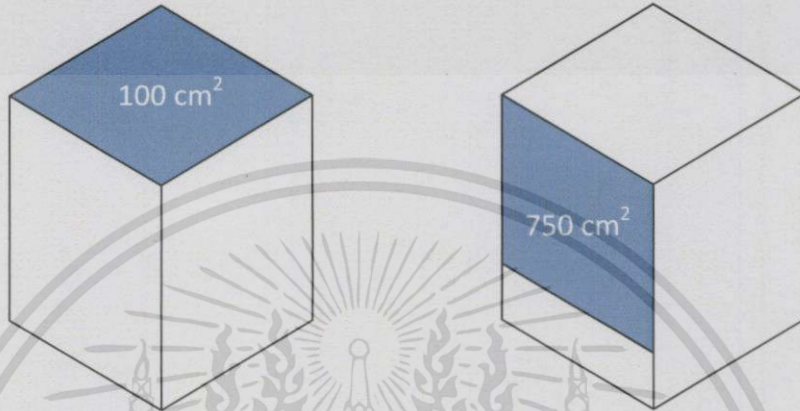
วิธีการ	อัตราการหยดของหยดน้ำ (mm/min)			คุณสมบัติของน้ำที่สะสม		ระยะเวลาที่ทำการทดสอบ (s)
	องค์ประกอบแนวตั้ง	องค์ประกอบแนวราบ	ข้อจำกัดของการวัดแต่ละครั้ง	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ความนำไฟฟ้า (ohm-m) ($\mu\text{S/cm}$)	
วิธีการตามมาตรฐาน	1.0 - 2.0	1.0 - 2.0	± 0.5 จากค่าเฉลี่ย	± 15 จากอุณหภูมิแวดล้อม	85 - 115	60

2.2.2 การเตรียมวัตถุทดสอบ [1,2]

วัตถุทดสอบควรทำความสะอาดโดยการล้างด้วยน้ำและสารชำระล้างที่มีฤทธิ์เป็นกลาง เช่น ไตรโซเดียมฟอสเฟต (Na_3PO_3) เป็นต้น โดยเติมแล้วล้างออกด้วยน้ำสะอาดและไม่อาจใช้มือสัมผัส วัตถุทดสอบได้อีกหลังจากการล้าง หากพื้นที่ที่ทดสอบในสภาวะเปียกเป็นพื้นที่เปียกเป็นวงกว้าง พื้นผิวของฉนวนอาจถูกพิจารณาได้ว่าสะอาดและปราศจากไขมัน หรือไม่มีการเจือปนในเนื้อฉนวน

2.2.3 การเก็บตัวอย่างน้ำที่ใช้ทดสอบ [1,2]

วัตถุทดสอบควรถูกพ่นด้วยน้ำที่มีค่าความนำไฟฟ้าเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด ตกกระทบในรูปแบบหยดและอยู่ในทิศทางที่กำหนด โดยความหนาแน่นของหยดน้ำในองค์ประกอบแนวตั้งและแนวราบจะเท่ากันโดยประมาณ ความหนาแน่นของหยดน้ำสามารถวัดได้จากการแบ่งภาชนะสะสมน้ำออกเป็น 2 รูปแบบ คือ เป็นภาชนะที่เปิดฝาในแนวราบเป็นพื้นที่ 100 ตารางเซนติเมตร และภาชนะที่เปิดฝาในแนวตั้งเป็นพื้นที่ 750 ตารางเซนติเมตร (โดยในขณะที่วัดให้หันด้านที่เปิดเข้าหาทิศการพ่น)



ก) ภาชนะสะสมน้ำในแนวตั้ง

ข) ภาชนะสะสมน้ำในแนวราบ

รูปที่ 2.2 ตัวอย่างภาชนะสะสมน้ำ

ภาชนะสะสมน้ำควรวางใกล้กับวัตถุทดสอบแต่ต้องไม่สะสมน้ำที่หยดหรือกระเด็นจากวัตถุทดสอบ ในระหว่างช่วงเวลาสะสมน้ำควรเคลื่อนภาชนะช้าๆ เหนือพื้นที่ที่เพียงพอต่อการกำจัดผลของความไม่สม่ำเสมอของหยดน้ำจากหัวฉีดน้ำแต่ละหัว ในกรณีที่วัตถุทดสอบมีความสูงเกิน 1 เมตร การสะสมน้ำควรทำใกล้ตำแหน่งสูงสุด กลาง และล่างสุดของวัตถุทดสอบ

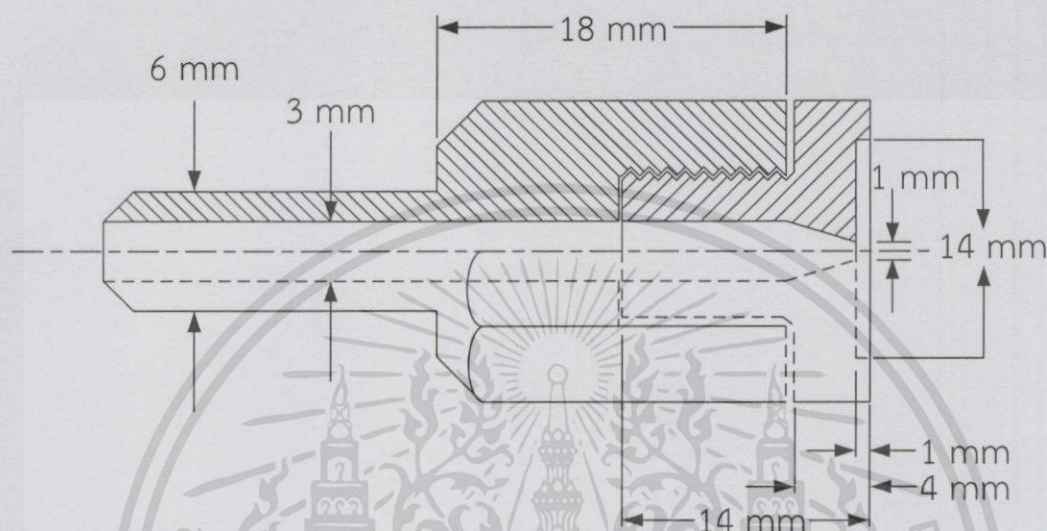
อุปกรณ์ที่ใช้พ่นน้ำควรถูกผลิตมาให้ปรับความดัน และระยะทางได้เพื่อให้สามารถพ่นน้ำได้ตามอัตราการหยดของหยดน้ำที่ระบุในตารางที่ 2.1 โดยรูปแบบและการจัดเตรียมหัวฉีดใดๆ ที่ทำให้การทดลองเป็นไปตามที่ตารางที่ 2.1 ระบุไว้สามารถใช้ได้ทั้งสิ้น

อุณหภูมิและค่าความนำไฟฟ้าของน้ำจะถูกวัดจากตัวอย่างน้ำที่ถูกเก็บก่อนที่น้ำจะกระทบวัตถุทดสอบ ซึ่งอาจวัดที่แหล่งต่างๆ ได้ (เช่น ถังเก็บน้ำ เป็นต้น) โดยที่ต้องแน่ใจว่าจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติที่มากเกินไปเมื่อน้ำถูกพ่นไปกระทบวัตถุทดสอบ

2.2.4 กระบวนการทำให้วัตถุทดสอบเปียกก่อนการทดสอบ [1,2]

วัตถุทดสอบต้องถูกทำให้เปียกก่อนที่จะทำการทดสอบอย่างน้อย 15 นาที ซึ่งอาจใช้น้ำที่ไม่ตรงตามเงื่อนไขในตารางที่ 2.1 ก็ได้

การสับเปลี่ยนระหว่างน้ำที่ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขกับน้ำที่เป็นไปตามเงื่อนไขจะต้องทำโดยไม่มี การหยุดไหล โดยการทดสอบจะเริ่มต้นเมื่อน้ำที่ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขหมดไปจากอุปกรณ์พ่นน้ำ



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างของหัวฉีดจากมาตรฐาน

ตัวอย่างของหัวฉีดจากมาตรฐาน [1] ถูกแสดงในรูปที่ 2.3 ระยะการพ่นอาจถูกเพิ่มได้จากการปรับมุมให้ทิศทางของหัวฉีดน้ำเงยขึ้น 15 องศา - 25 องศา จากแนวระดับ ถ้าหากความดันของน้ำถูกเพิ่มให้มากกว่าระดับที่แนะนำ ลำของน้ำที่พ่นออกอาจกระจายก่อนกำหนด และเป็นสาเหตุให้ลักษณะของหยดน้ำที่กระทบวัตถุทดสอบเปลี่ยนไป

ข้อมูลด้านสมรรถนะของตัวอย่างหัวฉีดในรูปที่ 2.3 ระยะของสายน้ำที่พ่นออกจะขึ้นอยู่กับระยะเส้นผ่านศูนย์กลางของรูที่หัวฉีดและความดันน้ำ ที่ระดับความดันที่เหมาะสมซึ่งปกติอยู่ที่ 3×10^5 ปาสคาล ถึง 4×10^5 ปาสคาล (3 บรรยากาศถึง 4 บรรยากาศ) แต่จะขึ้นอยู่กับความเรียบของรูที่หัวฉีดและแนวท่อน้ำที่ต่อเข้า โดยระยะของสายน้ำที่ถูกพ่นด้วยหัวฉีดตัวอย่างในรูปที่ 2.2 มีค่าประมาณ 9 เมตร ถึง 10 เมตร

2.2.5 ข้อจำกัดในการทดสอบความคงทนต่อแรงดันในสภาวะเปียก [1,2]

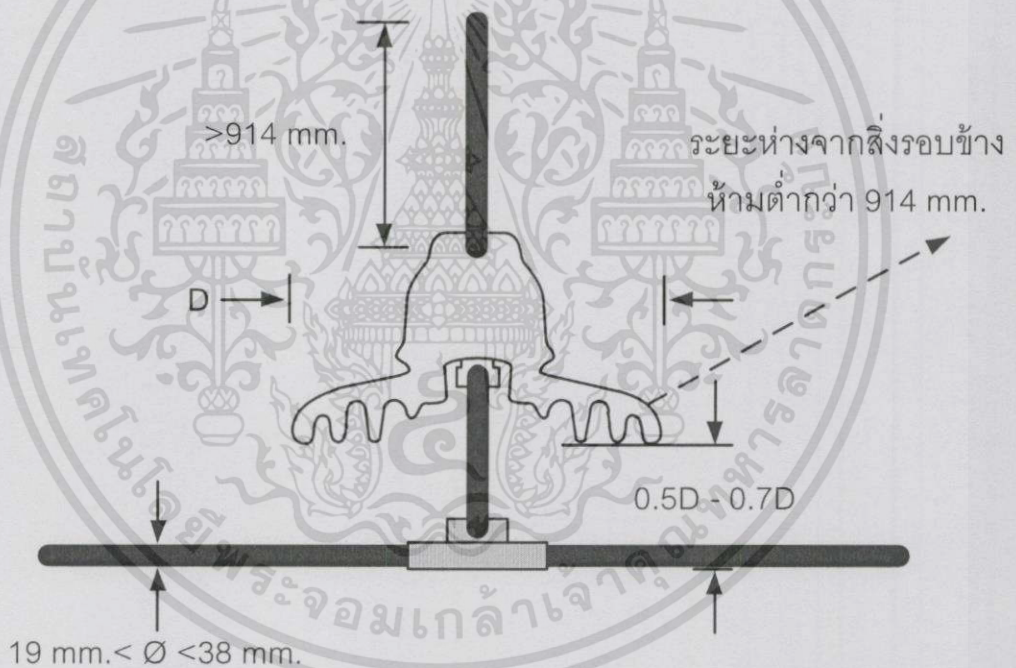
ตามมาตรฐาน IEEE Std.4 [1] วิธีการข้างต้นถูกแนะนำให้ใช้ในการทดสอบโดยใช้แรงดันทุกรูปแบบ และการทดสอบกับอุปกรณ์ทุกชนิดที่ออกแบบมาเพื่อใช้งานกลางแจ้งและวิธีการข้างต้นเคยถูกใช้สำหรับการทดสอบด้วยแรงดันกระแสสลับกับอุปกรณ์ที่ถูกใช้ในระบบแรงดันถึง 400 kV

ตามมาตรฐาน IEC 60060-1 [2] ในปัจจุบันยังไม่สามารถหาวิธีการทดสอบที่เหมาะสมกับอุปกรณ์สำหรับไฟฟ้ากระแสสลับที่มีขนาดใหญ่ เช่น มีระดับแรงดันพิกัดสูงกว่า 800 kV เป็นต้น

2.2.6 การติดตั้งลูกถ้วยแบบแขวนเพื่อทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันในสภาวะเปียก [3] หากไม่มีข้อกำหนดจากผู้ทดสอบลูกถ้วย (ชั้นเดียวหรือต่อเป็นพวง) จะถูกแขวนในแนวตั้งโดยที่ปลายจะต่อลงดิน ดังนั้นระยะในแนวตั้งจากจุดสูงสุดของวัตถุทดสอบไปจนถึงโครงสร้างช่วยรับแรงจะต้องไม่ต่ำกว่าระยะ 3 ฟุต (914 มิลลิเมตร)

ขั้วไฟฟ้าด้านบนหรือด้านล่างและตัวนำจะมีลักษณะเป็นแท่งผิวนิยมนเหี้ยมตรงหรือเป็นท่อนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกไม่ต่ำกว่า $\frac{3}{4}$ นิ้ว (19 มิลลิเมตร) แต่ต้องไม่เกิน 1-1/2 นิ้ว (38 มิลลิเมตร) ซึ่งต้องเชื่อมต่อกับข้อต่อของวัตถุทดสอบ ดังนั้นระยะต่ำสุดของเปลือกฉนวนไปยังผิวของขั้วไฟฟ้าที่อยู่สูงกว่าจะอยู่ที่ 0.5 ถึง 0.7 เท่าของระยะเส้นผ่าศูนย์กลางของฉนวนที่อยู่ต่ำที่สุด ตัวนำจะต้องวางตัวในแนวระนาบและทำมุมที่เหมาะสมกับแกนของวัตถุทดสอบ โดยตัวนำต้องมีระยะที่ไม่นำการวาบไฟตามผิวมาที่ขั้วไฟฟ้า

วัตถุอื่นๆ ที่นอกเหนือวัตถุที่ใช้ในการทดสอบไม่ควรเข้าไปใกล้วัตถุทดสอบหรือขั้วไฟฟ้ากว่าระยะ 1-1/2 เท่าของระยะที่วัตถุทดสอบจะเกิดการอาร์กแห้ง โดยระยะต่ำสุดที่อนุญาตคือ 3 ฟุต (914 มิลลิเมตร)



รูปที่ 2.4 การติดตั้งลูกถ้วยแบบแขวน

2.2.7 การควบคุมแรงดันทดสอบ [3]

การทดสอบในสภาวะเปียก สามารถทดสอบคุณสมบัติของวัตถุทดสอบได้ 2 รูปแบบ ได้แก่ การทดสอบความคงทนต่อแรงดันความถี่ต่ำในสภาวะเปียก และ การทดสอบวาบไฟตามผิวความถี่ต่ำในสภาวะเปียก โดยทั้ง 2 การทดสอบจะมีวิธีป้อนแรงดันต่างกันซึ่งสามารถจำแนกได้ดังนี้

2.2.7.1. การทดสอบความคงทนต่อแรงดันความถี่ต่ำในสภาวะเปียก [6]

แรงดันขนาดร้อยละ 75 ของขนาดแรงดันที่ต้องการทดสอบจะต้องถูกขึ้นแรงดันภายในขั้นตอนเดียวส่วนขนาดแรงดันที่เหลือ (ร้อยละ 75 ถึงร้อยละ 100 ของขนาดแรงดันที่ต้องการทดสอบ) จะต้องถูกป้อนภายในเวลา 5 - 30 วินาที ซึ่งค่าแรงดันที่ใช้ทดสอบจะระบุในตารางที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ขอบเขตและค่าพิกัดความคงทนต่อแรงดันในสภาวะเบี่ยงความถี่ต่ำของลูกถ้วยแขวน และลูกถ้วยหลัก (Cap and Pin Type)

หมายเลขทางเทคนิคของพวงลูกถ้วยในการทดสอบ		จำนวนลูกถ้วยในแถว (ลูก)	ความสูงของแถวลูกถ้วย (นิ้ว)	ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกถ้วย (นิ้ว)	ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของ Cap (นิ้ว)	ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของโบลต์ (นิ้ว)	ค่าแรงดันความถี่ต่ำในการทดสอบความคงทนต่อแรงดันในสภาวะเบี่ยง (KV)
แถว	ลูก						
-	1	1	7-1/2	7	5	3	30
-	4	1	10	8	5	3	45
-	7	1	12	10-1/2	6	3	60
-	10	1	15	13	6	3	80
-	13	1	18	14	7-5/8	3	100
16	147	2	29	14	8	3	145
-	41	1	8	9	6-1/2	5	30
-	44	1	10	10	6-3/4	5	45
-	46	1	12	12	8	5	60
-	49	1	15	14	8-1/4	5	80
56	140	2	29	17	9-3/4	5	160
19	140	3	43-1/2	17	9-3/4	5	230
25	140	4	58	17	9-3/4	5	315
123	141	4	58	18	10-7/8	5	315
126	140	5	72-1/2	17	9-3/4	5	385
27	141	5	72-1/2	18	10-7/8	5	385
128	140	6	87	17	9-3/4	5	455
28	141	6	87	18	10-7/8	5	455
129	142	6	87	18	10-7/8	7	455
133	142	7	101-1/2	18	10-7/8	7	525
133	142	7	101-1/2	18	10-7/8	7	525
135	142	8	116	18	10-7/8	7	590
-	147	1	14-1/2	14	8	3	70
-	140	1	14-1/2	17	9-3/4	5	75
-	141	1	14-1/2	18	10-7/8	5	75
-	142	1	14-1/2	18	10-7/8	7	75
-	191	1	14-1/2	18	10-7/8	7	75
196	191	6	87	18	10-7/8	7	455
197	191	7	101-1/2	18	10-7/8	7	525

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ขอบเขตและค่าพิกัดความคงทนต่อแรงดันในสภาวะเปียกความถี่ต่ำของลูกถ้วยแขวนและลูกถ้วยหลัก (Cap and Pin Type) (ต่อ)

หมายเลขทางเทคนิคของพวงลูกถ้วยในการทดสอบ		จำนวนลูกถ้วยในแถว (ลูก)	ความสูงของแถวลูกถ้วย (นิ้ว)	ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกถ้วย (นิ้ว)	ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของ Cap (นิ้ว)	ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของโบลต์ (นิ้ว)	ค่าแรงดันความถี่ต่ำในการทดสอบความคงทนต่อแรงดันในสภาวะเปียก (KV)
แถว	ลูก						
198	191	8	116	18	10-7/8	7	590
-	139	1	14-1/2	17	9-3/4	5	75
174	139	4	58	17	9-3/4	5	315
175	139	5	72-1/2	17	9-3/4	5	385
176	139	6	87	17	9-3/4	5	455
-	164	1	14-1/2	14	7-5/8	3	75
166	164	2	29	14	7-5/8	3	160
167	164	3	43-1/2	14	7-5/8	3	230
168	164	4	58	14	7-5/8	3	315
-	165	1	18	14	7-5/8	3	100
169	165	2	36	14	7-5/8	3	200
170	165	3	54	14	7-5/8	3	275

2.2.7.2 การทดสอบวาบไฟตามผิวความถี่ต่ำในสภาวะเปียก [7]

ภายหลังจากปรับตั้งการพ่นน้ำครั้งสุดท้ายไม่เกิน 1 นาทีควรขึ้นแรงดันที่ใช้ในการทดสอบให้ได้ร้อยละ 75 ของค่าแรงดันเฉลี่ยของค่าแรงดันทดสอบที่ทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวที่คาดไว้อย่างรวดเร็วภายหลังจากปรับตั้งการพ่นน้ำครั้งสุดท้ายไม่เกิน 1 นาที อัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดันที่จะทำให้เกิดวาบไฟตามผิวภายหลังจากแรงดันถึงระดับที่ร้อยละ 75 ของค่าแรงดันเฉลี่ยของค่าแรงดันทดสอบที่ทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวควรใช้เวลา 5 - 30 วินาที

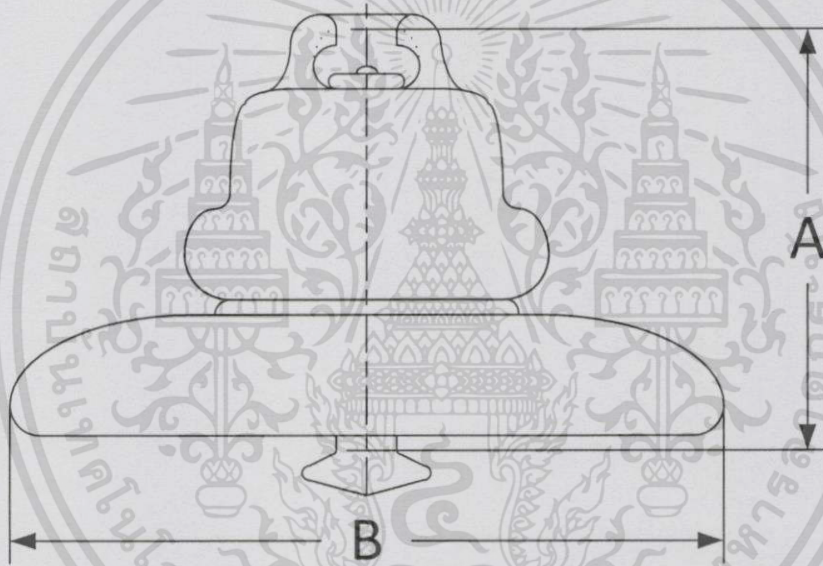
โดยทั่วไปสำหรับแรงดันกระแสตรงและกระแสสลับที่ใช้ในการทดสอบความคงทนต่อแรงดันในสภาวะเปียกถูกแนะนำให้เชื่อถือการเกิดวาบไฟตามผิว (Flashover) หนึ่งครั้งแม้ว่าการทดสอบหลายครั้งที่เหลือจะไม่เกิดวาบไฟตามผิว

ค่าแรงดันวาบไฟตามผิวในสภาวะเปียกจะได้มาจากการเฉลี่ยจากการทดสอบไม่ต่ำกว่า 5 ครั้งต่อเนื่องกัน การทดสอบแต่ละครั้งควรเว้นช่วง 15 วินาที - 5 นาที ซึ่งค่าแรงดันที่ใช้ทดสอบจะระบุในตารางที่ 2.3 และตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.3 ขอบเขตและค่าพิกัดแรงดันวาทไฟตามผิวในสภาวะเปียกความถี่ต่ำของลูกถ้วยแขวนชนิดบอลและซอกเกต (Ball and socket) ในระบบสายส่ง (ANSI Class 52-3, 52-5, 52-8, และ 52-11)

ขอบเขต	Class 52-3	Class 52-5	Class 52-8	Class 52-11
ระยะร้าว, นิ้ว (mm)	11-1/2 (292)	11 (279)	11 (279)	15 (381)
ระยะห่าง "A" (นิ้ว)	5-3/4	5-3/4	5-3/4	6-1/8
เส้นผ่านศูนย์กลางเปลือก "B" (นิ้ว)	10-3/4	10-3/4	11-3/4	12-1/4
แรงดันวาทไฟตามผิวความถี่ต่ำในสภาวะเปียก (kV)	50	50	50	50

โดยระยะ "A" และ "B" จะอ้างอิงตามรูปที่ 2.4 ลูกถ้วยแขวนชนิด ball-and-socket ในระบบสายส่ง (ANSI Class 52-3, 52-5, 52-8, และ 52-11)

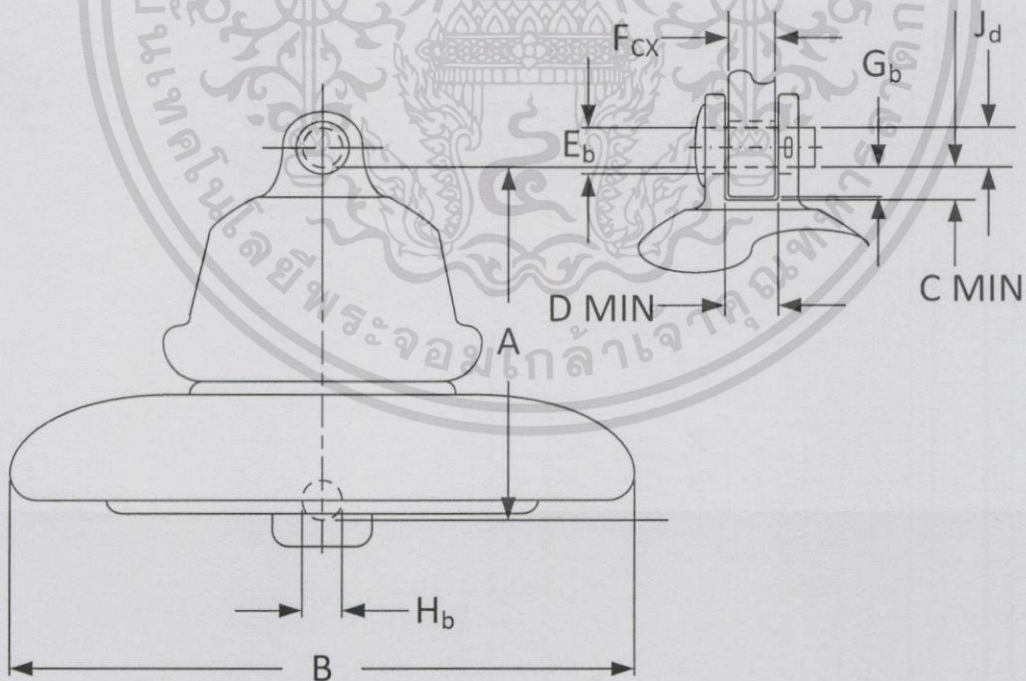


รูปที่ 2.5 ลูกถ้วยแขวนชนิด ball-and-socket ในระบบสายส่ง (ANSI Class 52-3, 52-5, 52-8, และ 52-11)

ตารางที่ 2.4 ขอบเขตและค่าพิกัดแรงดันวาวไฟตามผิวในสภาวะเป็ยกความถี่ต่ำของลูกถ้วยแขวนชนิดเคลวิส (Clevis) ในระบบสายส่ง (ANSI Class 52-4, 52-6, 52-10, และ 52-12)

ขอบเขต	Class 52-4	Class 52-6	Class 52-10	Class 52-12
ระยะร้าว, นิ้ว (mm)	11-1/2(292)	11 (279)	11 (279)	15 (381)
ระยะห่าง "A" (นิ้ว)	5-3/4	5-3/4	6-1/2	7
เส้นผ่านศูนย์กลางเปลือก "B" (นิ้ว)	10-3/4	10-3/4	11-3/4	12-1/4
ระยะแคบ "C" (นิ้ว)	11/16	11/16	11/16	3/4
ระยะแคบ "D" (นิ้ว)	11/16	11/16	7/8	1
ระยะแคบ "E" (นิ้ว)	11/16	11/16	13/16	15/16
ระยะอายโบลท์ "F" (นิ้ว)	1/2	1/2	3/4	7/8
ระยะอายโบลท์ "G" (นิ้ว)	17/32	17/32	1/2	9/16
ระยะอายโบลท์ "H" (นิ้ว)	11/16	11/16	13/16	15/16
ระยะคอเทอร์โบลท์ "J" (นิ้ว)	5/8	5/8	3/4	7/8
แรงดันวาวไฟตามผิวความถี่ต่ำในสภาวะเป็ยก (kV)	50	50	50	50

โดยระยะ "A", "B", "C", "D", "E", "F", "G", "H" และ "J" จะอ้างอิงตามรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.6 ลูกถ้วยแขวนชนิดเคลวิส (Clevis) ในระบบสายส่ง (ANSI Class 52-4, 52-6, 52-10, และ 52-12)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.8 การปรับแก้ค่าเนื่องจากผลของความดันอากาศ, อุณหภูมิและความชื้น [1,2,3]

เพื่อให้การทดสอบและค่าจากการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานจึงควรมีการปรับแก้ค่าการปรับแก้ค่าโดยจะต้องแก้ผลของความดันอากาศ, อุณหภูมิและความชื้น โดยการปรับแก้ค่าจะถูกระบุในมาตรฐานทั้ง 3 มาตรฐาน ได้แก่ IEEE Std.4 [1], IEC 60060-1 [2] และ ANSI C29.1 [3] ซึ่งทั้ง 3 มาตรฐานนี้จะระบุวิธีปรับแก้ไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งจะแบ่งตัวแปรที่ใช้ปรับแก้ออกเป็น 2 อย่างคือ ตัวปรับแก้ผลของความดันอากาศและตัวปรับแก้ผลของความชื้น ดังนี้

เงื่อนไขของสภาวะมาตรฐานของ IEEE Std.4 [1], IEC 60060-1 [2] จะระบุให้

$$\begin{aligned} \text{อุณหภูมิ } (t_0) &= 20^\circ\text{C} \\ \text{ความชื้นสัมบูรณ์ } (h_0) &= 11 \text{ g/m}^3 \\ \text{ความดันบรรยากาศ } (b_0) &= 101.3 \text{ kPa (1013 mbar)} \end{aligned}$$

โดยที่ความดันบรรยากาศ 101.3kPa จะเท่ากับ 760 mm.Hg จึงมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$b = 0.1333H \quad (2.2)$$

โดย b คือ ความดันบรรยากาศในหน่วย kPa

H คือ ความดันบรรยากาศในหน่วย mm.Hg

การแก้ค่าแรงดันในสภาวะห้องทดสอบเพื่อเทียบหาแรงดันมาตรฐานโดย

$$V = V_0 K \quad (2.3)$$

เมื่อ V คือ แรงดันในสภาวะห้องทดสอบ

V_0 คือ แรงดันมาตรฐาน

K คือ ค่าแก้โดยสามารถหาได้จาก

$$K = k_d k_h \quad (2.4)$$

เมื่อ k_d คือ ค่าแก้เนื่องจากผลของความดันบรรยากาศ

k_h คือ ค่าแก้เนื่องจากผลของความชื้น

แต่การทดสอบในสภาวะเปียกจะไม่คำนึงถึงผลจากความชื้นทำให้

$$K = k_d \quad (2.5)$$

ค่า K ที่เชื่อถือได้จะมีค่าอยู่ในช่วง $0.8 < K < 1.05$

ค่า k_d สามารถหาได้จาก

$$k_d = \delta^m \quad (2.6)$$

เมื่อ δ คือค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (%) ซึ่งหาได้จาก

$$\delta = \left(\frac{b}{b_0}\right) \left(\frac{273+t_0}{273+t}\right) \quad (2.7)$$

และหาค่า m ได้จากตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า g และค่า m ในการหาค่าแก้

g	m
<0.2	0
0.2 – 1.0	$g(g-0.2)/0.8$
1.0 – 1.2	1.0
1.2 – 2.0	1.0
>2.0	1.0

โดยค่า g หาได้จาก

$$g = \frac{V_B}{500L\delta k} \quad (2.8)$$

เมื่อ V_B คือ ค่าร้อยละ 50 ของแรงดัน (ในหน่วย kV peak) ที่ทำให้เกิดเพิ่มขึ้นอย่างทันทีของกระแสที่ไหลผ่านตัวกลางที่เป็นฉนวน (เช่น การเกิดเบรกดาวน์ การวาบไฟตามผิว) แต่ในการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าจะให้ใช้ค่าเท่ากับ 1.1

L คือ ระยะการเกิดดิสชาร์จต่ำสุด (m)

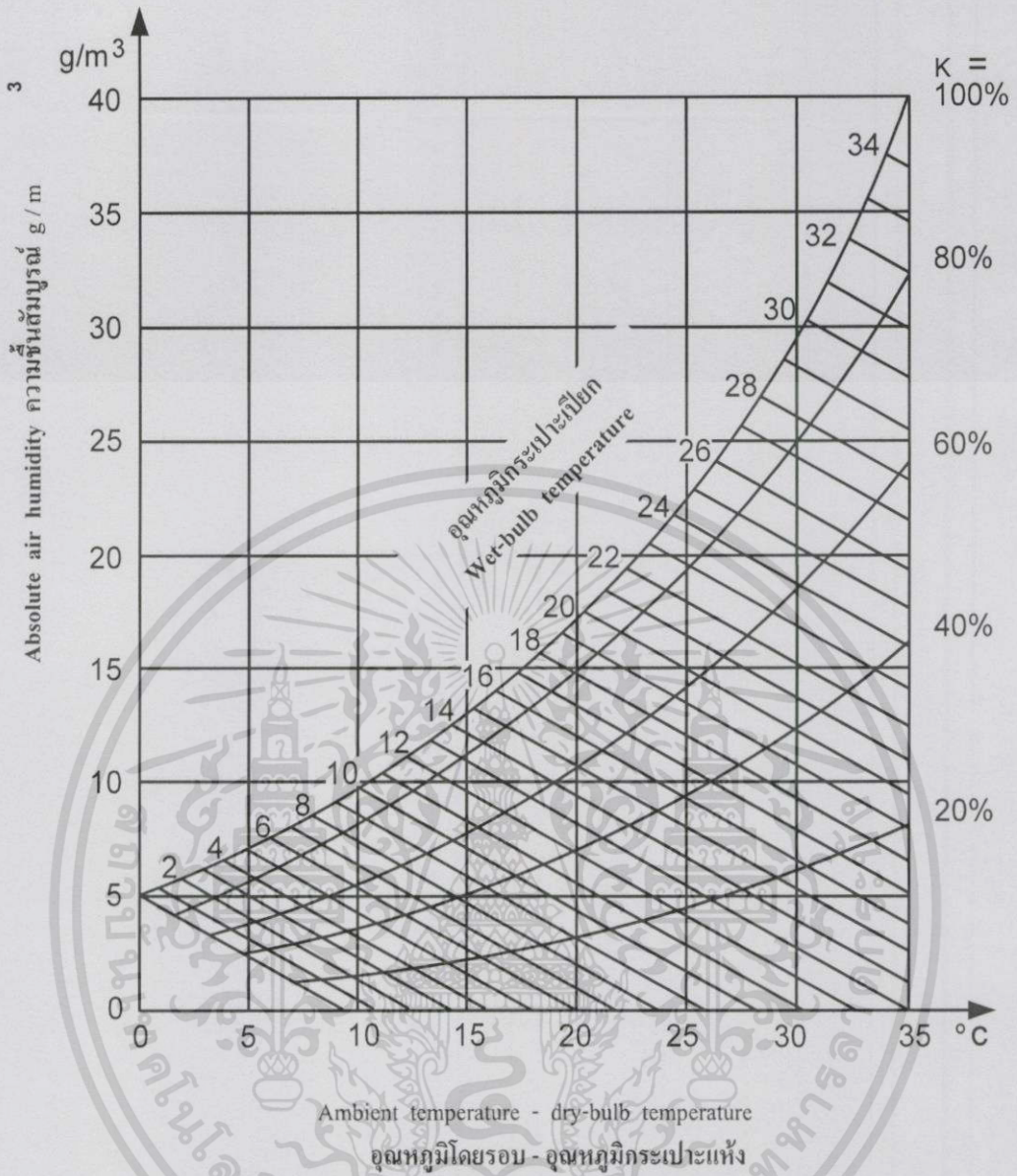
δ คือ ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (%)

และ k หาได้จาก

$$k = 1 + 0.012\left(\frac{h}{\delta} - 11\right) \quad (2.9)$$

สำหรับสมการ (2.7) ค่าควรอยู่ในช่วง $1 \text{ g/m}^3 < \frac{h}{\delta} < 15 \text{ g/m}^3$

เมื่อ h คือค่าความชื้นสัมบูรณ์ (g/m^3) โดยสามารถหาค่าได้จากรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมบูรณ์ (g/m³)
อุณหภูมิแวดล้อม (°C) และความชื้นสัมพัทธ์ (%)

แต่เงื่อนไขของสภาวะมาตรฐานของ ANSI c29.1 [3] จะระบุให้

- อุณหภูมิ = 25°C
- ความชื้นสัมบูรณ์ = 11 g/m³
- ความดันบรรยากาศ = 100.86 kPa (29.92 inch.Hg)
- และ K_dหาได้จาก

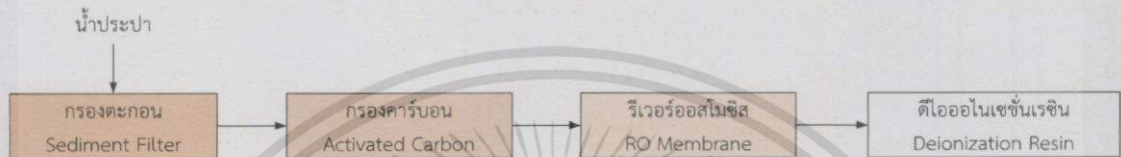
$$K_d = 0.392 \left(\frac{P}{273+T} \right) \tag{2.10}$$

เมื่อ P คือ ความดันบรรยากาศ (mm.Hg)

T คือ อุณหภูมิ (°C)

2.3 น้ำปราศจากไอออน [8]

น้ำปราศจากไอออนคือน้ำที่ผ่านการกรองไอออนออกไป โดยการดักจับไอออนบวกและไอออนลบออกเมื่อน้ำผ่านตัวกรองเรซิน น้ำที่ได้ออกมาจึงไม่มีไอออนเหลืออยู่ และถือเป็นน้ำที่ความบริสุทธิ์และสะอาดโดยแท้จริง เมื่อน้ำไม่มีไอออนเหลืออยู่ทำให้คุณสมบัติในการต้านทานไฟฟ้าสูงขึ้น เนื่องจากน้ำที่ใช้ในการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันกระแสลับในสภาวะเปียกนั้นต้องใช้น้ำที่มีค่าความต้านทานตามที่มาตรฐานกำหนดไว้ ซึ่งน้ำปราศจากไอออนมีค่าความต้านทานตรงกับเงื่อนไขของมาตรฐาน จึงต้องมีการออกแบบและจัดสร้างชุดทำน้ำปราศจากไอออนเพื่อใช้ในการทดสอบ โดยมีขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 2.8 ลำดับขั้นตอนการกรอง

2.3.1 กระบวนการผลิตน้ำปราศจากไอออน

กระบวนการกรองน้ำประปาให้เป็นน้ำปราศจากไอออนนั้นสามารถแบ่งได้ 3 ลำดับขั้นตอนดังนี้

ลำดับที่ 1 กระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำเบื้องต้น (Water treatment system)

ลำดับที่ 2 กระบวนการกรองน้ำด้วยรีเวอร์ออสโมซิส (Reverse Osmosis water system)

ลำดับที่ 3 กระบวนการกรองน้ำปราศจากไอออน (Deionization water system)

ลำดับที่ 1 กระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำเบื้องต้น (Water treatment system หรือ Pre-treatment)

กระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำเบื้องต้น เป็นการกรองน้ำประปาให้สะอาดมากขึ้น โดยจะกรองเอาฝุ่นผง เศษวัสดุ และของแข็งต่างๆออกจากน้ำประปา ก่อนที่จะผ่านเข้าสู่กระบวนการลำดับต่อไปคือรีเวอร์ออสโมซิสโดยการกรอง Pre-treatment ประกอบด้วยสารกรอง 3 ชนิดคือ

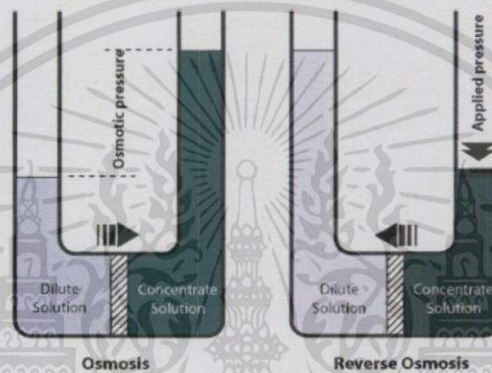
1. สารกรองแมงกานีสทำจากเม็ดทรายเคลือบด้วยแมงกานีสออกไซด์ (MnO_2) มีคุณสมบัติสามารถจับสนิม น้ำ ธาตุเหล็ก แมงกานีส ตะกั่ว กำมะถัน และสังกะสี ออกจากน้ำ
2. สารกรองคาร์บอนสำหรับกรองเอาคลอรีนและสารอินทรีย์ที่ปะปนมากับน้ำประปาเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของพื้นผิวอาร์โอเมมเบรนจากการสัมผัสคลอรีน
3. สารกรองเรซินเป็นสารกรองโดยใช้หลักการเปลี่ยนประจุ (Ion Exchange) โดยใช้สารกรองเรซินเป็นตัวแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าในน้ำ หรือใช้จับสารละลาย แคลเซียม แมกเนเซียมในน้ำ อันเป็นสาเหตุของความกระด้าง ทำให้น้ำที่ผ่านชั้นสารกรองเรซินปรับสภาพน้ำเป็นน้ำอ่อน

ลำดับที่ 2 กระบวนการกรองน้ำด้วยรีเวอร์ออสโมซิส (Reverse Osmosis water system)

กระบวนการกรองน้ำด้วยรีเวอร์ออสโมซิสนี้เป็นการกรองเอาสารละลาย สารเคมี เชื้อโรค ออกจากน้ำ กระบวนการกรองน้ำออสโมซิสช่วยในการกรอง ซึ่งจากหลักการออสโมซิสแล้วน้ำจะเดินทางผ่านเยื่อเลือกผ่านหรือเมมเบรนไปสู่ด้านที่มีความเข้มข้นของสารละลายมากกว่า แต่ด้วยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเพิ่มแรงดันทางด้านที่มีสารละลายความเข้มข้นสูงให้มากกว่าแรงดันออสโมซิส น้ำในด้านสารละลายความเข้มข้นสูงจะไหลผ่านเมมเบรนออกไปยังอีกด้านหนึ่ง กระบวนการดังกล่าวเรียกว่า รีเวอร์สออสโมซิส เมมเบรนที่ใช้ในการกรองนี้มีความละเอียดในการกรองถึงระดับ 5 ไมโครเมตร และมีความนำไฟฟ้าประมาณ 10 ไมโครซีเมนต์ โดยน้ำที่ออกมาจากการกรองด้วยรีเวอร์สออสโมซิสมีอยู่ด้วยกัน 3 ส่วนคือ

1. น้ำดี (Permeate) คือ น้ำบริสุทธิ์ที่นำไปใช้ในการกรองขั้นต่อไปคือ การกรองน้ำปราศจากไอออน
2. น้ำรีไซเคิล (Recycle) คือ น้ำที่ถูกนำไปใช้ใหม่ โดยการรักษาระดับแรงดันให้เท่ากับน้ำก่อนผ่านเมมเบรน เพื่อเป็นการรักษาเมมเบรนไม่ให้เกิดการอุดตัน
3. น้ำทิ้ง (Brine) คือ สารละลายความเข้มข้นสูง สารละลายนี้ถูกระบายทิ้งอยู่ตลอดเวลา



รูปที่ 2.9 หลักการของรีเวอร์สออสโมซิส

ลำดับที่ 3 กระบวนการกรองน้ำปราศจากไอออน (Deionization water system) [6] Deionization (“น้ำDI” หรือ “Demineralization”) หมายถึง การขจัดไอออนออก ไอออนคือ อะตอมหรือโมเลกุลที่มีประจุไฟฟ้าทั้งประจุลบและประจุบวกซึ่งพบได้ในน้ำ ในหลายๆ กระบวนการที่ใช้น้ำในการล้างชำระหรือเป็นส่วนผสมจะต้องพิจารณาถึงปริมาณไอออนที่เจือปนและที่ต้องขจัดออก

ไอออนที่มีประจุบวกจะถูกเรียกว่า “แคตไอออน (Cation)” ส่วนที่มีประจุลบจะถูกเรียกว่า “แอนไอออน (Anions)” เรซินที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนจะถูกใช้ในการดึงแคตไอออนและแอนไอออนที่ไม่พึงประสงค์ออกจากไอออนไฮโดรเจนและไอออนไฮดรอกไซด์จากนั้นจะได้ผลผลิตเป็นน้ำบริสุทธิ์ที่ไม่มีไอออนเหลืออยู่ ตารางด้านล่างระบุไอออนส่วนมากที่มักพบในน้ำประปา

ตารางที่ 2.6 ไอออนชนิดต่างๆที่ผสมอยู่ในน้ำ

Cations (ขจัดออกด้วยCation Resins)	Anions (ขจัดออกด้วยAnion Resins)
แคลเซียม (Ca^{2+})	คลอไรด์ (Cl^-)
แมกนีเซียม (Mg^{2+})	ซัลเฟต (SO_4^{2-})
เหล็ก (Fe^{3+})	ไนเตรต (NO_3^{2-})
แมงกานีส (Mn^{2+})	คาร์บอเนต (CO_3^{2-})
โซเดียม (Na^+)	ซิลิกา (SiO_2)
ไฮโดรเจน (H^+)	ไฮดรอกไซด์ (OH^-)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน

เรซินแลกเปลี่ยนไอออนถูกใช้ในการผลิตน้ำที่ปราศจากไอออน (Deionized Water, Demineralized Water หรือ DI Water) เรซินเป็นลักษณะเม็ดพลาสติกที่ประกอบมาจากสารประกอบอินทรีย์ (Organic Polymer) ด้วยพันธะแบบโซ่ โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือแบบมีประจุบวกและแบบมีประจุลบ

เรซินแคทไอออน (Cation Resin) จะมีประจุลบเพื่อดึงดูดประจุบวก ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ 2 แบบ คือ เรซินแคทไอออนแบบกรดอ่อน (Weak Acid Cation : WAC) และ เรซินแคทไอออนแบบกรดแก่ (Strong Acid Cation : SAC) โดยเรซินแคทไอออนแบบกรดอ่อนจะใช้ในการผลิตแก้วและการใช้งานจำเพาะอื่นๆ ส่วนเรซินแคทไอออนแบบกรดแก่จะใช้ในการผลิตน้ำปราศจากไอออน

เรซินแอนไอออน (Anion Resin) จะมีประจุบวกเพื่อดึงดูดประจุลบ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ 2 แบบคือ เรซินแอนไอออนแบบด่างอ่อน (Weak Base Anion : WBC) และเรซินแอนไอออนแบบด่างแก่ (Strong Base Anion : SBC) โดยเรซินแอนไอออนแบบด่างอ่อนจะไม่สามารถขจัดซิลิกาและคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ได้ นอกจากนี้ยังสามารถสะเทินกรดอ่อนให้เป็นกลางได้ ส่วนเรซินแอนไอออนแบบด่างแก่จะสามารถขจัดไอออนลบตามตารางที่ 2.4 ได้ทั้งหมดรวมคาร์บอนไดออกไซด์ถึงทั้ง 2 ประเภทใช้ในการผลิตน้ำปราศจากไอออน

ในกรณีการผลิตน้ำปราศจากไอออน เรซินแคทไอออนจะถูกทำให้ใช้ใหม่ได้ (Regenerating) ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ไอออนของไฮโดรเจน จะถูกดึงเข้าจับที่เม็ดเรซินแคทไอออน ส่วน เรซินแอนไอออนจะถูกทำให้ใช้ใหม่ได้ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) อะตอมของไฮดรอกไซด์จะถูกดึงเข้าจับที่เม็ดเรซินแอนไอออน

ไอออนที่ต่างกันจะถูกดึงไปหาเม็ดเรซินด้วยแรงดึงดูดที่ต่างกัน ตัวอย่างเช่น ไอออนแคลเซียมจะถูกดึงดูดด้วยแรงที่มากกว่าไอออนโซเดียม ไอออนไฮโดรเจนที่เม็ดเรซินแคทไอออนและไอออนไฮดรอกไซด์ บนเม็ดเรซินแอนไอออนจะมีแรงดึงดูดที่ไม่แรงเพียงพอให้เกิดการแทนที่ในการแลกเปลี่ยนไอออน โดยไอออนบวกที่อยู่ในน้ำจะเข้าไปแทนที่ไอออนไฮโดรเจนที่เม็ดเรซินแคทไอออนทำให้ไอออนไฮโดรเจนหลุดออกมา เช่นเดียวกันไอออนลบที่อยู่ในน้ำจะเข้าไปแทนที่ไอออนไฮดรอกไซด์ที่เม็ดเรซินแอนไอออนทำให้ไอออนไฮดรอกไซด์หลุดออกมา ทำให้อิออนไฮโดรเจนและไอออนไฮดรอกไซด์ที่หลุดออกมารวมตัวกันเป็นน้ำบริสุทธิ์ (H_2O)

เมื่อแหล่งไอออนที่ใช้แลกเปลี่ยนบนเม็ดเรซินแคทไอออนและเม็ดเรซินแอนไอออนถูกใช้งานหมดและไม่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้อีก ทำให้จำเป็นต้องมีการถูกทำให้ใช้ใหม่ได้เพื่อให้สามารถนำเม็ดเรซินกลับมาใช้ใหม่ได้

2.3.3 ความแตกต่างระหว่าง Separate bed และ mixed bed

การกำจัดแร่ธาตุจำเป็นจะต้องใช้เม็ดเรซินที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนอย่างน้อย 2 ชนิดเพื่อผลิตน้ำที่ปราศจากไอออน โดยจะมีเม็ดเรซิน 1 ชนิดใช้ขจัดประจุบวกและอีก 1 ชนิดใช้ขจัดประจุลบออกจากน้ำ

ในระบบที่ใช้สาร 2 ชนิดแยกกัน (Separate bed) จะให้น้ำผ่านเรซินแคทไอออนก่อนเสมอ ดังนั้นเมื่อเติมน้ำประปาเข้าระบบจะถูกเติมเข้าถึงของเรซินแคทไอออนก่อนเสมอทำให้อิออนบวกในน้ำจะถูกจับด้วยเม็ดเรซินแคทไอออนแล้วเข้าไปแทนที่ไอออนของไฮโดรเจน ทำให้อิออนของไฮโดรเจนหลุดออกมาเป็นไอออนอิสระ ส่วนไอออนลบจะสามารถผ่านเม็ดเรซินแคทไอออนได้ โดย

ไอออนลบของน้ำคือไอออนของคลอไรด์ซึ่งจะไปรวมตัวกับไอออนของไฮโดรเจนที่หลุดออกมาเกิดเป็นอะตอมกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ด้วยเหตุนี้ของเสียจากเรซินแคทไอออนแบบกรดแก่จึงมีค่า pH ที่ต่ำและมีสภาพนำไฟฟ้าสูงกว่าน้ำประปาที่ถูกเติมเข้าถัง

ของเสียที่ออกจากเรซินแคทไอออนจะประกอบด้วยสารที่มีสภาพเป็นกรดแก่และกรดอ่อน น้ำที่มีสภาพเป็นกรดจะถูกเติมเข้าถังเม็ตรเรซินแอนไอออนต่อ เม็ตรเรซินแอนไอออนจะดึงไอออนลบ เช่น ไอออนคลอไรด์ เป็นต้น และแลกเปลี่ยนได้ไอออนไฮดรอกไซด์ โดยผลรวมของไอออนไฮโดรเจนและไอออนไฮดรอกไซด์จะก่อเป็นอะตอมของน้ำ

ในความเป็นจริงระบบที่ใช้สาร 2 ชนิดจะไม่ได้ผลิตน้ำบริสุทธิ์แต่จะมีไอออนโซเดียม (Na^+) รั่วปะปนออกมาด้วย (Sodium Leakage) ถ้ามีไอออนโซเดียมปะปนผ่านถังเรซินแคทไอออนแล้วมารวมกับไอออนไฮดรอกไซด์ที่ถังเรซินแอนไอออนเกิดเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีสภาพความนำไฟฟ้าสูง ส่วนสาเหตุของการเกิดไอออนโซเดียมรั่ว คือไอออนโซเดียมและไอออนไฮโดรเจนมีความสามารถในการจับกับเม็ตรเรซินแคทไอออนใกล้เคียงกันเลยทำให้บางครั้งไอออนของโซเดียมไม่เข้าจับกับเม็ตรเรซินแคทไอออนเพื่อแลกเปลี่ยนให้ได้ไอออนไฮโดรเจนออกมา

ในระบบที่ใช้สาร 2 ชนิดผสมกัน (Mixed bed) เรซินไอออนลบที่มีสภาพเป็นกรดสูง (Strong Acid Cation) และ เรซินไอออนบวกที่มีสภาพเป็นด่างสูง (Strong Base Anion) จะถูกผสมรวมกัน ซึ่งจะทำงานคล้ายมีระบบใช้สาร 2 ชนิดแยกกันถึง 1000 หน่วยในถังเดียว การแลกเปลี่ยนไอออนบวกและลบจะถูกทำซ้ำหลายรอบภายในถัง ปัญหาของการเกิดไอออนโซเดียมรั่วจะหมดไปเนื่องจากจำนวนครั้งของการแลกเปลี่ยนไอออน จึงทำให้การใช้ระบบที่ใช้สาร 2 ชนิดผสมกันสามารถผลิตน้ำที่ปราศจากไอออนที่มีคุณภาพสูงกว่า

2.3.4 การวัดปริมาณไอออน

ไอออนสามารถนำไฟฟ้าได้โดยกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านน้ำโดยอาศัยไอออนเสมือนทางผ่าน ด้วยเหตุผลนี้การวัดความนำไฟฟ้าของน้ำสามารถบอกได้ว่ามีไอออนประกอบในน้ำเท่าไร ยังมีไอออนในน้ำน้อยเท่าไรยังทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ยากขึ้น ดังนั้นน้ำที่มีสภาพนำไฟฟ้าต่ำจะมีสภาพ “ความปราศจากไอออน” มากกว่าที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูง

2.3.5 ระดับความบริสุทธิ์ตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

ในการแบ่งระดับความบริสุทธิ์มาตรฐานต่างๆ จะแบ่งออกเป็นกลุ่มต่างโดยแต่ละกลุ่มจะมีค่าพารามิเตอร์ต่างกัน โดยโครงการงานเล่มนี้ขอยกมาตรฐานที่กล่าวมาเฉพาะค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของแต่ละกลุ่มความบริสุทธิ์

ตารางที่ 2.7 American Society for Testing and Materials (ASTM) D1193-91 [9]

คุณสมบัติ	กลุ่มที่1	กลุ่มที่2	กลุ่มที่3	กลุ่มที่4
ค่าความนำทางไฟฟ้าสูงสุด ($\mu\text{S}/\text{cm}$ @ 25°C)	0.056	1.0	0.25	5.0
ค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำสุด ($\text{M}\Omega\text{-cm}$ @ 25°C)	18.0	1.0	4.0	0.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.8 ASTM Electronics and Semiconductor Grade Water (D5127-99) [10]

คุณสมบัติ	กลุ่มE-1	กลุ่มE-1.1	กลุ่มE-1.2	กลุ่มE-2	กลุ่มE-3	กลุ่มE-4
ค่าความต้านทานไฟฟ้า ต่ำสุด ($M\Omega$ -cm ที่ 25°C)	18.2	18.2	18.2	17.5	12	0.5

ตารางที่ 2.9 National Committee for Clinical Laboratory Standards (NCCLS) – 1988 [11]

คุณสมบัติ	กลุ่มที่1	กลุ่มที่2	กลุ่มที่3
ค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำสุด ($M\Omega$ -cm ที่ 25°C)	มากกว่า10.0	มากกว่า1.0	มากกว่า0.1

หมายเหตุ

กลุ่มที่ 1 ใช้ในการทดลองที่ต้องการความแม่นยำและเที่ยงตรงสูงสุดและต้องการสิ่งรบกวนน้อยที่สุด
 กลุ่มที่ 2 ใช้ในการทดลองในห้องทดลองทั่วไปและการล้างเลนส์
 กลุ่มที่ 3 ใช้ล้างผลิตภัณฑ์แก้ว หรือใช้ในการผลิตน้ำกลุ่มอื่นๆ

ตารางที่ 2.10 College of American Pathologists (CAP) – 1988 [12]

คุณสมบัติ	กลุ่มที่1	กลุ่มที่2	กลุ่มที่3
ค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำสุด ($M\Omega$ -cm ที่ 25°C)	10.0 (In Line)	2.0	0.1

หมายเหตุ

กลุ่มที่ 1 ใช้ในการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ การวิเคราะห์ ultra-micro กระบวนการวิเคราะห์หาค่าวิกฤติ
 กลุ่มที่ 2 ใช้ในการทดลองในห้องทดลองทั่วไป การทดลองทางชีววิทยา

การออกแบบและการประกอบสร้าง

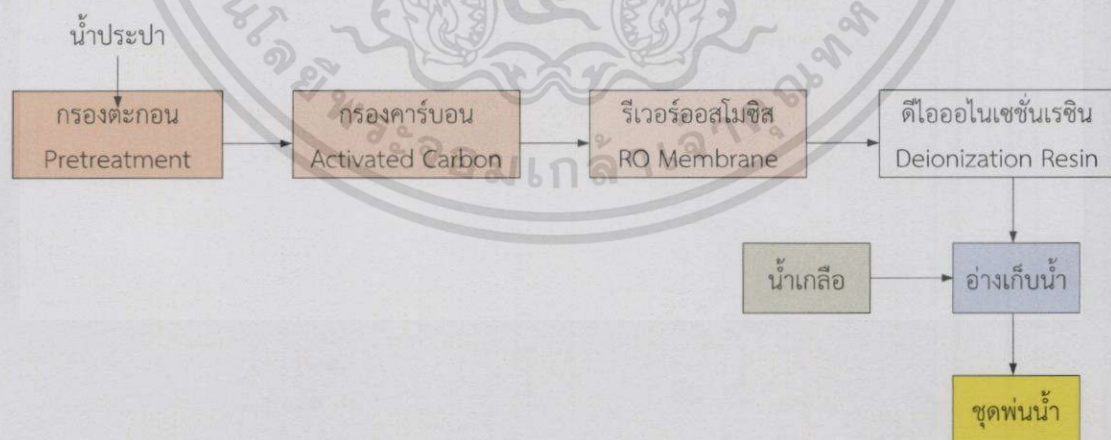
3.1 แนวคิดพื้นฐาน

ในการออกแบบชุดทดสอบความคงทนต่อแรงดันในสภาวะเปียกจะประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ชุดสร้างน้ำ และชุดพ่นน้ำ

โดยชุดสร้างน้ำจะใช้สร้างน้ำที่มีความนำไฟฟ้าและความบริสุทธิ์ในระดับต่างๆ ให้อยู่ในช่วงที่มาตรฐานกำหนด [1,2] เพื่อนำไปใช้ในการทดสอบความคงทนต่อแรงดันในสภาวะเปียกของลูกถ้วยแบบแขวน โดยชุดสร้างน้ำที่ใช้ในโครงการนี้ถูกออกแบบคุณสมบัติต่างๆที่จำเป็นต่อการสร้างน้ำโดยนักศึกษาและให้บริษัทเอกชนดำเนินการประกอบสร้างตามที่ได้ออกแบบซึ่งชุดสร้างน้ำนี้มีการทำงาน 3 ขั้นตอนหลักได้แก่

1. ถังกรองตะกอน (Pretreatment) จะรับน้ำประปามากรองเอาตะกอนออก
2. ถังรีเวอร์สออสโมซิส (RO) จะรับน้ำจากถังกรองตะกอนซึ่งมีชุดปั้มน้ำเพิ่มแรงดันน้ำเข้าชุดไส้กรองเพื่อนำมาขจัดสารเคมีและเชื้อโรคออก และแยกน้ำที่มีความเข้มข้นสูงทิ้ง
3. ถังกรองประจุ (DI) จะรับน้ำจากถังรีเวอร์สออสโมซิสมาผ่านเรซินแคทไอออน (Cation Resin) และเรซินแอนไอออน (Anion Resin) ที่อยู่รวมกันแบบผสม (Mixed bed) (ทั้งเรซินแคทไอออน และเรซินแอนไอออน อยู่ในถังเดียวกันเพื่อลดการรั่วไหลของประจุโซเดียม) เพื่อดึงประจุของสารออก

โดยเรียงตามลำดับการผลิตคือ น้ำผ่านการกรองตะกอน (Pretreatment) น้ำผ่านการกรองรีเวอร์สออสโมซิส (RO) และน้ำที่ผ่านการกรองประจุออก (DI) ซึ่งมีคุณสมบัติมีความนำไฟฟ้าและความบริสุทธิ์เรียงจากน้อยไปมาก ตามลำดับ จากนั้นนำน้ำที่ได้มาไปเก็บในอ่างที่ออกแบบไว้ในหัวข้อ 3.7 โดยกรรมวิธีผลิตน้ำถูกแสดงในรูปที่ 3.1



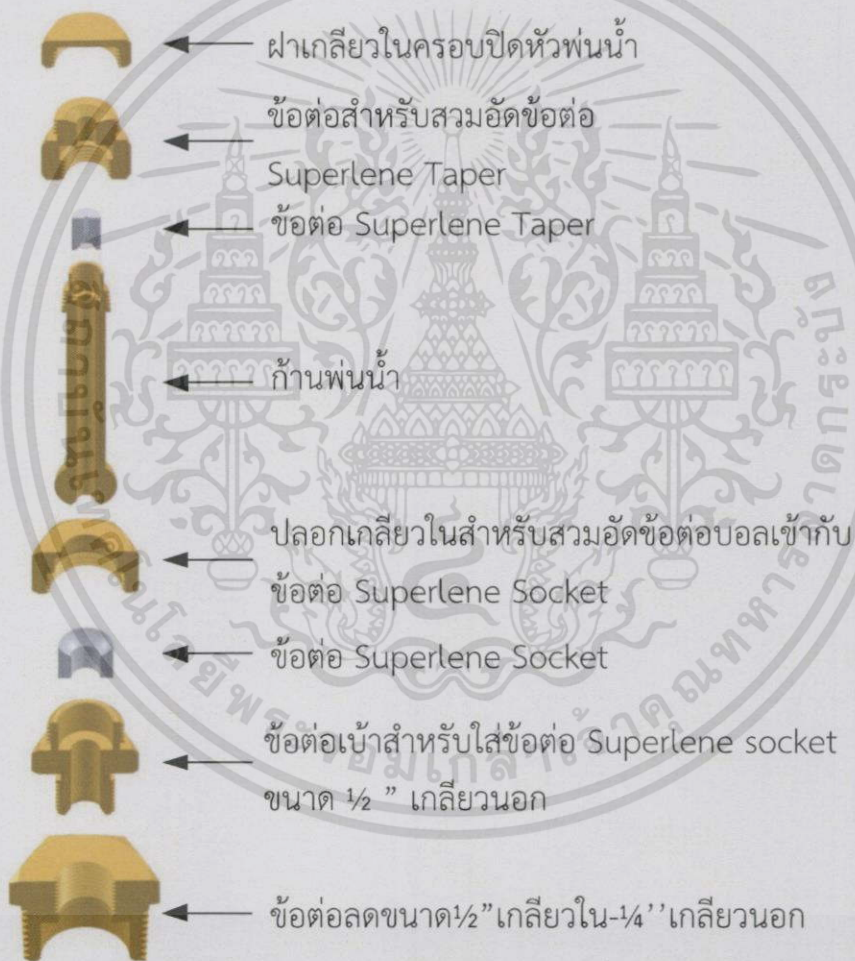
รูปที่ 3.1 กระบวนการผลิตน้ำในการทดสอบ

3.2 การออกแบบหัวพ่นน้ำ

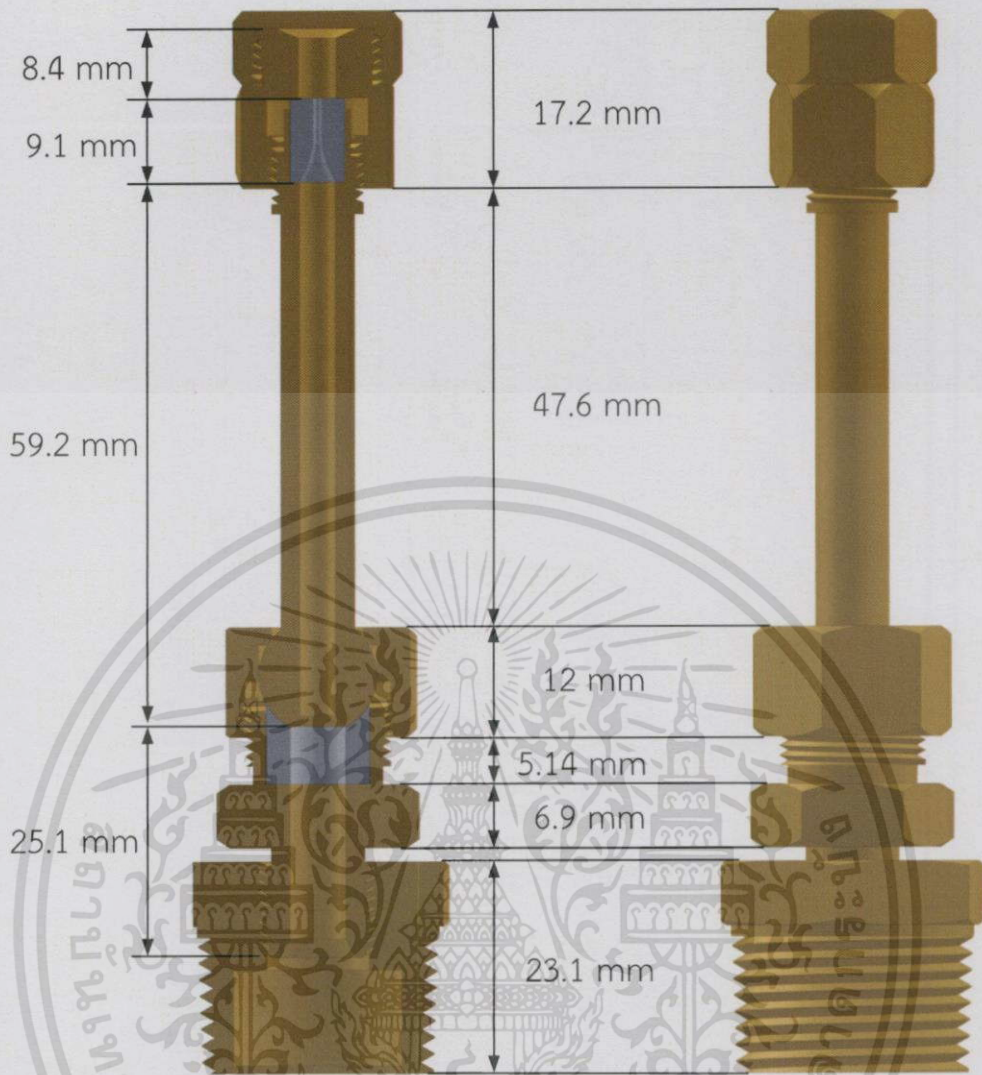
เพื่อให้ลักษณะของหยดน้ำเป็นไปตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ [1,2] ดังนั้นการออกแบบหัวพ่นน้ำจึงต้องอ้างอิงคุณสมบัติของน้ำตามมาตรฐาน โดยมีแนวคิดในการออกแบบดังนี้

- ต้องสามารถปรับทิศทางของการพ่นได้ $10^\circ - 15^\circ$ จากแนวแกน
- สามารถปรับเปลี่ยนขนาดของรูพ่นน้ำที่ปลายหัวพ่นน้ำได้
- ต้องมีความทนทานต่อการใช้งานกับน้ำและสารละลายได้
- ขนาดของหัวพ่นต้องสามารถประกอบเข้ากับชุดท่อ PVC ที่มีขายทั่วไปตามท้องตลาดได้
- เมื่อต้องการให้หัวพ่นน้ำหยุดฉีดน้ำต้องสามารถอุดปลายหัวฉีดได้

จากข้อกำหนดดังกล่าวการออกแบบหัวพ่นจึงเป็นไปตามรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 หัวฉีดทองเหลืองต้นแบบ (แยกส่วน)



รูปที่ 3.3 หัวฉีดทองเหลืองต้นแบบ (ระบุขนาด)

ในการออกแบบเลือกใช้วัสดุสำหรับสร้างหัวฉีดน้ำเป็นทองเหลือง เนื่องจากสามารถทนต่อความชื้น ความร้อน สภาพอากาศในสภาวะต่างๆ และสนิม ได้เป็นอย่างดี

ลักษณะของหัวพ่นน้ำจะเป็นการรวมส่วนประกอบต่างๆ ที่ออกแบบขึ้นมาประกอบกันดังนี้ เริ่มจากส่วนฐานหัวพ่นซึ่งเป็นส่วนรับน้ำเข้า เลือกออกแบบให้ใช้ข้อต่อลดขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว เกลียวนอก - $\frac{1}{4}$ นิ้ว เกลียวใน ส่วนที่ต่อกับส่วนฐานคือข้อต่อที่มีเบ้าสำหรับใส่ข้อต่อ Superlene Socket โดยมีขนาด $\frac{1}{4}$ นิ้ว เกลียวนอก โดยที่ข้อต่อ Superlene Socket จะเป็นลักษณะเบ้าที่รับกับส่วนของข้อต่อแบบบอลที่อยู่ที่ก้านพ่นน้ำ ซึ่งข้อต่อ Superlene Socket และข้อต่อแบบบอลจะถูกปลอกเกลียวในสวมอัดไว้ด้วยเกลียวที่ที่ชั้นระหว่างตัวปลอกกับข้อต่อที่มีเบ้าสำหรับใส่ข้อต่อ Superlene Socket ส่วนของก้านพ่นน้ำที่ปลายด้านหนึ่งจะเป็นข้อต่อแบบบอลอีกด้านจะเป็นเบ้าสำหรับใส่ข้อต่อ Superlene Taper ที่มีรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 0.9 มิลลิเมตร ซึ่งรอบปลอกจะมีเกลียวนอกเพื่อสวมเข้ากับข้อต่อสำหรับสวมอัดข้อต่อ Superlene Taper ที่ที่ปลายปลอกสวมอัดจะมีเกลียวนอกสำหรับสวมกับฝาครอบปิดหัวพ่นน้ำ โดยสามารถดูรูปประกอบได้จากรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การออกแบบแนวหัวพ่นน้ำ

เพื่อให้ลักษณะการกระจายของหยดน้ำเป็นไปตามมาตรฐาน [1,2] จึงต้องมีการออกแบบแนวหัวพ่นน้ำให้สามารถพ่นน้ำได้กระจายครอบคลุมและทั่วถึงวัตถุทดสอบ

การออกแบบจึงกำหนดให้หัวพ่นน้ำแต่ละหัวห่างกัน 20 cm ทั้งหมด 15 หัวเพื่อรองรับการทดสอบลูกถ้วยแขวนเป็นพวง (หลายลูก) รวมความยาวแนวพ่นน้ำ 1 แนวเป็น 3 m ตามรูปที่ 3.6 และมีการติดตั้งเกจความดัน (Pressure gauge) เข้าที่ปลายด้านหนึ่งเพื่อวัดความดันในแนวพ่นน้ำดังรูปที่ 3.5 ในการทดสอบจะติดตั้งแนวหัวพ่นน้ำ 2 แนวในแนวตั้ง โดยระหว่างแนวมีข้อต่อยูเนียน และข้อต่อบอลวาล์ว ซึ่งข้อต่อบอลวาล์วแต่ละตำแหน่งมีหน้าที่ต่างกัน โดยวาล์ว A ทำหน้าที่ตัดต่อน้ำเข้าแนวหัวพ่นน้ำแนวซ้าย วาล์ว B ทำหน้าที่ตัดต่อน้ำเข้าแนวหัวพ่นน้ำแนวขวา และวาล์ว C ทำหน้าที่ระบายน้ำจากแต่ละแนวทิ้ง ตามรูปที่ 3.4

โดยแนวชุดหัวพ่นน้ำนี้จะถูกยึดกับคานเหล็กฉากยาวเต็มแนวหัวพ่นน้ำแล้วยึดด้วยยูโบลต์ขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว เต็มตลอดแนวทุกๆระยะ 0.6 m จากปลายทั้ง 2 ข้าง ดังรูปที่ 3.7 และยึดเข้ากับนั่งร้านด้วยยูโบลต์ ขนาด 1-1/2 นิ้ว ตามรูปที่ 3.8 และรูปที่ 3.9

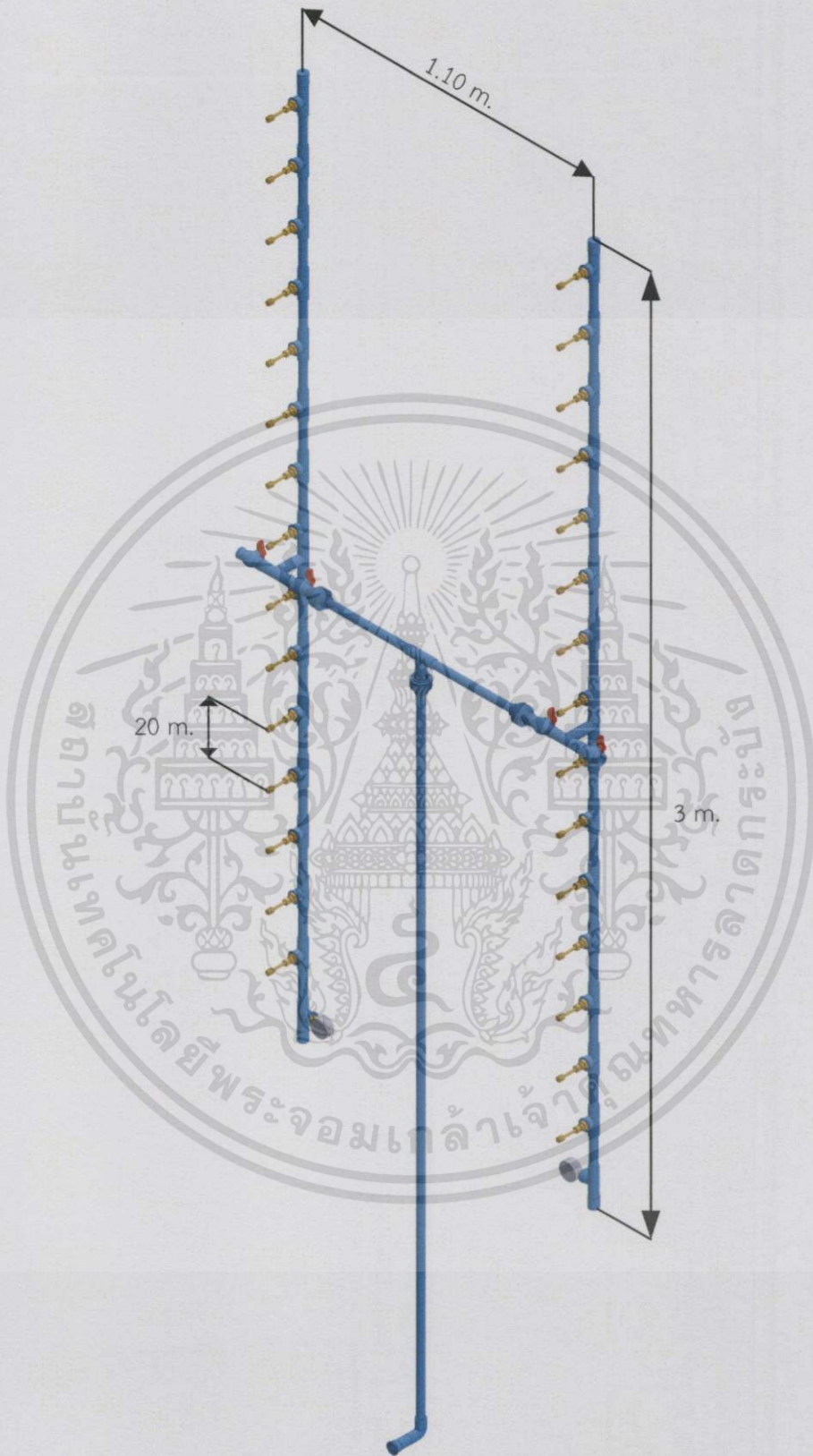


รูปที่ 3.4 ข้อต่อระหว่างแนว



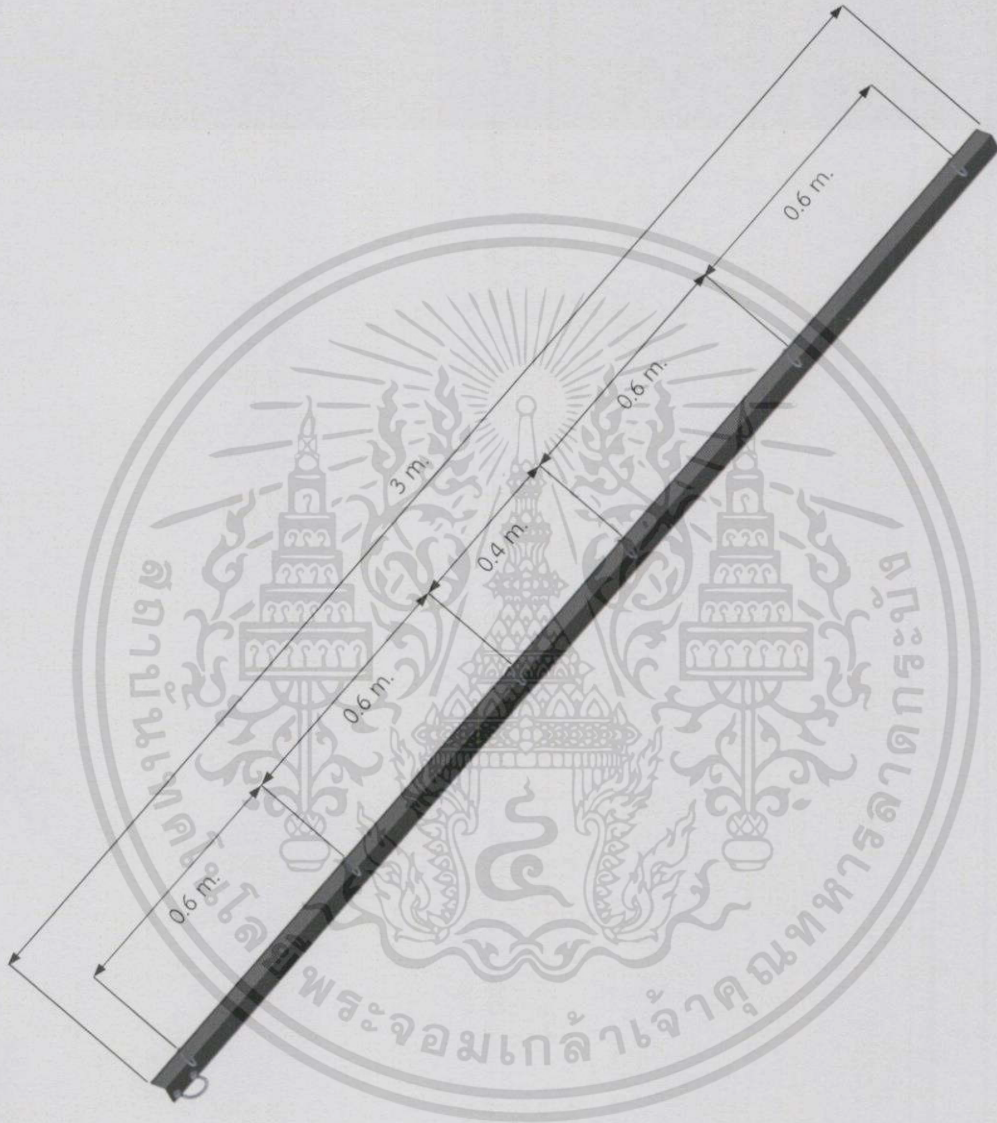
รูปที่ 3.5 ตำแหน่งปลายท่อสำหรับใส่ Pressure Gauge

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แนวท่อสำหรับชุดพ่นน้ำและระยะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 คานเหล็กฉากรับแรงสำหรับ 1 แนว หัวพ่นน้ำและระยะของ ยูโบลต์ ขนาด 3/4”

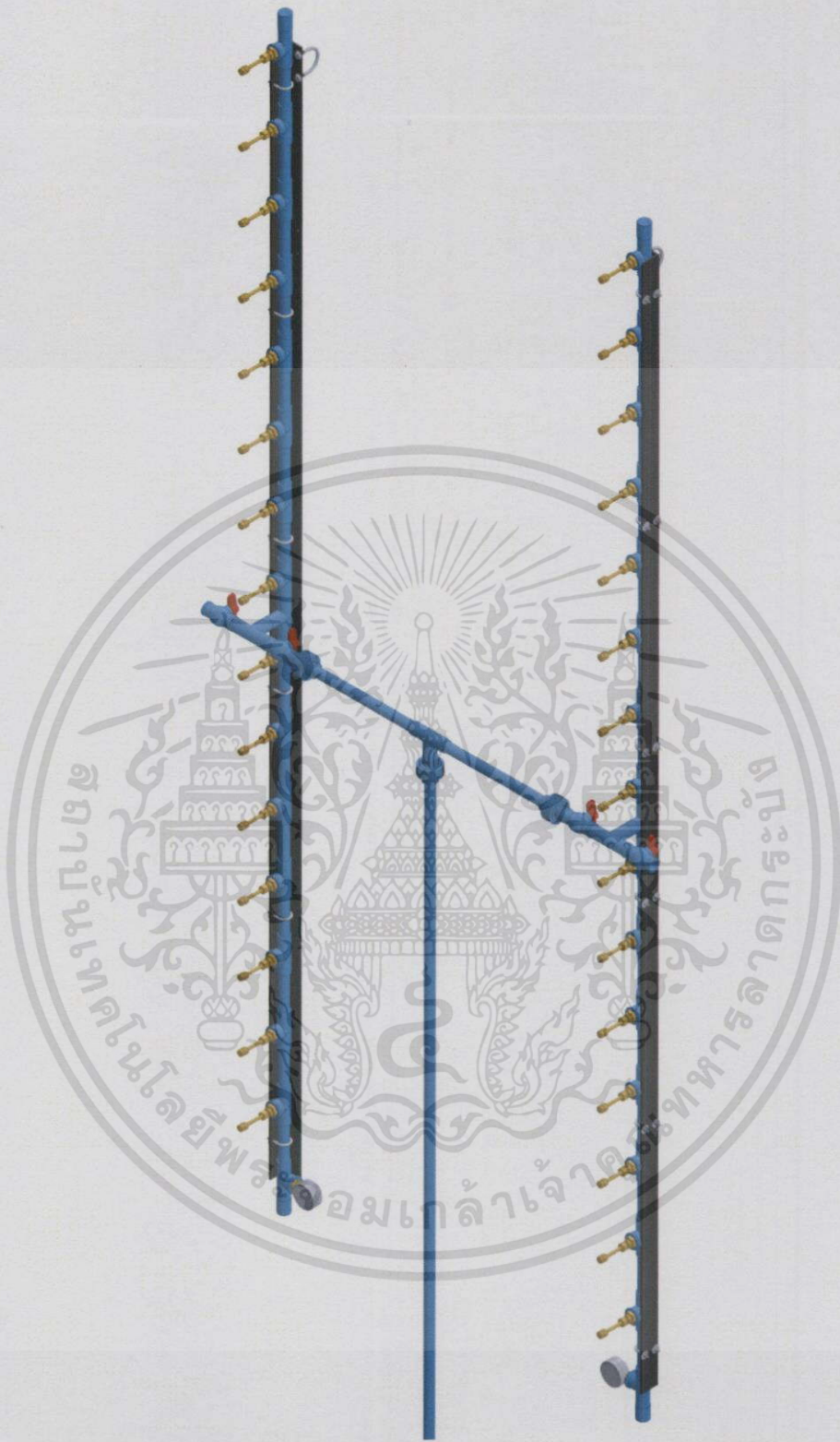
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยูโบลต์ ขนาด 1-1/2 นิ้ว
เพื่อใช้ยึดกับนั่งร้าน



รูปที่ 3.8 คานเหล็กฉากวางบนป่ารับแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 ส่วนด้านข้างของคานเหล็กฉากและบารับแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ระยะปลอดภัย

ในการทดสอบออกแบบให้สายน้ำที่พุ่งออกมาทำมุม 0° กับแนวระดับ และทดสอบกับลูกถ้วยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.5 นิ้ว ที่แรงดันทดสอบ 50 - 60 kV ติดตั้งลูกถ้วยทดสอบโดยการแขวนในอากาศ สูงจากพื้น 2.00 - 2.10 เมตร จากมาตรฐาน [3] กำหนดให้ระยะปลอดภัย (Clearance) มีค่า 1.5 เท่าของระยะอาร์กแห้ง โดยระยะปลอดภัยต่ำสุดคือ 914 มิลลิเมตร หรือประมาณ 1 เมตร หรือถ้าคำนวณระยะปลอดภัยได้เกิน 1 เมตร ให้ใช้ระยะที่คำนวณได้นั้นในการติดตั้ง เนื่องจากการทดสอบในสภาวะเปียก ในการทดสอบนี้จะกำหนดให้ระยะปลอดภัยเป็น 4 เมตร ดังรูปที่ 3.10

3.5 การติดตั้งแนวหัวพ่นน้ำ

เนื่องจากการทดสอบความคงทนอยู่ต่อแรงดันกระแสสลับในสภาวะเปียกนี้เป็นการจำลองผลของฝนที่เกิดขึ้นในธรรมชาติที่มีต่อวัตถุทดสอบ จึงต้องมีการพ่นน้ำเข้าใส่วัตถุทดสอบจากที่สูงเพื่อจำลองสภาพของฝน ทำให้ต้องมีการคำนวณอัตราเร็วของน้ำที่ถูกพ่นออกจากหัวพ่นน้ำและการเคลื่อนที่ของน้ำที่ถูกพ่นออกมาแบบโปรเจกไทล์เพื่อให้สามารถติดตั้งวัตถุทดสอบในตำแหน่งที่โดนน้ำอย่างครอบคลุมและทั่วถึง

3.5.1 การหาอัตราเร็วน้ำจากปลายหัวพ่นน้ำ

ช่องของ Superlene Taper ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.9 มิลลิเมตร จึงมีพื้นที่ของช่องเท่ากับ 636.172×10^9 ตารางเมตร จะได้อัตราการไหลของหัวพ่นน้ำ 1 หัว เท่ากับ 0.011 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ดังนั้นสามารถหาค่าอัตราเร็วของน้ำจากปลายหัวพ่นน้ำได้จากสมการ (3.1)

$$v = \frac{Q}{A} \quad (3.1)$$

$$v = \frac{11.363 \times 10^{-6}}{636.172 \times 10^{-9}}$$

$$v = 17.862 \text{ m/s}$$

3.5.2 การคำนวณการเคลื่อนที่ของน้ำแบบโปรเจกไทล์

สามารถคำนวณหาเวลาที่น้ำเดินทางในอากาศจากสมการ (3.2)

$$t = \frac{x}{v_x} \quad (3.2)$$

เมื่อ v_x คือ ความเร็วต้นของน้ำที่ออกจากปลายหัวพ่นในแนวราบ มีค่าเท่ากับ 17.862 m/s

v_y คือ ความเร็วต้นของน้ำที่ออกจากปลายหัวพ่นในแนวตั้ง มีค่าเท่ากับ 0 m/s

X คือ ระยะห่างในแนวราบระหว่างหัวพ่นน้ำกับวัตถุทดสอบ ตามหัวข้อ 3.5

t คือ เวลาที่น้ำลอยในอากาศ

$$t = \frac{4}{17.862}$$

$$t = 0.224 \text{ sec}$$

สามารถหาระยะในแนวดิ่งได้จากสมการ (3.3)

$$y = U_{y0}t + \frac{1}{2}gt^2 \quad (3.3)$$

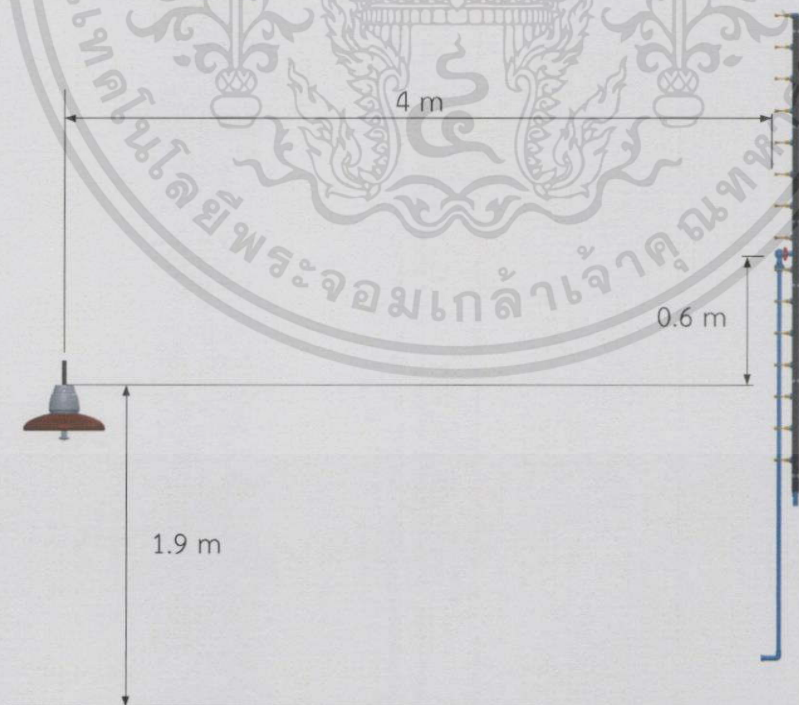
เมื่อ U_{y0} คือ ความเร็วต้นในแนวดิ่งของน้ำ เนื่องจากกหนดให้แนวของสายน้ำทำมุม 0° กับแนวระนาบ จึงมีค่าเท่ากับ 0 m/s

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

$$y = \frac{1}{2} \times 9.81 \times 0.224^2$$

$$y = 0.246 \text{ m}$$

ดังนั้นการติดตั้งแนวหัวพ่นน้ำจะอยู่สูงจากพื้นไม่น้อยกว่า 2.146 m แต่เพื่อเป็นการลดผลของความดันน้ำที่ลดลง จึงออกแบบให้ติดตั้งแนวหัวพ่นน้ำอยู่สูงจากพื้น 2.5 m ดังรูปที่ 3.10

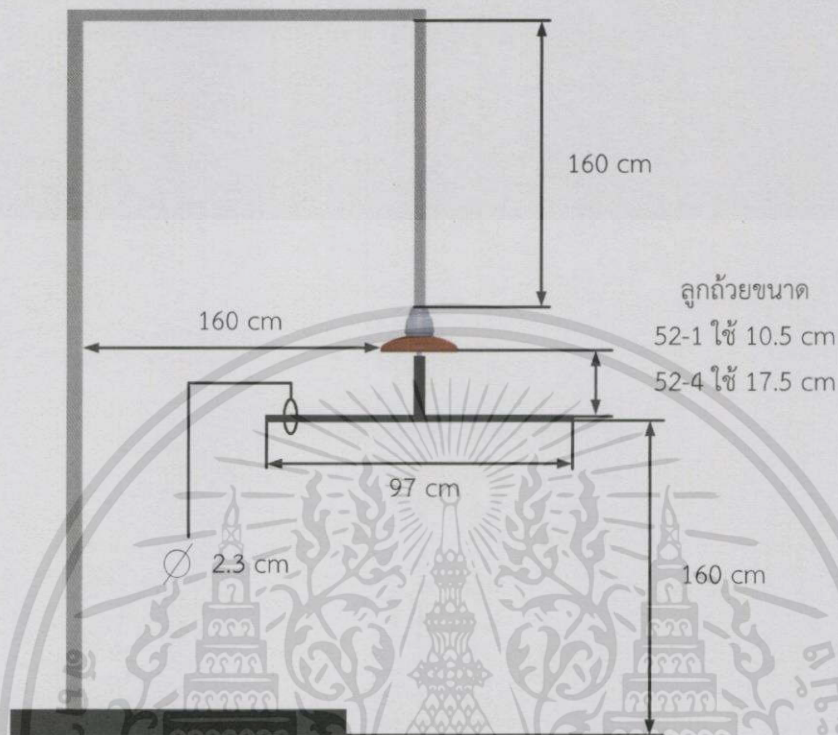


รูปที่ 3.10 ระยะการติดตั้งแนวหัวพ่นน้ำและตำแหน่งลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การติดตั้งวัตทดสอบ

ในการออกแบบการติดตั้งวัตทดสอบจะใช้ระยะต่างๆจากจากหัวข้อ 2.2.6 ซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐาน ANSI 29.1 [3] จึงทำการออกแบบการติดตั้งดังรูป



รูปที่ 3.11 การออกแบบการติดตั้งวัตทดสอบ

3.7 การคำนวณคุณสมบัติของชุดมอเตอร์ปั้มน้ำ

ในการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันกระแสน้ำนี้ จะมีการพ่นน้ำใส่วัตทดสอบที่ความสูงของชุดทดสอบในระดับความสูงต่างๆ เพื่อให้ น้ำที่ถูกพ่นออกมานี้มีอัตราการหยดของหยดน้ำตามที่ต้องการจึงจำเป็นที่จะต้องมีการใช้มอเตอร์ปั้มน้ำในการเพิ่มแรงดันในพ่นน้ำ โดยให้มอเตอร์ปั้มนำน้ำที่สูบน้ำจากถังเก็บน้ำส่งขึ้นชุดหัวพ่นน้ำ

จากสมการ

$$WHP = \rho \times g \times Q \times H$$

$$WHP = \frac{1000 \times 9.81 \times Q \times H}{1000 \times 1000}$$

$$WHP = 9.81 \times 10^{-3} \times Q \times H$$

$$WHP = \frac{QH}{102} \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ WHP คือ water horse power หรือ กำลังที่ใช้ส่งน้ำจากด้านนอกของมอเตอร์ปั๊ม
- Q คือ อัตราการไหลภายในท่อ (litre/sec)
- H คือ ระยะแนวตั้งระหว่างมอเตอร์ปั๊มถึงชุดทดสอบ
- ρ คือ ความหนาแน่นมีค่าเท่ากับ 1000 kg/mm^3
- g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก 9.81 m/s^2

ค่าอัตราการไหลของน้ำภายในท่อ (Q) สามารถหาได้จากการนำภาชนะขนาด 1 ลิตร ไปเก็บน้ำที่ถูกพ่นออกจากหัวน้ำ 1 หัว โดยใช้แรงดัน 3.4 บาร์ในการพ่นน้ำ ซึ่งจากการทดลองใช้เวลา 1.28 นาที จึงทำให้อัตราการไหลของน้ำต่อ 1 หัวพ่นน้ำ เท่ากับ

$$Q_{1\text{หัว}} = \frac{1}{\frac{28}{1+\frac{60}{60}}} = 0.682 \text{ litre/min}$$

$$Q_{1\text{หัว}} = \frac{0.68182}{60} = 0.011 \text{ litre/sec}$$

โดยชุดทดสอบได้ถูกออกแบบให้มีแนวพ่นน้ำแบ่งออกเป็น 2 แนว ในแต่ละแนวประกอบด้วยหัวพ่นน้ำ 15 หัวพ่น ดังนั้น 1 ชุดทดสอบจึงมีหัวพ่นน้ำจำนวน 30 หัวพ่น ทำให้อัตราการไหลของน้ำ 1 ชุดทดสอบ เท่ากับ

$$Q_{1\text{ชุด}} = 30 \times 0.011$$

$$Q_{1\text{ชุด}} = 0.341 \text{ litre/sec}$$

ระยะแนวตั้งจากมอเตอร์ปั๊มถึงชุดทดสอบ (H) ที่มากที่สุดคือ 5.5 เมตร ดังนั้นจากสมการ (3.7) ทำให้ได้ WHP เท่ากับ

$$\text{WHP} = \frac{QH}{102} \quad (3.8)$$

$$\text{WHP} = \frac{0.341 \times 5.5}{102}$$

$$\text{WHP} = 0.018 \text{ kw}$$

ให้ประสิทธิภาพที่ต่ำที่สุดของมอเตอร์ปั๊มเท่ากับ 30%

$$P_{\text{pump}} = \frac{0.018}{0.3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{\text{pump}} = 0.061 \text{ kw}$$

ดังนั้นจึงเลือกใช้มอเตอร์ปั๊มสูบน้ำส่งขึ้นชุดทดสอบขนาด 1 แรงม้า (Hp) ที่สามารถปรับค่าแรงดันน้ำได้จากสวิตช์ความดัน (Pressure Switch)

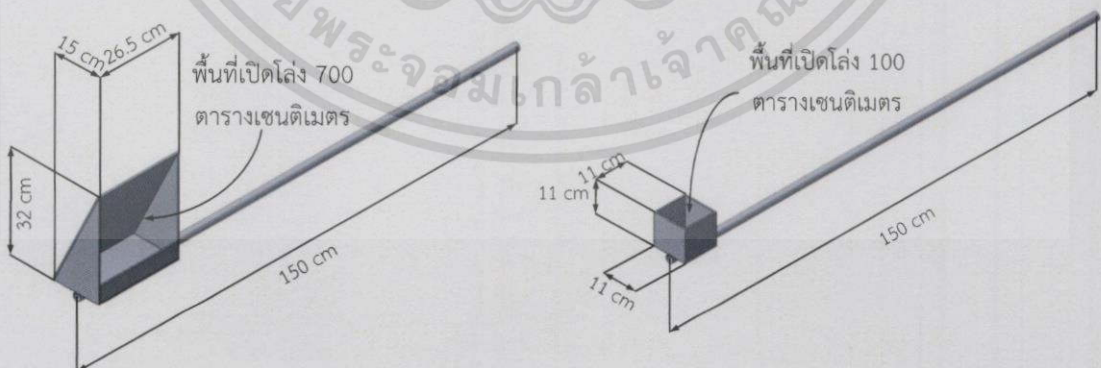
3.8 การออกแบบถังเก็บน้ำที่ใช้ในการทดสอบ

ชุดทดสอบ 1 ชุด ประกอบด้วยหัวพ่นน้ำจำนวน 30 หัว ซึ่งแต่ละหัวพ่นมีอัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 0.682 ลิตรต่อนาที หรือประมาณ 0.7 ลิตรต่อนาที ดังนั้นใน 1 ชุดทดสอบจะมีอัตราการไหลของน้ำ เท่ากับ 21 ลิตรต่อนาที ในการทดสอบแบ่งเวลาออกเป็นสองช่วงคือ ช่วงแรก การทำให้วัตถุทดสอบเปียก ระยะเวลาในช่วงนี้คือ 15 นาที และ ช่วงที่สอง การทดสอบจริง ระยะเวลาในช่วงนี้คือ 1 นาที รวมเวลาที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมดเป็น 16 นาทีต่อการทดสอบ 1 ครั้ง

ออกแบบให้ถังเก็บน้ำเมื่อมีน้ำเต็มถึงสามารถทดสอบได้ 1 ครั้ง และรวมเวลาที่ใช้ในการทำวัตถุทดสอบเปียกและการทดสอบรวม 16 นาที จะมีการใช้น้ำในการทดสอบทั้งหมด 336 ลิตร จึงเลือกถังน้ำขนาด 115 ลิตร จำนวน 3 ถังเพื่อใช้เก็บน้ำที่ใช้ในการทดสอบ และถังน้ำทั้งหมดต้องมีฝาปิดเพื่อป้องกันการเปื้อนจากฝุ่น หรือละออง จากภายนอก ซึ่งจะส่งผลต่อความความนำไฟฟ้าของน้ำ

3.9 การออกแบบภาชนะเก็บตัวอย่างน้ำ

จากหัวข้อ 2.2.3 ทำให้ทราบแนวทางการออกแบบภาชนะเก็บน้ำตัวอย่าง โดยแยกการออกแบบออกเป็น 2 ชั้น คือภาชนะเก็บน้ำในแนวตั้ง และภาชนะเก็บน้ำในแนวราบ โดยให้ภาชนะเก็บน้ำในแนวตั้งมีลักษณะเป็นกล่องลูกบาศก์มีพื้นที่เปิดโล่งด้านบน 100 ตารางเซนติเมตร และภาชนะเก็บน้ำแนวราบมีลักษณะเป็นกล่องสามเหลี่ยมมีพื้นที่เปิดโล่งด้านหน้าเท่ากับ 700 ตารางเซนติเมตร ตามมาตรฐาน โดยภาชนะทั้งคู่ใช้อะคริลิกหนา 5 มิลลิเมตรประกอบเป็นด้านด้วยน้ำยาประสานและกาวยางและต่อเข้ากับด้ามสแตนเลสยาว 1.5 เมตร

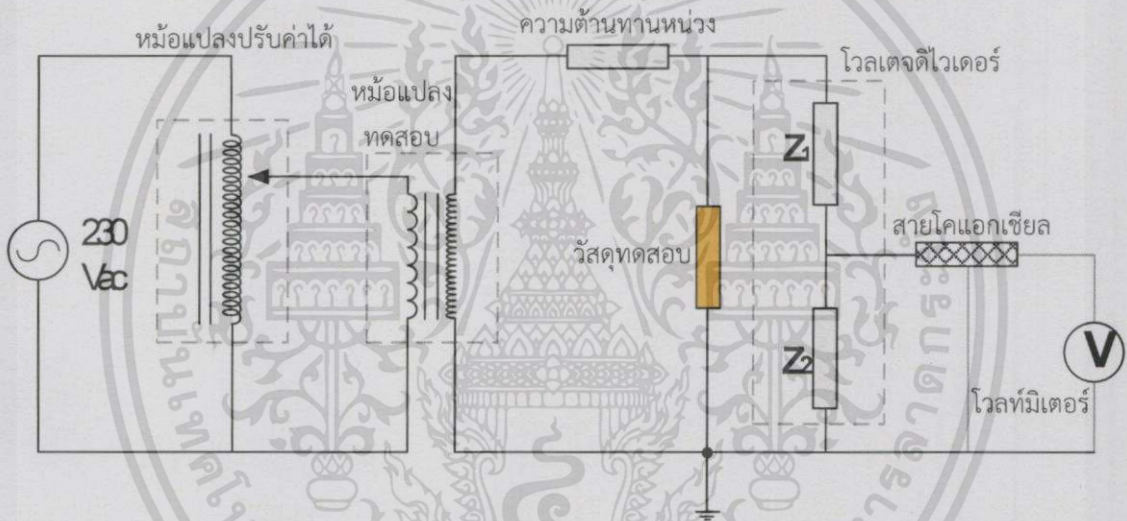


รูปที่ 3.12 การออกแบบภาชนะสะสมน้ำในแนวราบ (ซ้าย) และในแนวตั้ง (ขวา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.10 การออกแบบวงจรทดสอบ

จากการที่มาตรฐานกำหนดขนาดของแรงดันทดสอบเป็นแรงดันสูง ทำให้ต้องมีการออกแบบวงจรทดสอบที่เหมาะสมและปลอดภัยต่อผู้ทดสอบ และอุปกรณ์ โดยวงจรที่ทำการออกแบบจะให้มีลักษณะเป็นไปตามรูปที่ 3.13 โดยวงจรรับแรงดันไฟฟ้าขนาด 230 Vac จากระบบไฟฟ้าแรงต่ำ จากนั้นผ่านหม้อแปลงปรับค่าได้เพื่อให้สามารถปรับขนาดแรงดันได้ตั้งแต่ 0 ถึง 230 Vac แล้วจึงต่อเข้ากับหม้อแปลงแรงดันสูงเพื่อแปลงแรงดันต่ำเป็นแรงดันสูงให้ขนาดแรงดันเหมาะสมกับการทดสอบ และสามารถปรับค่าได้ ซึ่งก่อนที่จะเข้าวัสดุทดสอบจะต้องผ่านความต้านทานหน่วงกระแสก่อนเพื่อป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดการลัดวงจรหรือเบรคดาวร์ ส่วนอุปกรณ์การวัดจะนำมาต่อคร่อมกับวัสดุทดสอบเพื่อวัดแรงดันที่ตกคร่อมวัสดุทดสอบโดยประกอบไปด้วยโวลต์เตจตีไวเดอร์ที่ต่อเข้ากับโวลต์มิเตอร์ผ่านสายโคแอกเซียลซึ่งตลอดสายมีชิลด์เป็นโลหะต่อลงดินบ้างกันสัญญาณรบกวนตลอดแนวสาย

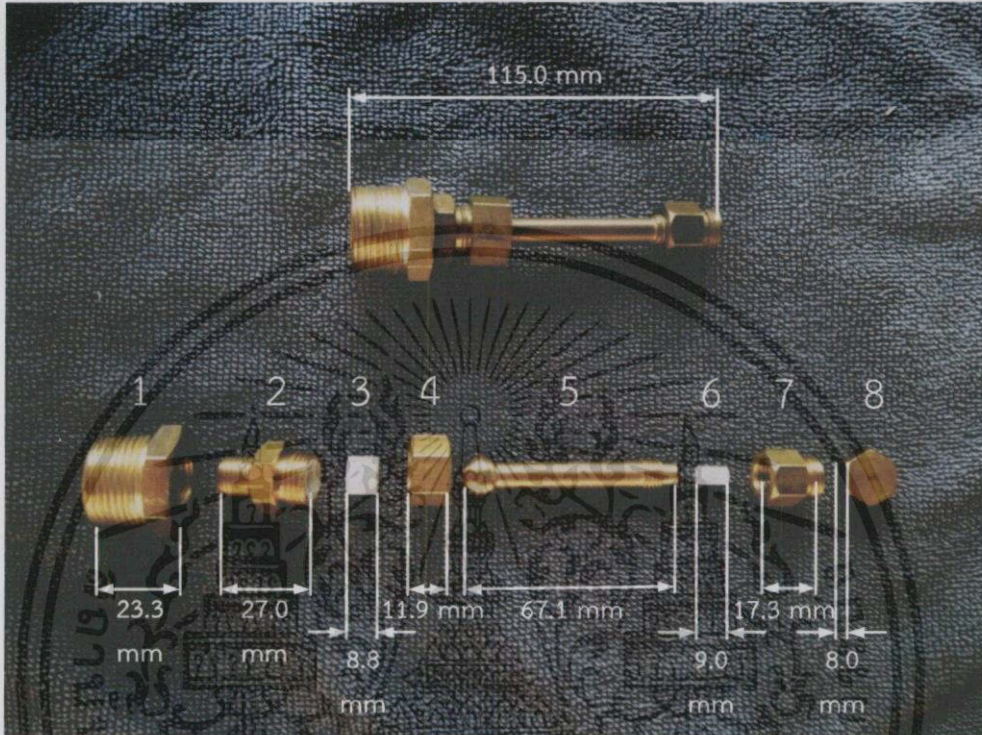


รูปที่ 3.13 การออกแบบวงจรทดสอบความคงทนต่อแรงดันในสถานะเป็ยก

3.11 การประกอบสร้างชุดทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันในสภาวะเปือก

ในชุดทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันในสภาวะเปือกจะประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก คือ หัวพ่นน้ำ แนวหัวพ่นน้ำ ถังเก็บน้ำและปั้ม และภาชนะเก็บน้ำตัวอย่าง

จากการออกแบบหัวพ่นน้ำ (หัวข้อที่ 3.2) ได้ทำการจัดจ้างทำและประกอบสร้างหัวพ่นน้ำด้วยวัสดุที่ออกแบบไว้ (ทองเหลืองและซูเปอร์สตีล)



รูปที่ 3.14 ส่วนหัวพ่นน้ำทองเหลืองและระยะต่างๆ

จากการออกแบบแนวหัวพ่นน้ำ (หัวข้อที่ 3.3) ได้ทำการประกอบสร้างโดยใช้ท่อและข้อต่อ PVC จากนั้นยึดเข้ากับเหล็กฉากด้วยยูโบลต์ โดยใช้ขนาดตามที่ออกแบบไว้

3 ส่วนที่ถูกแก้ไขจากแบบที่ออกแบบไว้คือ ปรับลดระยะท่อส่งน้ำเข้าแนวหัวพ่นน้ำให้สั้นลง, นำก๊อมน้ำใส่แทนเกจวัดความดันเพื่อใช้ระบายน้ำที่ค้างในแนวท่อออก และลดจำนวนหัวพ่นน้ำจาก 30 หัวเป็น 6 หัวในแนวครึ่งบน



รูปที่ 3.15 แนวหัวพ่นน้ำยึดกับเหล็กฉากรับแรงโดยแขวนบนนั่งร้านด้วยยูโบลต์, ระยะต่างๆ และจุดแก้ไข(วงกลมสีแดง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 แนวหัวพ่นน้ำยึดกับเหล็กฉากรับแรงโดยแขวนบนนั่งร้านด้วยยูโบลต์แนวเฉียง

จากการคำนวณขนาดของถังเก็บน้ำและปั๊ม (หัวข้อที่ 3.6 และ 3.7 ตามลำดับ) ถังเก็บน้ำและปั๊มที่ใช้จึงมีพิกัดดังนี้ (ถึงแม้ว่าในการทดสอบจริงจะไม่ได้ใช้หัวพ่นน้ำถึง 30 หัว แต่ขนาดถังก็ยังสามารถครอบคลุมการทดสอบหลายๆครั้งได้)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

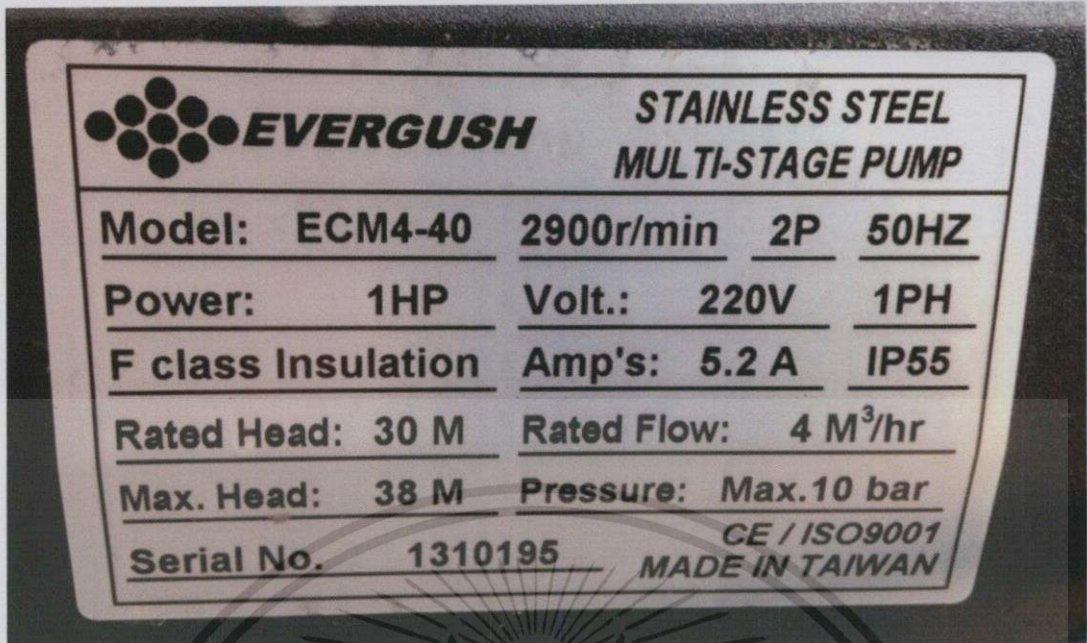


รูปที่ 3.17 ถังเก็บน้ำขนาด 100 ลิตร จำนวน 3 ถัง



รูปที่ 3.18 ป้มน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 Nameplate ของปั๊มน้ำที่เลือกใช้

จากการออกแบบภาชนะเก็บน้ำตัวอย่างที่สามารถอ้างอิงได้จากหัวข้อ 3.8 สามารถประกอบสร้างตามทีออกแบบไว้ ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.20 และ 3.21



รูปที่ 3.20 ภาชนะเก็บน้ำตัวอย่างในแนวตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 ภาพขณะเก็บน้ำตัวอย่างในแนวราบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดสอบและผลการทดสอบ

4.1 การทดสอบผสมน้ำเพื่อใช้ในการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันในสภาวะเป็ยก

เนื่องจากน้ำที่ใช้ในการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันในสภาวะเป็ยกต้องมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด โดยมาตรฐานที่นำมาใช้อ้างอิงคือ IEEE std 4 [1] และ IEC 60060-1 [2] ซึ่งกำหนดค่าความนำไฟฟ้ามาอยู่ในช่วง 85 – 115 $\mu\text{S}/\text{cm}$ จึงต้องมีการทดลองสร้างน้ำที่มีค่าความนำไฟฟ้าอยู่ในช่วงที่มาตรฐานกำหนด

ในการทดสอบนี้จะเปรียบเทียบค่าความนำไฟฟ้าของน้ำที่ผ่านกระบวนการกรองรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) ปริมาณ 100 ลิตร และน้ำที่ผ่านกระบวนการกรองเอาประจุออก (Deionisation) ปริมาณ 100 ลิตร โดยนำน้ำแต่ละชนิดมาผสมเข้ากับเกลือแกง (Sodium chloride) ที่ปริมาณต่างๆ ซึ่งได้ความสัมพันธ์เป็นไปตามตารางต่อไปนี้

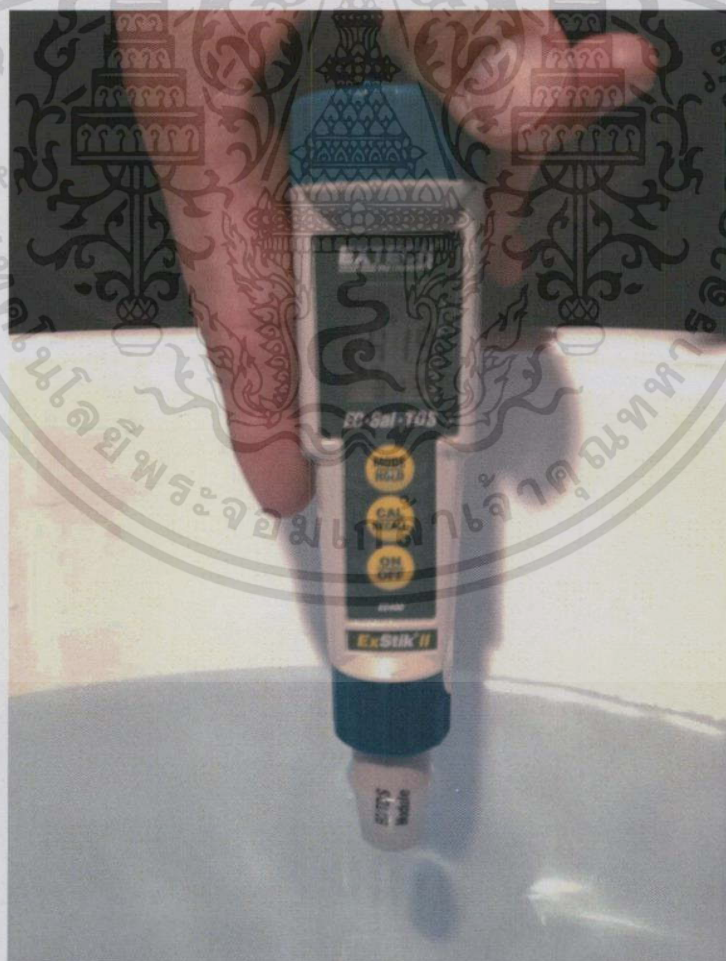
ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของค่าความนำไฟฟ้าของน้ำที่ผ่านกระบวนการกรองรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) และน้ำที่ผ่านกระบวนการกรองเอาประจุออก (Deionization) ปริมาณ 100 ลิตร ($\mu\text{S}/\text{cm}$) และปริมาตรเกลือ (cc)

ปริมาณเกลือ (cc)	ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำที่ผ่านกระบวนการกรองรีเวอร์สออสโมซิส ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำที่ผ่านกระบวนการกรองเอาประจุออก ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
0	4.3	0.0
2	42.3	41.9
3	63.0	61.1
4	81.9	83.2
5	102.6	100.0
6	122.4	127.4

จากตารางแสดงความสัมพันธ์ข้างต้น ทำให้ในการทดสอบนี้เลือกใช้อัตราส่วนเกลือ 5 cc ต่อน้ำที่ผ่านการกรองรีเวอร์สออสโมซิสปริมาณ 100 ลิตร เพื่อให้ได้ค่าความนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 85 -115 $\mu\text{S}/\text{cm}$



รูปที่ 4.1 การทดสอบผสมน้ำปริมาณ 100 ลิตร กับเกลือปริมาณต่างๆ



รูปที่ 4.2 การวัดค่าความนำไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การติดตั้งชุดทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันในสภาวะเปียก

เนื่องจากการติดตั้งทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันในสภาวะเปียกต้องมีการคำนึงถึงคุณสมบัติของหยดน้ำที่มาตรฐานกำหนด ข้อบังคับอื่นๆ ของมาตรฐาน และความปลอดภัย ดังนั้นจึงแบ่งการติดตั้งออกเป็น การติดตั้งแนวหัวพ่นน้ำ การติดตั้งวงจรถดสอบ

4.2.1 การติดตั้งแนวหัวพ่นน้ำ

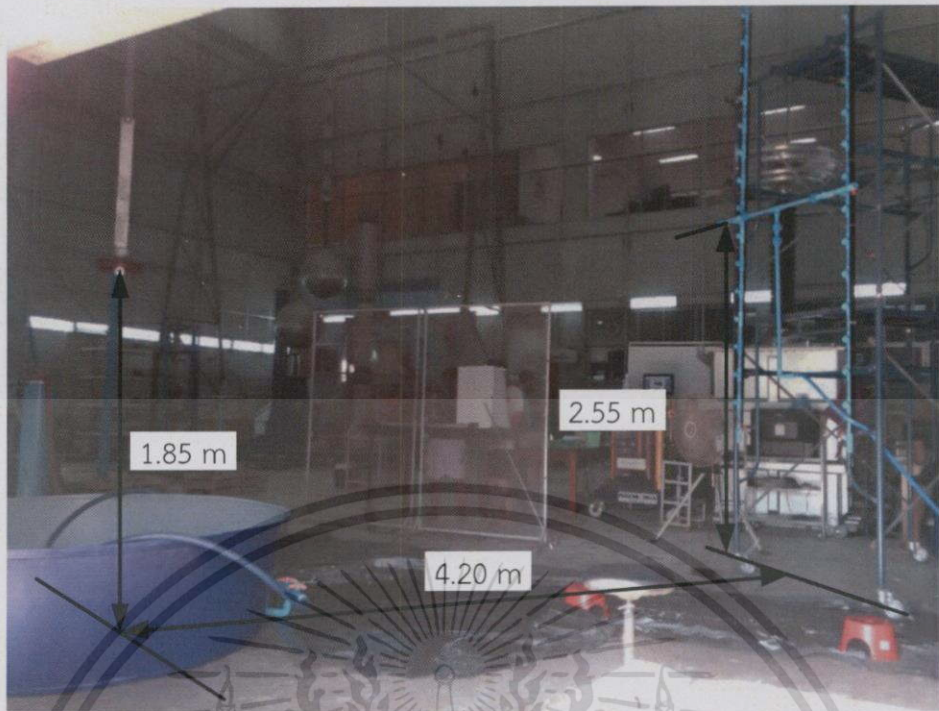
เนื่องจากมีข้อกำหนดจากมาตรฐานในหัวข้อคุณสมบัติของหยดน้ำ (หัวข้อที่ 2.2) จึงต้องมีการทดสอบรูปแบบการติดตั้งที่ออกแบบขึ้นว่าสามารถทำให้คุณสมบัติของหยดน้ำที่พ่นออกมาเป็นไปตามมาตรฐานดังกล่าวหรือไม่

ในการทดสอบนี้จะติดตั้งแนวหัวพ่นน้ำตามที่ออกแบบไว้ (หัวข้อที่ 3.5) แล้วทดสอบอัตราการหยดของหยดน้ำ (mm/min) ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำที่ตกกระทบวัตถุทดสอบ และอุณหภูมิ โดยจะเก็บตัวอย่างด้วยภาชนะเก็บตัวอย่างที่ได้ออกแบบไว้ (หัวข้อที่ 3.8) เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นนำมาทำการวัดปริมาณ อุณหภูมิ และค่าความนำไฟฟ้า ซึ่งจะทำการเก็บตัวอย่างทั้งสิ้น 6 ครั้ง

ตารางที่ 4.2 อัตราการหยดของหยดน้ำในแนวตั้งและราบ (mm/min) ,อุณหภูมิ (°C) และค่าความนำไฟฟ้าจากภาชนะเก็บตัวอย่าง (µS/cm)

ครั้งที่	อัตราการหยดของหยดน้ำ (mm/min)		อุณหภูมิ (°C)	ค่าความนำไฟฟ้า (µS/cm)
	แนวตั้ง	แนวราบ		
ค่าจากมาตรฐาน	1.0 - 2.0	1.0 - 2.0	5 - 35	85 - 115
1	1.2	1.6	29.0	99.4
2	1.2	1.7	28.6	100.6
3	1.3	1.6	30.2	99.8
4	1.2	1.6	29.2	98.9
5	1.1	1.7	30.1	101.4
6	1.1	1.6	30.3	100.5

จากตารางข้างต้น แสดงให้เห็นว่ารูปแบบการติดตั้งแนวหัวพ่นน้ำที่ออกแบบสามารถทำให้คุณสมบัติที่พ่นออกมาเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด [1,2]



รูปที่ 4.3 การติดตั้งแนวหัวฉีด, ลูกถ้วย และระยะต่างๆ



รูปที่ 4.4 การติดตั้งถังน้ำและปั๊ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 การเก็บตัวอย่างน้ำที่ตกกระทบในแนวตั้ง

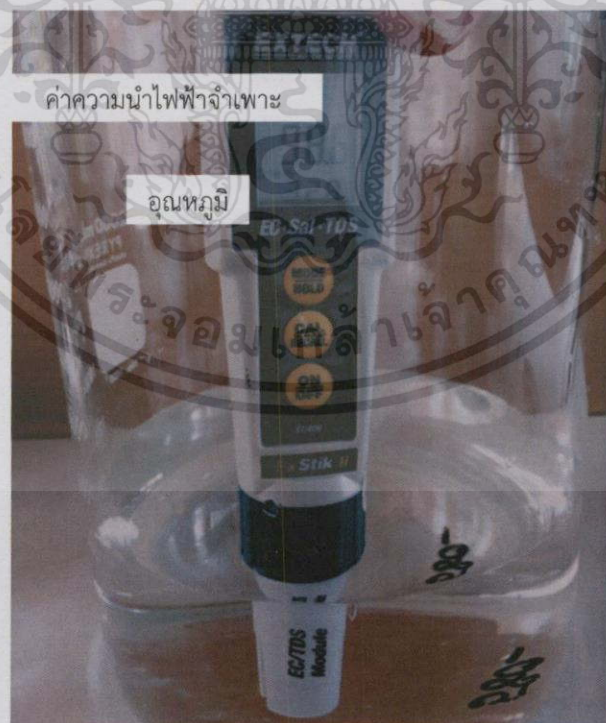


รูปที่ 4.6 การเก็บตัวอย่างน้ำที่ตกกระทบในแนวราบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 การวัดปริมาณน้ำเพื่อหาอัตราการหยดของหยดน้ำ



รูปที่ 4.8 การวัดค่าความนำไฟฟ้าและอุณหภูมิ

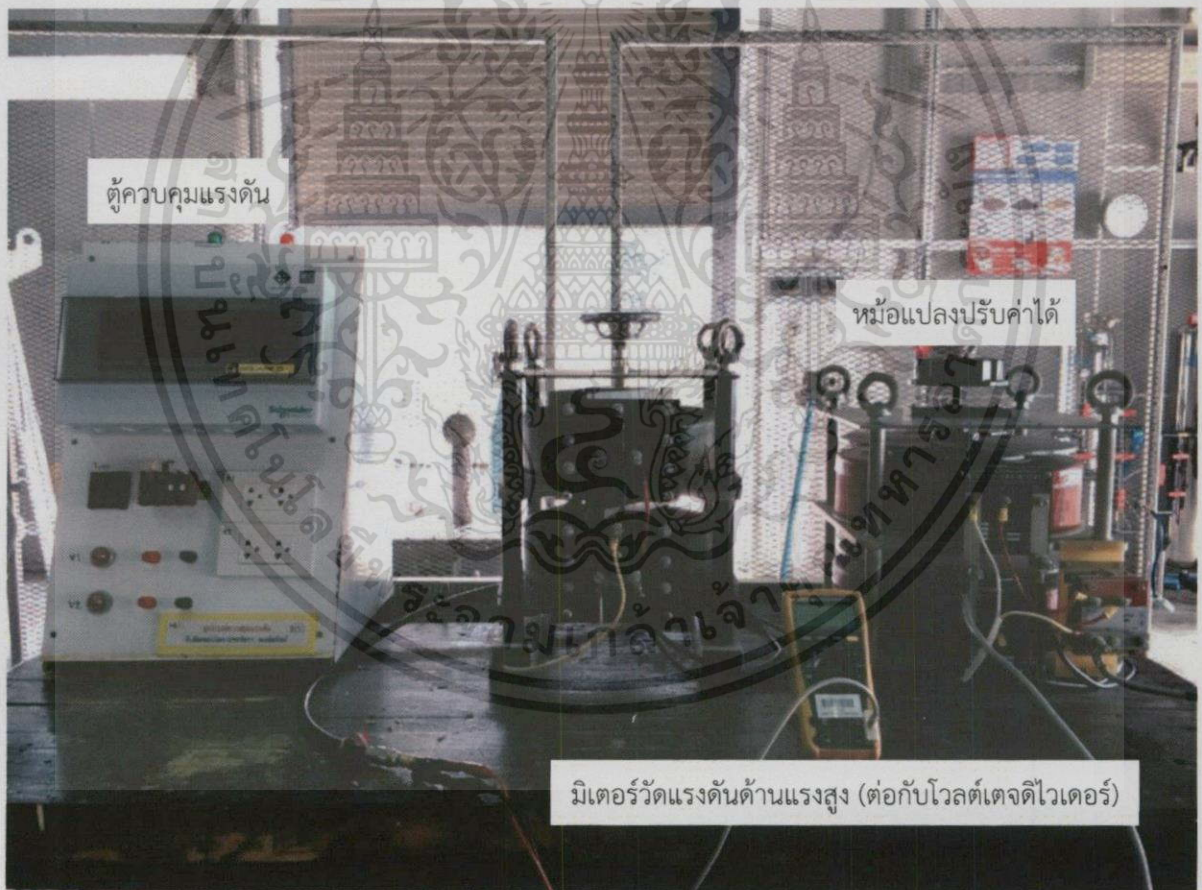
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การติดตั้งวงจรทดสอบและวัสดุทดสอบ

เพื่อความถูกต้อง และความปลอดภัยในการทดสอบ การติดตั้งวงจรการทดสอบและวัสดุทดสอบควรคำนึงมาตรฐานและมาตรการความปลอดภัยต่างๆ (หัวข้อที่ 2.2.6) จึงทำการติดตั้งตามทีออกแบบไว้ (หัวข้อที่ 3.4 และ 3.9) โดยอุปกรณ์ต่างๆมีพิกัดดังนี้

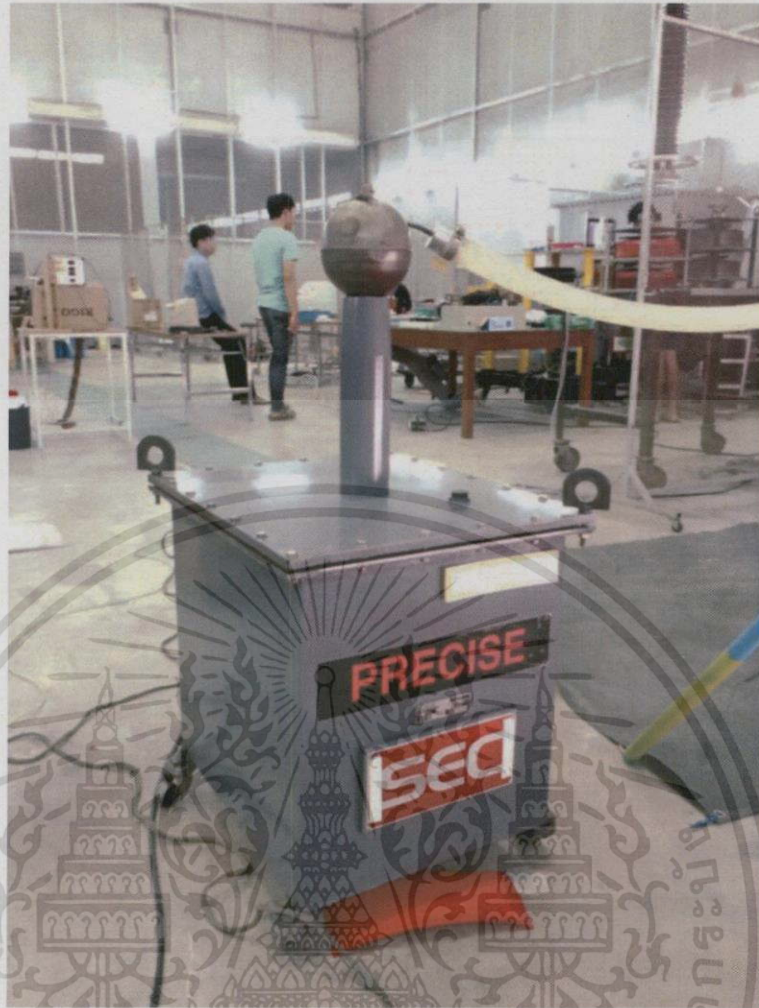
ตารางที่ 4.3 ค่าพิกัดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

	หม้อแปลงทดสอบ	หม้อแปลงปรับค่าได้
พิกัดกำลัง	5000 VA	3500 VA
พิกัดแรงดัน	220 V / 100 kV 50Hz	220 V / 0-220 V 50Hz
พิกัดกระแส	23 A / 50 mA	32 A

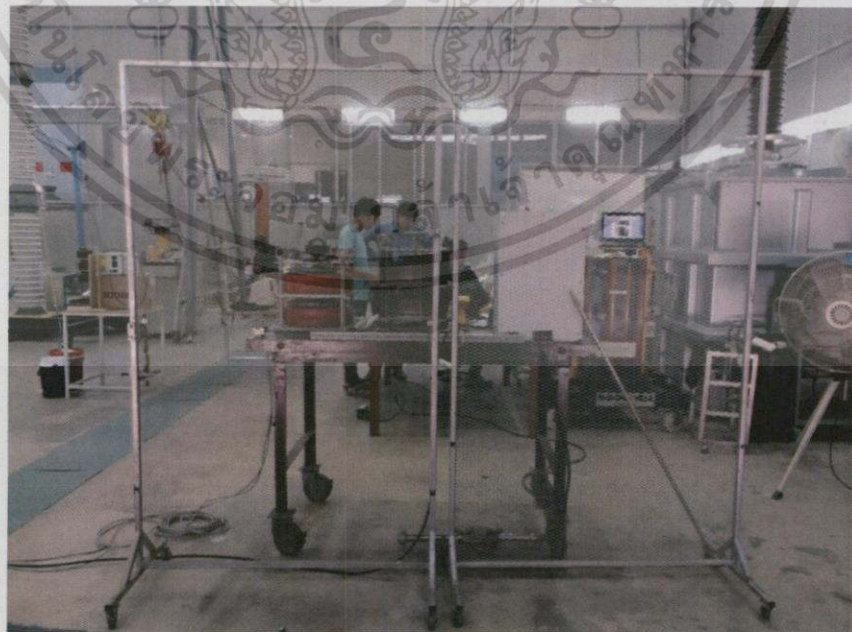


รูปที่ 4.9 อุปกรณ์ด้านแรงต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

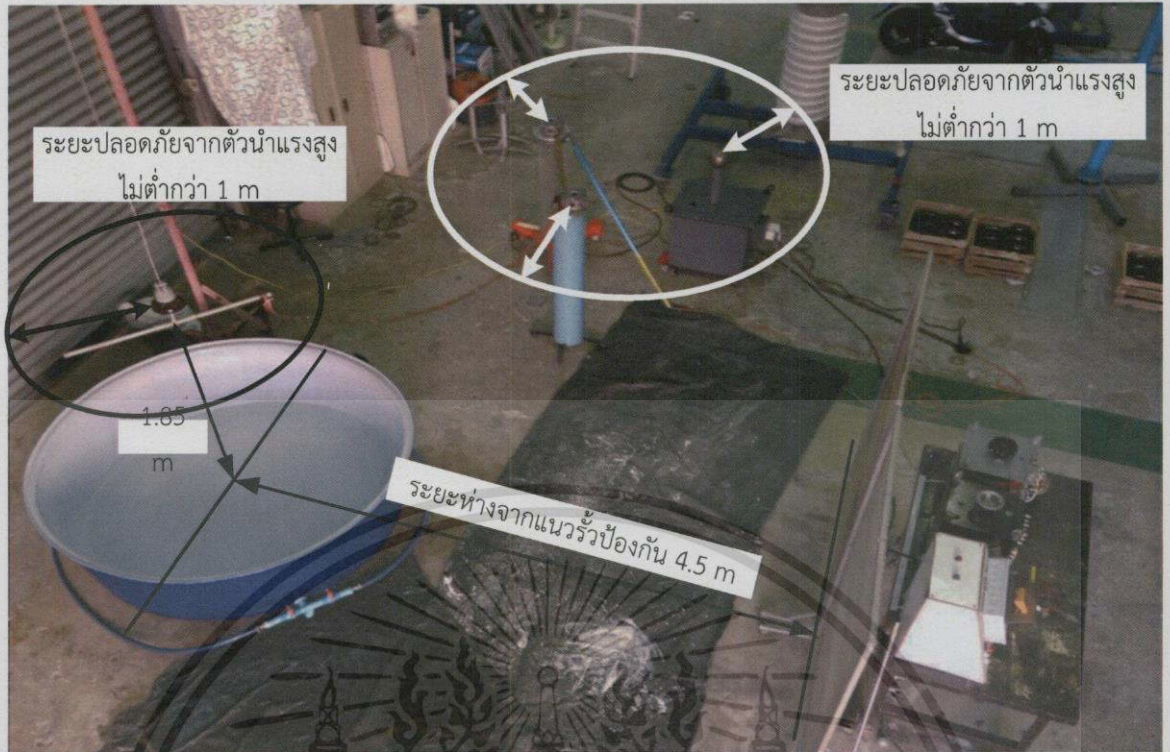


รูปที่ 4.10 หม้อแปลงทดสอบ

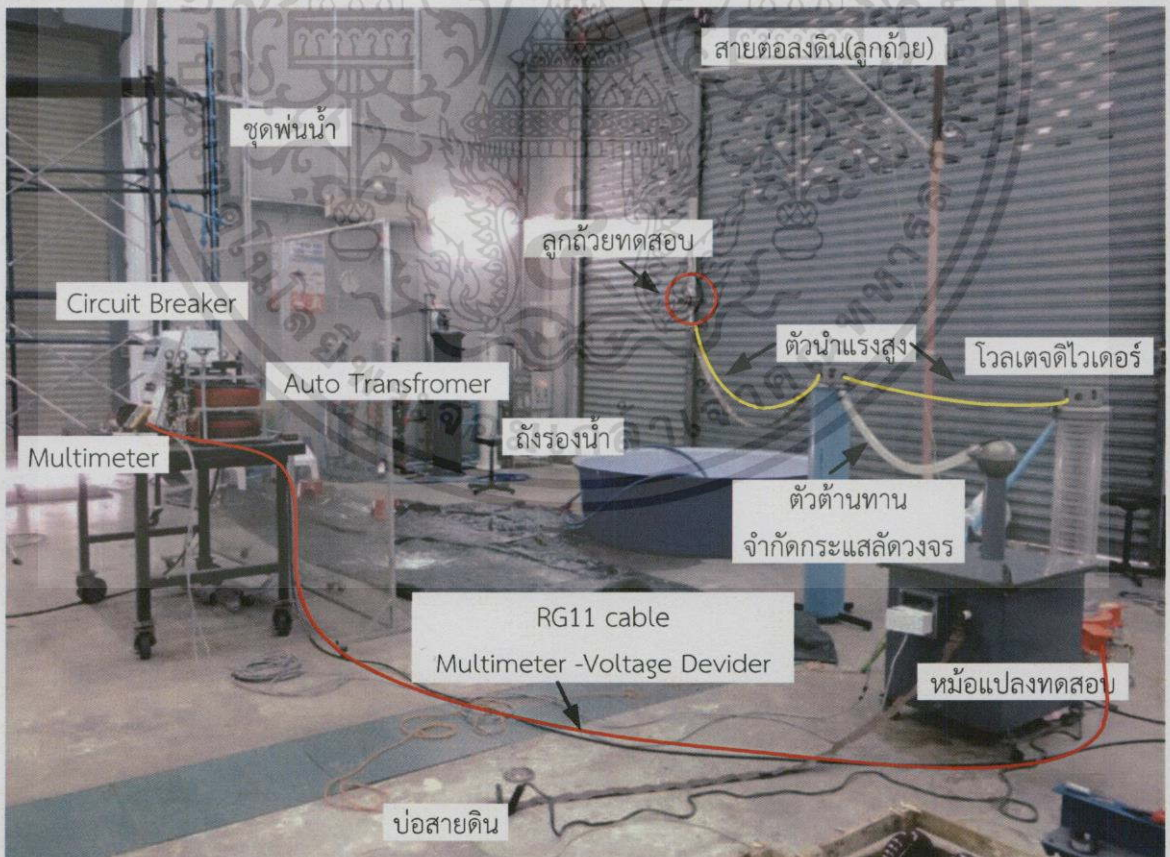


รูปที่ 4.11 รั้วป้องกันผู้ทดสอบจากอันตรายด้านแรงสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

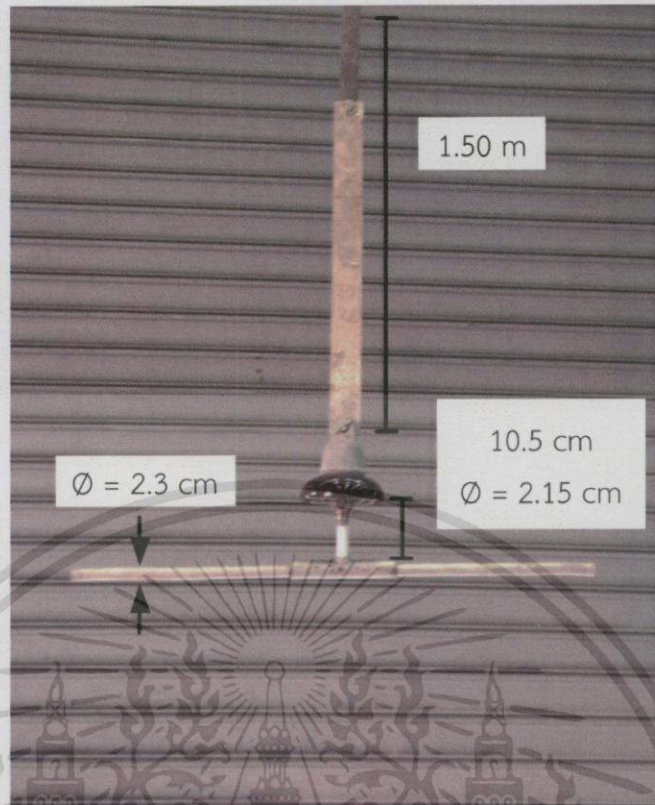


รูปที่ 4.12 ระยะปลอดภัยด้านแรงสูง

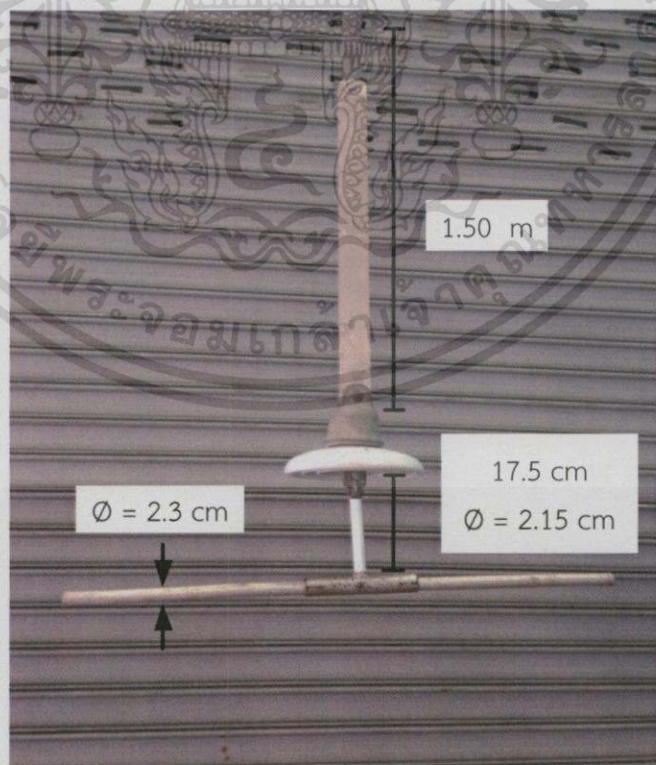


รูปที่ 4.13 การติดตั้งวงจรทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 การติดตั้งลูกถ้วย 52-1



รูปที่ 4.15 การติดตั้งลูกถ้วย 52-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ป่อสายดิน

4.3 ขั้นตอนการทดสอบภายใต้สภาวะเปียก

เมื่อทำการติดตั้งวงจรทดสอบและวัตถุทดสอบ (หัวข้อ 4.2) เรียบร้อยแล้วสามารถเริ่มการทดสอบได้ทันที โดยปฏิบัติตามนี้

1. ควรมีผู้ทดสอบมากกว่า 2 คนขึ้นไป เพื่อความปลอดภัยในการทดสอบ โดยแบ่งหน้าที่ในการติดตั้งวงจรไฟฟ้าในกรณีที่เกิดอุบัติเหตุให้ชัดเจน
2. ทำให้วัตถุทดสอบเปียกเป็นเวลา 15 นาที โดยการพ่นน้ำตามมาตรฐานไปยังวัตถุทดสอบ
3. เมื่อครบ 15 นาทีแล้วผู้ทดสอบสามารถขึ้นแรงดันไฟฟ้าได้ทันที
4. ให้สัญญาณเสียงและแสงก่อนการขึ้นแรงดัน
5. เปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์หลักและย่อย เปิดมิเตอร์เลือกแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
6. ใช้แรงดันทดสอบตามมาตรฐาน มอก.354-2523 [4] หมุนหม้อแปลงอัตโนมัติเพื่อขึ้นแรงดันไฟฟ้า ควรขึ้นแรงดันอย่างช้าๆ จนถึงแรงดันทดสอบที่กำหนด โดยลูกถ้วย 52-1 ทดสอบที่แรงดันไฟฟ้า 30 kV และ ลูกถ้วย 52-4 ทดสอบที่แรงดันไฟฟ้า 50 kV
7. เมื่อแรงดันไฟฟ้าถึงค่าทดสอบแล้วให้หยุดการขึ้นแรงดันไฟฟ้าและจับเวลา 1 นาที
8. สังเกตและบันทึกผล
9. เมื่อครบ 1 นาทีแล้ว ให้ลดแรงดันจนมีค่าเป็น 0 ทันทีและปิดการทำงานของวงจรไฟฟ้าทั้งหมด และใช้ไม้กราวด์สัมผัสบริเวณตัวนำแรงสูง

หมายเหตุ ในระหว่างการขึ้นแรงดันไฟฟ้า หากเกิดการแฟลชโอเวอร์หรือแรงดันไฟฟ้าตกลงอย่างเห็นได้ชัด ให้ทำการตัดวงจรไฟฟ้าทันที

4.4 ผลการทดสอบ

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบลูกถ้วยขนาด 52-1 ที่แรงดันไฟฟ้า 30 kV

ครั้งที่	แรงดันทดสอบ (kV)	แรงดันเริ่มเกิดโคโรน่า (kV)	การเกิดวาบไฟตามผิว
1	30.54	22.87	ไม่เกิด
2	30.20	21.59	ไม่เกิด
3	30.35	20.41	ไม่เกิด

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบลูกถ้วยขนาด 52-4 ที่แรงดันไฟฟ้า 50 kV

ครั้งที่	แรงดันทดสอบ (kV)	แรงดันเริ่มเกิดโคโรน่า (kV)	การเกิดวาบไฟตามผิว
1	50.81	40.37	ไม่เกิด
2	50.04	39.64	ไม่เกิด
3	50.57	38.11	ไม่เกิด

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการเกิดวาบไฟตามผิวลูกถ้วย 52-1

ครั้งที่	แรงดันเริ่มเกิดโคโรน่า (kV)	แรงดันเกิดวาบไฟตามผิว (kV)	การเกิดวาบไฟตามผิว
1	22.87	35.42	เกิด
2	21.59	34.28	เกิด
3	20.41	33.73	เกิด

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบการเกิดวาบไฟตามผิวลูกถ้วย 52-4

ครั้งที่	แรงดันเริ่มเกิดโคโรน่า (kV)	แรงดันเกิดวาบไฟตามผิว (kV)	การเกิดวาบไฟตามผิว
1	50.81	54.39	เกิด
2	50.04	55.41	เกิด
3	50.07	54.36	เกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

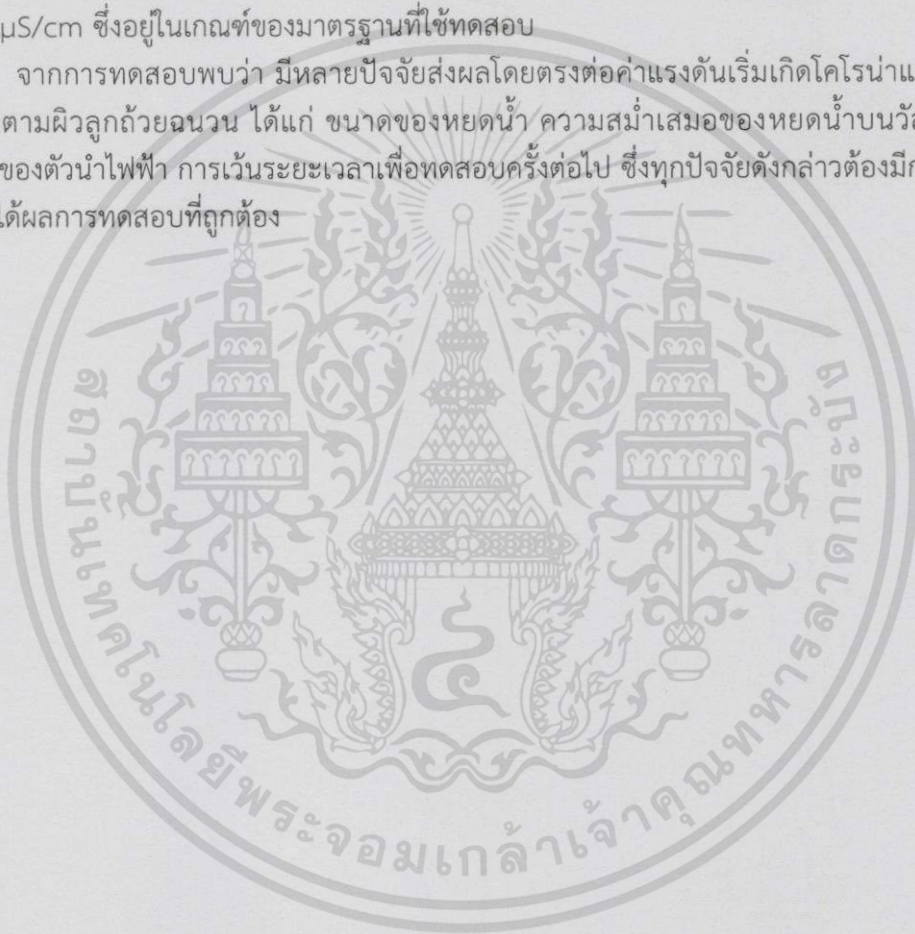
บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

ในโครงการนี้ได้ทำการออกแบบและประกอบสร้างชุดทดสอบความคงทนอยู่ต่อแรงดันกระแสสลับในสภาวะเปียกชื้นได้ตามมาตรฐาน IEC60060-1 ซึ่งจากการทดสอบลูกถ้วยฉนวนด้วยชุดทดสอบ พบว่าค่าที่ได้ออกมา นั้นแสดงให้เห็นว่าสามารถใช้ชุดทดสอบนี้ทดสอบวัตถุภายในสภาวะเปียกตามมาตรฐาน IEC60060-1 ได้ โดยมีอัตราการหยดของน้ำแนวตั้งโดยเฉลี่ย 1.8 mm/min และอัตราการหยดของน้ำแนวราบโดยเฉลี่ย 1.6 mm/min และความนำไฟฟ้าของน้ำโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 100.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ของมาตรฐานที่ใช้ทดสอบ

จากการทดสอบพบว่า มีหลายปัจจัยส่งผลโดยตรงต่อค่าแรงดันเริ่มเกิดโคโรน่าและการเกิดวาบไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวน ได้แก่ ขนาดของหยดน้ำ ความสม่ำเสมอของหยดน้ำบนวัสดุทดสอบ รูปทรงของตัวนำไฟฟ้า การเว้นระยะเวลาเพื่อทดสอบครั้งต่อไป ซึ่งทุกปัจจัยดังกล่าวต้องมีการควบคุมเพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่ถูกต้อง



5.2 อุปสรรค ข้อเสนอแนะ และแนวทางการแก้ไข

1. เนื่องการทดสอบนี้มีการพ่นน้ำพุ่งผ่านอากาศลงบนตัววัตถุทดสอบ ทำให้ลมเป็นหนึ่งในปัจจัยที่มีผลต่อการตกกระทบของหยดน้ำ ดังนั้นเพื่อให้การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานจึงควรทดสอบภายในพื้นที่ปิด ไม่มีลมพัดผ่านพื้นที่ทดสอบ

2. การติดตั้งวัตถุทดสอบส่งผลต่อสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณวัตถุ ดังนั้นเพื่อให้การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ต้องติดตั้งวัตถุทดสอบให้ถูกต้องตามมาตรฐาน [3] คือ ระยะปลอดภัย ขนาดของตัวนำ ระยะของตัวนำ ความยาวของตัวนำ เป็นต้น

3. ในการทดสอบลูกถ้วยแขวนภายในสภาวะเปียก ควรติดตั้งให้แนวลูกถ้วยตั้งกับพื้นมากที่สุด ไม่เอียงไปทางใดทางหนึ่ง เนื่องจากเมื่อหยดน้ำตกกระทบลงลูกถ้วยที่เอียงแล้วจะไหลไปรวมอยู่ที่จุดต่ำสุดทำให้เกิดการไหลของน้ำเป็นสายตกลงสู่เบื้องล่าง สายน้ำนั้นอาจไหลผ่านบริเวณสายตัวนำหรือบริเวณใกล้เคียงทำให้โอกาสการเกิดการวาบไฟตามผิว (แฟลชโอเวอร์) ที่แรงดันต่ำเพิ่มสูงขึ้น

4. ความไม่สม่ำเสมอของหยดน้ำบนวัสดุทดสอบทำให้เกิดบริเวณบนวัสดุทดสอบที่มีลักษณะเปียกมากและน้อยต่างกัน จะมีผลเมื่อแรงดันถึงค่าวิกฤติแล้วเกิดการอาร์คขึ้น ถ้าอาร์คจะเกิดขึ้นในบริเวณที่เปียกมากกว่าบริเวณที่เปียกน้อยกว่า

5. หากตัวนำไฟฟ้าที่ใช้ต่อลูกถ้วยกับหม้อแปลงด้านแรงดันสูงมีขอบคมมาก จะส่งผลให้ค่าแรงดันเริ่มเกิดโคโรน่าน้อยลง แล้วจะนำไปสู่การเกิดการวาบไฟตามผิวที่สมบูรณ์เร็วขึ้น นอกจากนี้ระยะห่างและความยาวของขั้วไฟฟ้าก็มีผลเช่นกัน เช่น ถ้าระยะระหว่างแท่งที่ต่อกับตัวนำที่มาจากหม้อแปลงด้านแรงดันสูงกับจุดต่ำสุดของเนื้องนวนของลูกถ้วยมีค่าน้อยกว่ามาตรฐาน จะทำให้เกิดการแฟลชโอเวอร์ตามสายน้ำที่หยดลงจากลูกถ้วยได้ง่ายกว่าระยะตามมาตรฐาน

6. การเว้นระยะเวลาเพื่อทดสอบครั้งต่อไป ต้องมีการเว้นระยะเวลาหลังจากการทำการทดสอบเสร็จก่อนทำการทดสอบครั้งต่อไปเพื่อให้มีการหมุนเวียนอากาศรอบๆ วัสดุทดสอบที่เกิดการแตกตัวเนื่องจากการเกิดโคโรน่านอกไป ซึ่งอากาศที่เกิดการแตกตัวนี้จะส่งผลต่อค่าแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา

เอกสารอ้างอิง

- [1] IEEE Std 4TM-2013, Standard for High-Voltage Testing Techniques
- [2] IEC 60060-1, Edition 3.0 - 2010, High-voltage test techniques---Part 1:General definitions and test requirement
- [3] ANSI C29.1-1988, for electrical power insulators – test methods
- [4] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, “ลูกถ้วยแขวน : ปอร์ซเลน,” มาตรฐานเลขที่ มอก. 354 – 2523
- [5] ผศ.ดร. นรเศรษฐ์ พัฒนเดช, “วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า เล่ม 1 : ฉนวนและวัสดุฉนวนไฟฟ้า,” คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [6] ANSI C29.8-1985, for Insulators - Wet-Process Porcelain – apparatus, cap and pin Type
- [7] ANSI C29.2-1992, for Insulators - Wet-Process Porcelain and Toughened Glass - Suspension Type
- [8] PURETEC Industrial Water, *What is Deionized Water?*. 2557. (ออนไลน์). แหล่งที่มา : <http://puretecwater.com/what-is-deionized-water.html>. 24 ตุลาคม 2557
- [9] ASTM D 1193 - 91, Standard Specification for Reagent Water
- [10] ASTM D 5127-99, Electronics and Semiconductor Grade Water
- [11] NCCLS – C3 - A3, Edition 3 - 1988, Preparation and Testing of Reagent Water in the Clinical Laboratory G
- [12] CAP, GEN 41500, 2007, QUALITY OF WATER AND GLASSWARE WASHIN



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบชุดทดลองสร้างชุดทดสอบความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับในสภาวะเปียก

Design and Construction of AC withstand voltage test under wet condition

ธนพัฒน์ อ่ำแจ่ม ธนวิทย์ ศิริวรรณกุล และ ชีรพัฒน์ วิริยะชนพัฒน์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย ฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 E-Mail: prasopchok_ho@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและประกอบสร้างชุดทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันกระแสสลับภายในสภาวะเปียก โดยชุดทดสอบจะประกอบด้วย ชุดสร้างน้ำปราศจากประจุ ชุดจำลองฝนเทียม และแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ โดยการออกแบบชุดทดสอบนี้จะอ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบ มอก.354-2523, IEC 60060-1, IEEE Std. 4 และ ANSI C29.2 เพื่อเป็นการยืนยันความสามารถในการทดสอบของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นซึ่งได้ทำการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันกระแสสลับภายในสภาวะเปียกของอุปกรณ์ทดสอบ คือ ถูกด้วยฉนวน 2 ชนิด ที่ผ่านการทดสอบจากผู้ผลิตและได้รับการรับรองจากมาตรฐานแล้ว จากการทดสอบพบว่าชุดด้วยฉนวนสามารถผ่านการทดสอบด้วยชุดทดสอบที่ออกแบบและประกอบสร้างขึ้น ซึ่งการทดสอบทั้งหมดนี้สามารถสรุปได้ว่าชุดทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันกระแสสลับภายในสภาวะเปียกชุดนี้สามารถทำการทดสอบได้ตามมาตรฐาน

คำสำคัญ การทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันในสภาวะเปียก, น้ำปราศจากประจุ, ชุดด้วยฉนวน

Abstract

This project presents design and construct of an AC withstand voltage test system under wet condition. This system consists of a deionized water filter, an artificial rain spray and an AC voltage source. The design and construction are based on TIS.354-2523, IEC 60060-1, IEEE Std. 4 and ANSI C29.2 standard. To confirm the testing ability of the developed system, the testing system was used in the AC voltage withstand test on the certificated ANSI class 52-1 and ANSI class 52-4 insulators under the wet condition. From the experimental results, the developed system can utilize well for the AC voltage withstand test under the wet condition. It can be concluded that developed stem can employ well in AC voltage withstand and flashover voltage tests according to the standard requirement.

Keyword AC withstand voltage test under wet condition, Deionization water, insulators

1. บทนำ

ในปัจจุบันระบบไฟฟ้าแรงสูงถูกใช้ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าทั่วโลก โดยถูกถ่ายที่ติดตั้งและใช้งานในระบบนี้จะถูกใช้ในการยึดโยงหรือรับแรงทางกล และใช้เป็นฉนวน ทำให้ต้องมีการทดสอบก่อนนำไปติดตั้งจริงเพื่อเป็นการยืนยันว่าเมื่อติดตั้งแล้วระบบที่ใช้อุปกรณ์นั้นๆจะไม่มีปัญหาเกิดขึ้น การทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันกระแสสลับภายในสภาวะเปียกก็เป็นหนึ่งในการทดสอบที่ต้องทำกับอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าแรงสูง ในโครงการนี้จึงได้ทำการออกแบบและประกอบสร้างชุดค้นแบบชุดทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันในสภาวะเปียก โดยอ้างอิงตามมาตรฐานต่างๆ กำหนดเพื่อนำไปใช้ในการทดสอบและการวิจัยในทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง อีกทั้งยังเป็นการลดการนำเข้าจากต่างประเทศและเพิ่มศักยภาพให้กับห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ต่อไป

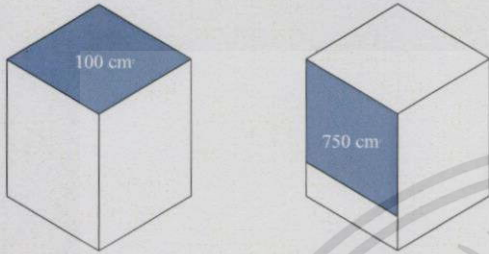
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 มาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

เพื่อให้การทดสอบและผลจากการทดสอบมีความถูกต้องและยอมรับได้จึงใช้มาตรฐานในการกำหนดเงื่อนไขต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ โดยมาตรฐานที่ใช้ในกำหนดนั้นจะมีด้วยกัน 4 มาตรฐานด้วยกัน คือ IEC 60060-1, IEEE Std.4, ANSI C29.1 และ มอก. โดยหัวข้อที่มาตรฐานเหล่านี้กำหนดเงื่อนไขของน้ำที่ใช้ในการทดสอบโดยถูกระบุไว้ในตารางที่ 1 ซึ่งค่าในตารางจะถูกวัดจากน้ำที่ถูกเก็บตัวอย่างจากภาชนะที่มีคุณสมบัติตามมาตรฐานคือ ภาชนะสะสมน้ำจะถูกแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ เป็นภาชนะที่เปิดผานในแนวราบเป็นพื้นที่ 100 ตารางเซนติเมตร และภาชนะที่เปิดผานในแนวตั้งเป็นพื้นที่ 750 ตารางเซนติเมตร (โดยในขณะที่วัดให้หันด้านที่เปิดเข้าหากิการพน) ดังรูปที่ 1 โดยการเก็บตัวอย่างน้ำจะทำในช่วงก่อนการทดสอบ หรือในระหว่างช่วงเวลา 15 นาที ของการทำให้วัสดุเปียกก่อนทำการทดสอบ

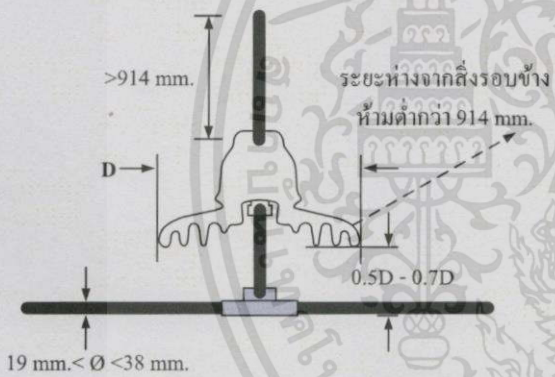
ตารางที่ 1 เงื่อนไขของน้ำตามมาตรฐาน

วิธีการ	อัตราการไหลของหยดน้ำ (mm/min)			คุณสมบัติของน้ำที่สะสม		ระยะเวลาที่ทำการทดสอบ (s)
	องค์ประกอบแนวตั้ง	องค์ประกอบแนวราบ	ข้อจำกัดในการวัดแต่ละครั้ง	อุณหภูมิ (C°)	ความนำไฟฟ้า (µS/cm)	
วิธีการตามมาตรฐาน	1.0 - 2.0	1.0 - 2.0	±0.5 จากค่าเฉลี่ย	10 - 40	85 - 115	60



รูปที่ 1 ภาพขณะสะสมน้ำตามมาตรฐานกำหนด

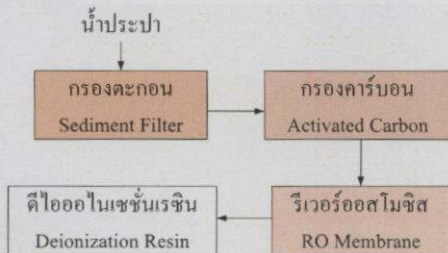
นอกจากนี้มาตรฐานยังได้กำหนดการติดตั้งลูกถ้วยเพื่อทำการทดสอบให้มีระยะต่างๆ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การติดตั้งลูกถ้วยเพื่อทำการทดสอบตามมาตรฐานข้างต้น

2.2 น้ำปราศจากประจุ (Deionization water)

เพื่อให้ความนำไฟฟ้าของน้ำที่ใช้ในการทดสอบเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด จึงต้องใช้วิธีขจัดประจุออกจากน้ำ ซึ่งน้ำโดยทั่วไปจะประกอบไปด้วยประจุบวกและประจุลบ โดยเรียกน้ำที่ใช้ในการทดสอบว่า "น้ำปราศจากประจุ" โดยมีขั้นตอนการสร้างดังต่อไปนี้



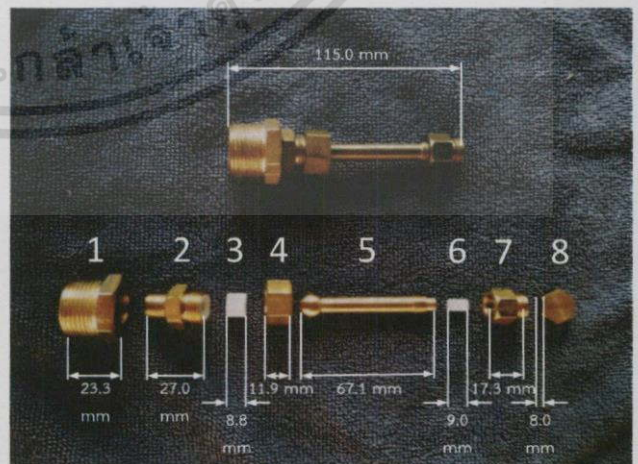
รูปที่ 3 กระบวนการสร้างน้ำปราศจากประจุ

ในขั้นแรกคือการนำน้ำประปามุ่งผ่านการกรองหยาบ (Pre-treatment) เพื่อนำตะกอนหรือสารแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่ออกจากน้ำ จากนั้นนำมามุ่งกระบวนการกรองรีเวอร์ออสโมซิส (Reverse osmosis) เพื่อกำจัดสารละลายและตะกอนที่มีขนาดเล็กออก ในขั้นสุดท้ายคือการนำน้ำจากกระบวนการข้างต้นมาผ่านการกรองเพื่อเอาประจุบวกและลบที่อยู่ในรูปไอออนของธาตุต่างๆออก (Deionization) ซึ่งผลจากการกรองในขั้นต่างๆ จะทำให้น้ำมีความบริสุทธิ์มากขึ้นและมีความนำไฟฟ้าที่น้อยลงตามลำดับขั้นการกรอง

3. การออกแบบและประกอบสร้าง

3.1 การออกแบบหัวพ่นน้ำ

- เพื่อให้ลักษณะของหยดน้ำเป็นไปตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ [1,2] ดังนั้นการออกแบบหัวพ่นน้ำจึงต้องอ้างอิงคุณสมบัติของน้ำตามมาตรฐาน โดยมีแนวคิดในการออกแบบดังนี้
- ต้องสามารถปรับทิศทางของการพ่นได้ 10° - 15° จากแนวแกน
 - สามารถปรับเปลี่ยนขนาดของรูพ่นน้ำที่ปลายหัวพ่นน้ำได้
 - ต้องมีความทนทานต่อการใช้งานกับน้ำและสารละลายได้
 - ขนาดของหัวพ่นต้องสามารถประกอบเข้ากับชุดท่อ PVC ที่มีขายทั่วไปตามท้องตลาดได้
 - เมื่อต้องการให้หัวพ่นน้ำหยุดฉีดน้ำต้องสามารถถอดปลายหัวฉีดได้จากข้อกำหนดดังกล่าวหัวพ่นน้ำที่ออกแบบสร้างแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 หัวพ่นน้ำที่ออกแบบและประกอบสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การออกแบบและประกอบสร้างแนวหัวพ่นน้ำ

เพื่อให้ลักษณะการกระจายของหยดน้ำเป็นไปตามมาตรฐาน [1.2] จึงต้องมีการออกแบบแนวหัวพ่นน้ำให้สามารถพ่นน้ำได้กระจายครอบคลุมและทั่วถึงวัตถุประสงค์

การออกแบบจึงกำหนดให้หัวพ่นน้ำแต่ละหัวห่างกัน 20 cm ทั้งหมด 15 หัวเพื่อรองรับการทดสอบลูกถ้วยแขวนเป็นพวง (หลายลูก) รวมความยาวแนวพ่นน้ำ 1 แนวเป็น 3 m ดังรูปที่ 3.6 และมีการติดตั้งเกจความดัน (Pressure gauge) เข้าที่ปลายด้านหนึ่งเพื่อวัดความดันในแนวพ่นน้ำดังรูปที่ 3.5 ในการทดสอบจะติดตั้งแนวหัวพ่นน้ำ 2 แนวในแนวตั้ง โดยระหว่างแนวมีข้อต่อยูเนียน และข้อต่อบอลวาล์ว ซึ่งข้อต่อบอลวาล์วแต่ละตำแหน่งมีหน้าที่ต่างกัน โดยวาล์ว A ทำหน้าที่ตัดค่อน้ำเข้าแนวหัวพ่นน้ำแนวซ้าย วาล์ว B ทำหน้าที่ตัดค่อน้ำเข้าแนวหัวพ่นน้ำแนวขวา และวาล์ว C ทำหน้าที่ระบายน้ำจากแต่ละแนวตั้ง

โดยแนวชุดหัวพ่นน้ำนี้จะถูกยึดกับคานเหล็กฉากยาวเต็มแนวหัวพ่นน้ำแล้วยึดด้วยยูโบลด์ ขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว เต็มตลอดแนวทุกระยะ 0.6 m จากปลายทั้ง 2 ข้าง และยึดเข้ากับนั่งร้านด้วยยูโบลด์ ขนาด 1-1/2 นิ้ว



รูปที่ 5 การออกแบบและประกอบสร้างแนวหัวพ่นน้ำ

4. การทดสอบและผลการทดสอบ

4.1 การทดสอบผสมน้ำเพื่อใช้ในการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันในสภาวะเปียก

เนื่องจากน้ำที่ใช้ในการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันในสภาวะเปียกต้องมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด ซึ่งค่าความนำไฟฟ้ามาอยู่ในช่วง 85 – 115 $\mu\text{S}/\text{cm}$ จึงต้องมีการทดลองสร้างน้ำที่มีค่าความนำไฟฟ้าอยู่ในช่วงที่มาตรฐานกำหนด

จากการทดสอบกับน้ำที่ผ่านกระบวนการต่างๆพบว่ามีความนำไฟฟ้าเป็นไปตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำที่ผ่านกระบวนการการกรองต่างๆ

	น้ำประปา	Pretreatment	Reverse osmosis	Deionization
ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	315.2	290.5	4.3	0.0

ในการทดสอบนี้จะเปรียบเทียบค่าความนำไฟฟ้าของน้ำที่ผ่านกระบวนการกรองรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) ปริมาณ 100 ลิตร และน้ำที่ผ่านกระบวนการกรองเอาประจุออก (Deionisation) ปริมาณ 100 ลิตร โดยนำน้ำแต่ละชนิดมาผสมเข้ากับเกลือแกง (Sodium chloride) ที่ปริมาณต่างๆ ซึ่งได้ความสัมพันธ์เป็นไปตามตารางที่ 3 จากตารางแสดงความสัมพันธ์ ทำให้ในการทดสอบนี้เลือกใช้อัตราส่วนเกลือ 5 cc ค่อน้ำที่ผ่านการกรองรีเวอร์สออสโมซิสปริมาณ 100 ลิตร เพื่อให้ได้ค่าความนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 85 -115 $\mu\text{S}/\text{cm}$

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ของค่าความนำไฟฟ้าของน้ำที่ผ่านกระบวนการกรองรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) และน้ำที่ผ่านกระบวนการกรองเอาประจุออก (Deionization) ปริมาณ 100 ลิตร ($\mu\text{S}/\text{cm}$) และปริมาตรเกลือ (cc)

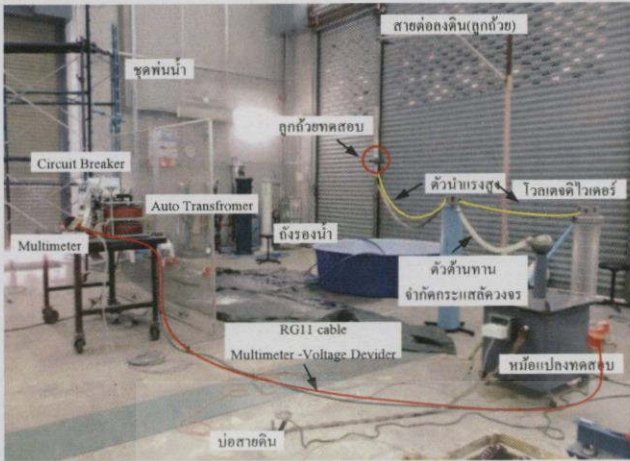
ปริมาณเกลือ (cc)	ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำที่ผ่านกระบวนการกรองรีเวอร์สออสโมซิส ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำปราศจากประจุ ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
0	4.3	0.0
2	42.3	41.9
3	63.0	61.1
4	81.9	83.2
5	102.6	100.0
6	122.4	127.4

4.2 การทดสอบและผลการทดสอบ

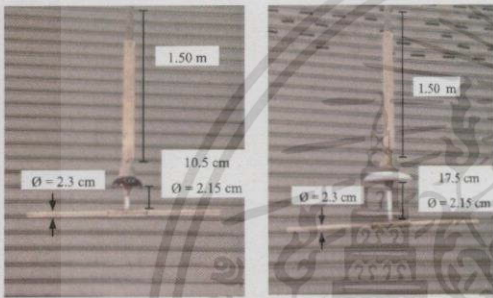
4.2.1 การทดสอบอัตราการหยดของหยดน้ำ

เนื่องจากมีมาตรฐานกำหนดคุณสมบัติของหยดน้ำ จึงต้องมีการทดสอบรูปแบบการติดตั้งที่ออกแบบขึ้นว่าสามารถทำให้คุณสมบัติของหยดน้ำที่พ่นออกมาเป็นไปตามมาตรฐานดังกล่าวหรือไม่ โดยการติดตั้งวงจรการทดสอบ และวัสดุทดสอบจะเป็นไปตาม รูปที่ 6 และ 7 และผลการทดสอบเป็นไปตามตารางที่ 4 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6 การติดตั้งวงจรทดสอบ



รูปที่ 7 การติดตั้งลูกถ้วยในการทดสอบ (สาย ชนิด 52-1 ขวา ชนิด 52-4)

ตารางที่ 4 อัตราการหยดของหยดน้ำในแนวตั้งและแนวราบ (mm/min), อุณหภูมิ (°C) และค่าความนำไฟฟ้าจากภาชนะเก็บตัวอย่าง (µS/cm)

ครั้งที่	อัตราการหยดของหยดน้ำ (mm/min)		อุณหภูมิ (°C)	ค่าความนำไฟฟ้า (µS/cm)
	แนวตั้ง	แนวราบ		
ค่ามาตรฐาน	1.0 - 2.0	1.0 - 2.0	5 - 35	85 - 115
1	1.2	1.6	29.0	99.4
2	1.2	1.7	28.6	100.6
3	1.3	1.6	30.2	99.8
4	1.2	1.6	29.2	98.9
5	1.1	1.7	30.1	101.4
6	1.1	1.6	30.3	100.5

4.3 ผลการทดสอบ

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบลูกถ้วยขนาด 52-1 ที่แรงดันไฟฟ้า 30 kV

ครั้งที่	แรงดันทดสอบ (kV)	แรงดันเริ่มเกิดโคโรน่า (kV)	การเกิดวาวไฟตามผิว
1	30.54	22.87	ไม่มี
2	30.20	21.59	ไม่มี
3	30.35	20.41	ไม่มี

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบลูกถ้วยขนาด 52-4 ที่แรงดันไฟฟ้า 50 kV

ครั้งที่	แรงดันทดสอบ (kV)	แรงดันเริ่มเกิดโคโรน่า (kV)	การเกิดวาวไฟตามผิว
1	50.81	40.37	ไม่มี
2	50.04	39.64	ไม่มี
3	50.57	38.11	ไม่มี

จากตารางที่ 5 และ 6 พบว่าค่าแรงดันทดสอบมีค่าสูงกว่าที่มาตรฐานกำหนด และไม่เกิดการวาวไฟตามผิวขึ้น จึงสรุปได้ว่าการทดสอบในตารางที่ 5 และ 6 ผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐาน

5. สรุปผลการทดสอบ

บทความฉบับนี้ได้ทำการออกแบบและประกอบสร้างชุดทดสอบความทนอยู่ได้อ่อนแรงดันกระแสสลับในสภาวะเปียกชื้นได้ตามมาตรฐาน IEC60060-1 ซึ่งจากการทดสอบลูกถ้วยจำนวนด้วยชุดทดสอบ พบว่าค่าที่ได้ออกมานั้นแสดงให้เห็นว่าสามารถใช้ชุดทดสอบนี้ทดสอบวัสดุภายในสภาวะเปียกตามมาตรฐานต่างๆได้ โดยมีอัตราการหยดของน้ำแนวตั้งโดยเฉลี่ย 1.8 mm/min และอัตราการหยดของน้ำแนวราบโดยเฉลี่ย 1.6 mm/min และความนำไฟฟ้าของน้ำโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 100.1 µS/cm ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ของมาตรฐานที่ใช้ทดสอบ

6. กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยเหลือสนับสนุนจากหลายท่านโดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ ผศ.ดร.พีรภูมิ ยุทธโกวิท, รศ.ศิริวัฒน์ โพธิ์เชษฐกุล และ ผศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษา และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้ให้การช่วยเหลือในด้านความรู้ทั้งทางทฤษฎีและทางปฏิบัติ และให้การสนับสนุนในการหาทุนเพื่อใช้ในการทำโครงการ

ขอขอบคุณ คุณปณชวีร์ ฉายศิริ ที่ได้กรุณาให้การดูแลช่วยเหลือและแนะนำข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการมาโดยตลอด รวมถึงได้ให้ความกรุณาตรวจแก้ไขปริญญาโทจนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี และขอขอบคุณที่ปรึกษาโทและปริญญาเอก เพื่อนๆ ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงและห้องปฏิบัติการอื่นๆ น้องๆภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ทุกคนที่ได้ช่วยเหลือในการทำโครงการนี้ให้ผ่านพ้นไปได้ด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

- IEEE Std 4TM-2013, Standard for High-Voltage Testing Techniques
- IEC 60060-1, Edition 3.0 - 2010, High-voltage test techniques
- ANSI C29.1-1988, for electrical power insulators – test methods
- มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, “ลูกถ้วยแขวน : ปอร์ชเลน,” มาตรฐานเลขที่ มอก. 354 – 2523



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques



IEEE Power and Energy Society

Sponsored by the
Power System Instrumentation and Measurements Committee

IEEE
3 Park Avenue
New York, NY 10016-5997
USA

IEEE Std 4™-2013
(Revision of
IEEE Std 4-1995)

10 May 2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10.1.4 Arrangement of the test object

The arrangement of the test object, particularly with respect to the earthed structures, shall be specified by the relevant apparatus standard.

10.1.5 Atmospheric correction factors

In a combined voltage test, the atmospheric correction factors relative to the component of highest value shall be applied to the test voltage value.

10.2 Composite voltage tests

A composite voltage is the voltage resulting from two different voltage sources suitably connected, applied at one terminal of the test object against earth.

The definition of its parameters is left to the relevant apparatus standard.

NOTE—Composite tests may also be performed by applying voltage and impulse-current sources to the test object.

11. Tests in different ambient conditions

11.1 Dry tests

The test object shall be dry and clean. If not otherwise specified by the relevant apparatus standard, the test should be made at ambient temperature, and the procedure for voltage application should be as specified in Clause 6, Clause 7, Clause 8, and Clause 9.

11.2 Wet tests

Since natural rain cannot be duplicated, the wet test is intended to provide a laboratory benchmark relating performance of equipment under specified precipitation conditions. The specifications for various wet test procedures are given in Table 5.

Three precipitation rates and two resistivities are found in Table 5. They appear under the headings “Standard test procedure,” “Previous European practice,” and “Previous practice in USA.” The conditions for “European practice” and “Practice in USA” are earlier test methods. They were recommended for tests with all types of test voltages and on all types of apparatus designed for outdoor use, and they have been in use for tests with alternating voltage on apparatus up to about 400 kV system voltage. Many test data obtained by these methods exist. Their use is recommended only when direct comparison is required. The use of these procedures shall be limited to specific requirements or agreements between the manufacturer and the purchaser. Wetting procedures to be followed are covered in 11.2.3.

Table 5—Precipitation conditions (standard and conventional procedures)

Procedure	Precipitation rate (mm/min)			Collected water parameters		Wet withstand test duration(s)
	Vertical component	Horizontal component	Limits for any individual measurement	Temperature (°C)	Resistivity ohm-m [$\mu\text{S/cm}$]	
Standard test procedure	1.0 to 2.0	1.0 to 2.0	± 0.5 from average	Ambient ± 15	100 ± 15	60
Previous European practice	3 ± 0.3	—	3 ± 0.75	Ambient ± 15	100 ± 10	60
Previous practice in USA	5 ± 0.5	—	5 ± 1.25	Ambient ± 15	178 ± 27	10

11.2.1 Preparation of test object

The test object should be carefully cleaned by washing with water to which a neutral detergent, such as trisodium phosphate (Na_3PO_4), has been added and then rinsed with clean water. It shall not be touched subsequently by hand. Usually, the insulating surfaces can be considered sufficiently clean and free of grease or other contaminating material if large continuous wet areas are observed during wetting.

11.2.2 Standard wet test

The precipitation conditions in Table 5 under “Standard test procedure” are recommended for tests with all types of test voltages, and on all types of apparatus designed for outdoor use.

11.2.3 Wet test wetting procedure

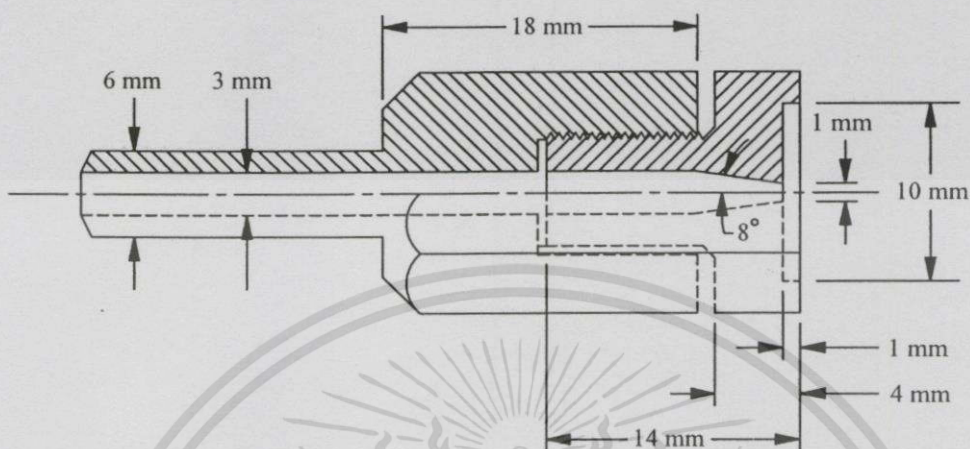
The test object should be sprayed with water, of prescribed resistivity, falling on it as droplets and directed so that the vertical and horizontal components of the spray intensity are approximately equal. These intensities are measured with a divided collecting vessel having openings of 100 cm^2 to 750 cm^2 , one horizontal and one vertical, the vertical opening facing the spray.

The collecting vessel should be placed close to the test object, but in a position so as to avoid collecting droplets or splashes from it. During the measuring period, the collecting vessel should be moved slowly over a sufficient area to average out the effect of non-uniformities of the spray from individual nozzles. The relevant apparatus standard shall specify the position of the test object relative to the vertical and horizontal rain components.

In the case of test objects with a height exceeding 1 m, such measurements should be made near the top, center, and bottom of the object. A similar procedure should be used for test objects with large horizontal dimensions.

The spray apparatus shall be adjusted to produce, within the specified tolerances, precipitation conditions at the test object given in Table 5. Pressure and distance can be varied to achieve the required conditions. Any type and arrangement of nozzles meeting the requirements given in Table 5 may be used. An example of a nozzle that has been found satisfactory in practice is shown in Figure 23, and typical performance data are given in Note 2 after Figure 23. Greater spray distances may be obtained if the nozzles are directed upward at an angle of 15° to 25° from horizontal. Note that if the water pressure is increased above the

recommended limits, the water jets may break up prematurely and cause an unsatisfactory spray at the test object.



NOTE—Details of orifice only.

Figure 23 — Nozzle

The water temperature and resistivity shall be measured on a sample collected immediately before the water reaches the test object. They may also be measured at other locations (e.g., in a storage reservoir) provided that a check ensures that no significant change occurs by the time the water reaches the test object.

The test object should be pre-wetted for at least 15 minutes. The pre-wetting may be done using unconditioned water. Conditioned water shall meet the requirements of Table 5. The transfer from unconditioned to conditioned water shall be accomplished without interruption of the water flow. This transfer shall be followed by a time interval sufficient to flush all unconditioned water. The conditions listed in Table 5 shall remain within the specified tolerances throughout the remainder of the test.

Unless otherwise specified by a relevant apparatus standard, the test procedure for wet tests should be the same as that specified for the corresponding dry tests. In general, for all alternating and direct voltage wet withstand tests, it is recommended that one flashover should be permitted provided that in a repeat test no further flashover occurs.

NOTE—The length of water jet that can be obtained depends on the diameter of the orifice and on the water pressure. At the optimum pressure, which usually is 3×10^5 Pa to 4×10^5 Pa (3 atm to 4 atm) but which depends on the smoothness of the orifice and the arrangement of the supply pipes, the approximate jet lengths obtainable with the nozzle shown in Figure 23 are 9 m to 11 m.

12. Artificial contamination tests

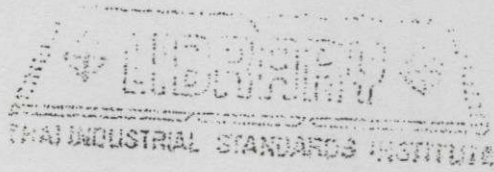
It should be noted that all contamination tests in this standard apply only to ceramic (porcelain and glass) insulators. Procedures for testing composite insulators should be specified by a relevant apparatus standard. Additional information may be found in IEC 60507 [B114].

Artificial contamination tests are intended to provide information on the behavior of external insulation under conditions representative of contamination in service, although they may not necessarily simulate any



ภาคผนวก ค
มาตรฐาน IEC 60060-1, Edition 3.0 - 2010
High-voltage test techniques---Part 1:General definitions and
test requirement

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



IEC 60060-1

Edition 3:0 2010-09

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

เอกสารมีลิขสิทธิ์ ใช้เฉพาะงานของ สมอ. เท่านั้น
ห้ามคัดถ่ายโดยไม่ได้รับอนุญาต

High-voltage test techniques –
Part 1: General definitions and test requirements

Technique des essais à haute tension –
Partie 1: Définitions et exigences générales

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

TISI Library
ห้องสมุดมาตรฐาน



S0105960

Thai Industrial Standards Institute : TISI
Rama VI Rd., Rajathevee Bangkok 10400 Tel : 202-3510

PRICE CODE
CODE PRIX

XB

ICS 17.220.20

ISBN 978-2-88912-185-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณียุติทั้งสิ้น ลึกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

insulation is especially designed with increased strength. If not, the internal insulation should be tested with the rated value and the external insulation be tested by means of test fixtures unless the relevant Technical Committee states otherwise, in which case it shall specify the test procedure to be used.

4.4 Wet tests

4.4.1 Wet test procedure

This wet test procedure is intended to simulate the effect of natural rain on external insulation. It is recommended for tests with all types of test voltages and on all types of apparatus.

The relevant Technical Committee should specify the arrangement of the test object during the test.

The test object shall be sprayed with water of prescribed resistivity and temperature (see Table 2) falling on it as droplets (avoiding fog and mist) and directed so that the vertical and horizontal components of the spray intensity are approximately equal. These intensities are measured with a divided collecting vessel having openings of 100 cm² to 750 cm², one horizontal and one vertical with the vertical opening facing the spray.

The position of the test object relative to the vertical and horizontal rain components shall be specified by the relevant Technical Committee.

In general, the reproducibility of wet test results is less than that for other high-voltage discharge or withstand tests. To minimize the dispersion, the following precautions shall be taken:

- The collecting vessel shall be placed close to the test object, but avoiding the collection of drops or splashes from it. During the measuring period, it should be moved slowly over a sufficient area to average the effect of non-uniformities of the spray from individual nozzles. This measuring zone shall have a width equal to that of the test object and a maximum height of 1 m.
- For test objects between 1 m and 3 m in height, the individual measurements shall be made at the top, centre and bottom of the test object. Each measuring zone shall cover only one third of the height of the test object.
- For test objects exceeding 3 m in height, the number of measuring zones shall be increased to cover the full height of the test object without overlapping.
- The above procedures shall be suitably adapted for test objects having large horizontal dimensions.
- The spread of results may be reduced if the test object is cleaned with a surface-active detergent, which has to be removed before the beginning of wetting.
- The spread of results may also be affected by local anomalous (high or low) precipitation rates. It is recommended to detect these by localized measurements and to improve the uniformity of the spray, if necessary.

The spray apparatus shall be adjusted to produce, within the specified tolerances, precipitation conditions at the test object given in Table 2.

Any type and arrangement of nozzles meeting the requirements given in Table 2 may be used.

Table 2 – Precipitation conditions for standard procedure

Precipitation condition	Unit	Range
Average precipitation rate of all measurements:	[mm/min]	1,0 to 2,0
– vertical component	[mm/min]	1,0 to 2,0
– horizontal component		
Limits for any individual measurement and for each component	[mm/min]	±0,5 from average
Temperature of water	[°C]	Ambient temperature ±15
Conductivity of water	[µS/cm]	100 ± 15

The water temperature and resistivity shall be measured on a sample collected immediately before the water reaches the test object. They may also be measured at other locations (e.g., in a storage reservoir) provided that a check ensures that no significant change occurs by the time the water reaches the test object.

The test object shall be pre-wetted initially for at least 15 min under the above-specified conditions and these conditions shall remain within the specified tolerances throughout the test, which should be performed without interrupting the wetting. The pre-wetting time shall not include the time needed for adjusting the spray. It is also possible to perform an initial pre-wetting by unconditioned mains water for 15 min, followed without interruption of the spray by a second pre-wetting for at least 2 min before the test begins, using water with all the correct precipitation conditions, which should be measured immediately before starting the test.

Unless otherwise specified by the relevant Technical Committee, the test procedure for wet tests shall be the same as that specified for the corresponding dry tests. The test duration for an a.c. test shall be 60 s, if not otherwise specified. In general, for alternating and direct voltage wet withstand tests, it is recommended that one flashover should be permitted provided that in a repeat test no further flashover occurs.

NOTE For a.c. apparatus of large dimensions, such as those having a maximum rated voltage, U_m , higher than 800 kV, no appropriate wet test procedure is available at present.

4.4.2 Atmospheric corrections for wet tests

A density correction factor shall be applied as specified in 4.3, but no humidity correction factor shall be applied for wet tests.

4.5 Artificial pollution tests

Artificial pollution tests are intended to provide information on the behaviour of external insulation under conditions representative of pollution in service, although they do not necessarily simulate any particular service conditions. They are described in IEC 60507.

5 Tests with direct voltage

5.1 Definitions for direct voltage tests

5.1.1
value of the test voltage
arithmetic mean value

5.1.2
ripple
periodic deviation from the arithmetic mean value of the test voltage

ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Reproduced By GLOBAL
ENGINEERING DOCUMENTS
With The Permission Of ANSI
Under Royalty Agreement

American National Standard

for electrical power insulators – test methods

THAI INDUSTRIAL STANDARDS INSTITUTE



ANSI

american national standards institute, inc.
1430 broadway, new york, new york 10018

Obtained From
GLOBAL ENGINEERING DOCUMENTS
2845 McCaw Ave., Irvine, CA 92714
(714) 261-1455 (800) 854-7179

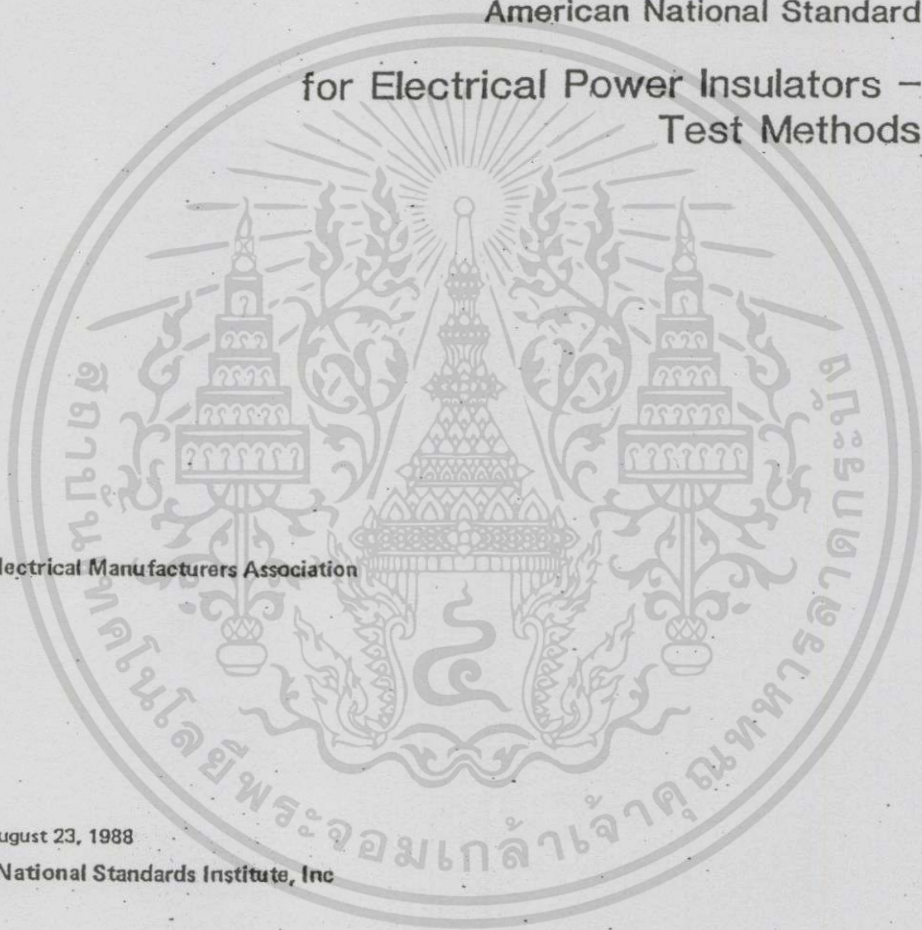
021271

23 ก.พ. 2537

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ANSI®
C29.1-1988
Revision of
ANSI C29.1-1982

American National Standard
for Electrical Power Insulators –
Test Methods



Secretariat
National Electrical Manufacturers Association

Approved August 23, 1988
American National Standards Institute, Inc

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ANSI C29.1 88 ■ 0724150 0029822 0 ■

American National Standard

Approval of an American National Standard requires verification by ANSI that the requirements for due process, consensus, and other criteria for approval have been met by the standards developer.

Consensus is established when, in the judgment of the ANSI Board of Standards Review, substantial agreement has been reached by directly and materially affected interests. Substantial agreement means much more than a simple majority, but not necessarily unanimity. Consensus requires that all views and objections be considered, and that a concerted effort be made toward their resolution.

The use of American National Standards is completely voluntary; their existence does not in any respect preclude anyone, whether he has approved the standards or not, from manufacturing, marketing, purchasing, or using products, processes, or procedures not conforming to the standards.

The American National Standards Institute does not develop standards and will in no circumstances give an interpretation of any American National Standard. Moreover, no person shall have the right or authority to issue an interpretation of an American National Standard in the name of the American National Standards Institute. Requests for interpretations should be addressed to the secretariat or sponsor whose name appears on the title page of this standard.

CAUTION NOTICE: This American National Standard may be revised or withdrawn at any time. The procedures of the American National Standards Institute require that action be taken periodically to reaffirm, revise, or withdraw this standard. Purchasers of American National Standards may receive current information on all standards by calling or writing the American National Standards Institute.

Published by

American National Standards Institute
1430 Broadway, New York, New York 10018

Copyright © 1989 by American National Standards Institute, Inc
All rights reserved.

No part of this publication may be reproduced in any form, in an electronic retrieval system or otherwise, without the prior written permission of the publisher.

Printed in the United States of America

A1C189/12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ANSI C29.1 88 ■ 0724150 0029823 2 ■

Foreword

(This Foreword is not part of American National Standard C29.1-1988.)

This standard comprises a manual of procedures to be followed in making tests to determine the characteristics of insulators used on electric power systems. This standard is not an insulator specification, but rather a test method to be used in conjunction with insulator specifications.

American National Standard C29.1-1988 is a revision of American National Standard Test Methods for Electrical Power Insulators, ANSI C29.1-1972. The present revision was prepared by Accredited Standards Committee on Insulators for Electric Power Lines, C29, which is in charge of this work.

Suggestions for improvement of this standard will be welcome. They should be sent to The Manager of Engineering, National Electrical Manufacturers Association, 2101 L St, NW, Washington, DC 20037, Attn: Secretary, ASC C-29.

This standard was processed and approved for submittal to ANSI by Accredited Standards Committee C29. Committee approval does not necessarily imply that all committee members voted for its approval. At the time it approved this standard, the C29 Committee had the following members:

J. L. Nicholls, Chairman
C. White, Secretary

<i>Organization Represented</i>	<i>Name of Representative</i>
Association of American Railroads	(Representation Vacant)
Bonneville Power Administration	R. L. Brown
Electric Light and Power Group	G. A. Cook
	A. S. Jagtiani
	J. F. Karcher
	E. F. Marchbank
	D. Soffrin (Alt)
	J. Weber
Institute of Electrical and Electronics Engineers	K. Labbe
	T. A. Pinkham
	N. E. Spaulding (Alt)
National Electrical Manufacturers Association	A. C. Baker
	R. Harap
	J. D. Sakich (Alt)
	J. W. Carter
	B. E. Kingsbury (Alt)
	J. L. Nicholls
	R. Harmon (Alt)
	A. E. Schwalm (Alt)
	H. Van Herk (Alt)
Salisbury Co.	R. Bridewesson
Stone & Webster Engineering Corporation	G. Davidson
U.S. Department of the Army (Liaison, with Vote)	W. M. Juno

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Contents	SECTION	PAGE
	1. Scope	5
	2. Definitions	5
	2.1 Insulators and Parts	5
	2.2 Low-Frequency Voltages	6
	2.3 Impulse Voltages	6
	2.4 Mechanical Strength	6
	2.5 Miscellaneous	6
	3. Test-Specimen Mounting for Electrical Tests	6
	3.1 Suspension Insulators	7
	3.2 Line Insulators (Pin, Post)	7
	3.3 Apparatus Insulators (Cap and Pin, Post)	7
	3.4 Strain Insulators	7
	3.5 Spool Insulators	7
	4. Electrical Tests	8
	4.1 General	8
	4.2 Low-Frequency Dry Flashover Voltage Tests	8
	4.3 Low-Frequency Wet Flashover Voltage Tests	9
	4.4 Low-Frequency Dry Withstand Voltage Tests	9
	4.5 Low-Frequency Wet Withstand Voltage Tests	10
	4.6 Low-Frequency Dew Withstand Voltage Tests	10
	4.7 Impulse Flashover Voltage Tests	10
	4.8 Impulse Withstand Voltage Tests	10
	4.9 Radio-Influence Voltage Tests	11
	4.10 Visual Corona Test	11
	4.11 Puncture Tests	12
	5. Mechanical Tests	12
	5.1 Ultimate Mechanical-Strength Tests	12
	5.2 Combined Mechanical- and Electrical-Strength Test (Suspension Insulators)	13
	5.3 Time-Load-Withstand-Strength Test	13
	5.4 Porosity Test	13
	5.5 Thermal Test	14
	5.6 Pinhole-Gaging Test	14
	6. Galvanizing Test	14
	7. Routine Tests	14
	7.1 Electrical Tests	14
	7.2 Mechanical Tests	14
	8. Revision of American National Standards Referred to in This Document	15
	Table 1 Rate of Increase of Load	12
	Figures	
	Figure 1 Low-Frequency Humidity Correction Factors	9
	Figure 2 Impulse Humidity Correction Factors	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

American National Standard

for Electrical Power Insulators — Test Methods



1. Scope

This standard comprises a manual of test methods to be followed in making tests to determine the characteristics of electrical power insulators, as defined herein. Individual tests shall be made only when specified.

2. Definitions

NOTE: Definitions as given herein apply specifically to the subject treated in this standard. For additional definitions see American National Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms, ANSI/IEEE 100-1988.

2.1 Insulators and Parts

2.1.1 Insulator. An insulator is a device intended to give flexible or rigid support to electric conductors or equipment and to insulate these conductors or equipment from ground or from other conductors or equipment.

An insulator comprises one or more insulating parts to which connecting devices (metal fittings) are often permanently attached.

2.1.2 Shell. A shell is a single insulating member, having a skirt or skirts without cement or other connecting devices, intended to form a part of an insulator or an insulator assembly.

2.1.3 Pin Insulator. A pin insulator is an insulator having means for rigid mounting on a separable pin.

2.1.4 Post Insulator. A post insulator is an insulator of generally columnar shape, having means for direct and rigid mounting.

2.1.5 Cap and Pin Insulator. A cap and pin insulator is an assembly of one or more shells with metallic cap and pin, having means for direct and rigid mounting.

2.1.6 Line Insulator (Pin, Post). A line insulator is an assembly of one or more shells, having means for semirigidly supporting line conductors.

2.1.7 Apparatus Insulator (Cap and Pin, Post). An apparatus insulator is an assembly of one or more apparatus-insulator units, having means for rigidly supporting electric equipment.

2.1.7.1 Unit. An apparatus-insulator unit is an assembly of one or more shells with attached metal parts, the function of which is to support rigidly a conductor, bus, or other conducting elements on a structure or base member.

2.1.7.2 Stack. An apparatus-insulator stack is a rigid assembly of two or more apparatus-insulator units.

2.1.8 Suspension Insulator. A suspension insulator is an insulator with attached metal parts having means for nonrigidly supporting electric conductors.

2.1.8.1 Unit. A suspension-insulator unit is an assembly of a shell and hardware, having means for non-rigid coupling to other units or terminal hardware.

2.1.8.2 String. A suspension-insulator string is an assembly of two or more suspension insulators in tandem.

2.1.9 Strain Insulator. A strain insulator is an insulator generally of elongated shape, with two transverse holes or slots.

2.1.10 Spool Insulator. A spool insulator is an insulator of generally cylindrical form having an axial mounting hole and a circumferential groove or grooves for the attachment of a conductor.

2.1.11 Wire Holder. A wire holder is an insulator of generally cylindrical or pear shape, having a hole for securing the conductor and a screw or bolt for mounting.

2.2 Low-Frequency Voltages

2.2.1 Low Frequency. Low frequency, as used in this standard, means any frequency between 15 and 100 hertz.

2.2.2 Low-Frequency Flashover Voltage. A low-frequency flashover voltage of an insulator is the root-mean-square value of the low-frequency voltage that, under specified conditions, causes a sustained disruptive discharge through the surrounding medium.

2.2.2.1 Dry flashover voltage tests are tests as described in 4.2.

2.2.2.2 Wet flashover voltage tests are tests as described in 4.3.

2.2.3 Low-Frequency Withstand Voltage. A low-frequency withstand voltage of an insulator is the root-

AMERICAN NATIONAL STANDARD C29.1-1988

mean-square value of the low-frequency voltage that, under specified conditions, can be applied without causing flashover or puncture.

2.2.3.1 Dry withstand voltage tests are tests as described in 4.4.

2.2.3.2 Wet withstand voltage tests are tests as described in 4.5.

2.2.3.3 Dew withstand voltage tests are tests as described in 4.6.

2.2.4 Low-Frequency Puncture Voltage. A low-frequency puncture voltage of an insulator is the root-mean-square value of the low-frequency voltage that, under specified conditions, causes disruptive discharge through any part of the insulator.

Puncture tests are tests as described in 4.11.

2.3 Impulse Voltages

2.3.1 Impulse Wave. An impulse wave is a unidirectional surge generated by the release of electrical energy into an impedance network.

2.3.2 Impulse Flashover Voltage. An impulse flashover voltage of an insulator is the crest value of the impulse wave that, under specified conditions, causes flashover through the surrounding medium.

2.3.3 Critical Impulse Flashover Voltage. The critical impulse flashover voltage of an insulator is the crest value of the impulse wave that, under specified conditions, causes flashover through the surrounding medium on 50% of the applications.

Impulse flashover voltage tests are tests as described in 4.7.

2.3.4 Impulse Withstand Voltage. The impulse withstand voltage of an insulator is the crest value of an applied impulse voltage that, under specified conditions, does not cause a flashover, puncture, or disruptive discharge on the test specimen.

Impulse withstand voltage tests are tests as described in 4.8.

2.4 Mechanical Strength

2.4.1 Ultimate Mechanical Strength. The ultimate mechanical strength of an insulator is the load at which any part of the insulator fails to perform its function of providing a mechanical support without regard to electrical failure.

Ultimate mechanical-strength tests are tests as described in 5.1.

2.4.2 Combined Mechanical and Electrical Strength (Suspension Insulator). The combined mechanical and electrical strength of a suspension insulator is the mechanical load at which the insulator fails to perform its function either electrically or mechanically, when voltage and mechanical stress are applied simultaneously.

A combined mechanical- and electrical-strength test is a test as described in 5.2.

2.4.3 Time-Load Withstand Strength. The time-load withstand strength of an insulator is the mechanical load that, under specified conditions, can be continuously applied without mechanical or electrical failure.

A time-load withstand test is a test as described in 5.3.

2.4.4 Mechanical-Impact Strength. The mechanical-impact strength of an insulator is the impact which, under specified conditions, the insulator can withstand without damage.

A mechanical-impact strength test is a test as described in 5.1.2.2.

2.5 Miscellaneous

2.5.1 Test Specimen. A test specimen is an insulator which is representative of the product being tested; it is a specimen that is undamaged in any way which would influence the result of the test.

2.5.2 Leakage Distance. The leakage distance of an insulator is the sum of the shortest distances measured along the insulating surfaces between the conductive parts, as arranged for dry flashover test. (Surfaces coated with semiconducting glaze shall be considered as effective leakage surfaces, and leakage distance over such surfaces shall be included in the leakage distance.)

2.5.3 Dry-Arcing Distance. The dry-arcing distance of an insulator is the shortest distance through the surrounding medium between terminal electrodes, or the sum of the distances between intermediate electrodes, whichever is the shorter, with the insulator mounted for dry flashover test.

2.5.4 Radio-Influence Voltage. The radio-influence voltage of an insulator is the radio-frequency voltage measured under specified conditions.

Radio-influence voltage tests are tests as described in 4.9.

3. Test-Specimen Mounting for Electrical Tests

3.1 Suspension Insulators

3.1.1 Mounting Arrangement. Unless otherwise specified, the test specimen (unit or string) shall be suspended vertically at the end of a grounded conductor so that the vertical distance from the uppermost point of the insulator hardware to the supporting structure shall be not less than 3 feet (914 mm).

3.1.2 Energized Electrode. The energized or bottom electrode or conductor shall be a straight, smooth rod or tube having an outside diameter not less than 3/4 inch (19 mm) nor more than 1-1/2 inches (38 mm). It shall be coupled to the lower integral fitting of the test specimen so that the distance from the lowest edge of the insulator shell to the upper surface of the electrode

AMERICAN NATIONAL STANDARD C29.1-1988

shall be between 0.5 and 0.7 of the diameter of the lowest insulator. The conductor shall be horizontal and at right angles to the axis of the test specimen. The conductor shall be of such length that flashover will not be initiated at the electrode ends.

3.1.3 Proximity of Other Objects. No objects, other than parts of the test assembly, shall be nearer the test specimen or energized electrodes than 1-1/2 times the test-specimen dry-arcing distance, with a minimum allowable distance of 3 feet (914 mm).

3.2 Line Insulators (Pin, Post)

3.2.1 Mounting Arrangement (Crossarm). Unless otherwise specified, the supporting crossarm shall be a horizontal, straight, smooth, grounded, metallic tube or structural member having a horizontal width not less than 3 inches (76 mm) nor more than 6 inches (152 mm). It shall be of such length that flashover will not be initiated at its ends.

3.2.2 Mounting Pin (If Required). When a separable pin is required, the test specimen shall be mounted vertically on a 1-inch (25-mm) diameter metal pin of such length that the shortest dry-arcing distance from the upper electrode and connected metallic parts to the supporting crossarm shall be 25% greater than the similar distance to the pin. The pin shall be coaxial with the test specimen. Insulators having integrally assembled means for mounting on a crossarm shall be mounted vertically and directly on the test crossarm.

3.2.3 Energized Electrode. The energized or top electrode or conductor shall be a horizontal round rod or tube placed at right angles to the supporting crossarm, and of a diameter not less than 1/2 inch (13 mm). It shall be of such length that flashover will not be initiated at its ends. The conductor shall be placed in the top conductor groove of the test specimen. When there is no top conductor groove, the conductor shall be placed in the other means provided for the conductor support. If a tie wire is to be used, the conductor shall be secured by means of at least two turns of wire not smaller than No. 8 AWG (American Wire Gage), the ends being closely wrapped around the conductor on each side of the insulator.

3.2.4 Proximity of Other Objects. No objects, other than parts of the test assembly, shall be nearer the test specimen or energized electrodes than 1-1/2 times the test-specimen dry-arcing distance, with a minimum allowable distance of 3 feet (914 mm).

3.3 Apparatus Insulators (Cap and Pin, Post)

3.3.1 Mounting Arrangement. Unless otherwise specified, the test specimen shall be mounted vertically upright on a horizontal, grounded 10-inch (254-mm) channel, with the channel flanges projecting down. A subbase shall be used if the insulator characteristics are

predicated on its use. The supporting channel shall be of such length that flashover will not be initiated at its ends, and its top surface shall be not less than 3 feet (914 mm) above the ground.

3.3.2 Energized Electrode. The energized or top electrode or conductor shall be a horizontal round rod or tube at right angles to the supporting channel, and of a diameter approximately 5% of the test-specimen dry-arcing distance within the limits of 4-1/2 inches (114 mm) maximum and 1/2 inch (13 mm) minimum. The length of the conductor shall be such that flashover will not be initiated at its ends. It shall be mounted directly in contact with the top integral fitting of the test specimen, and with its horizontal axis in the same vertical plane as the vertical axis of the test specimen.

3.3.3 Proximity of Other Objects. No objects, other than parts of the test assembly, shall be nearer the test specimen or energized electrodes than 1-1/2 times the test-specimen dry-arcing distance, with a minimum allowable distance of 3 feet (914 mm).

3.4 Strain Insulators

3.4.1 Mounting Arrangement. Unless otherwise specified, the test specimen shall be mounted in a position with its major axis at 45 degrees from the vertical (for wet flashover test, the major axis shall be at right angles to the spray direction, and the axis of the upper conductor hole or slot shall be horizontal), using flexible metal conductors of approximately 50% of the hole diameter. The conductors shall be clamped with guy clamps, spaced from the test specimen at a distance not less than the test-specimen length. Mechanical tension sufficient to avoid appreciable sag in the setup shall be applied to the test specimen. The lower conductor shall be grounded.

3.4.2 Proximity of Other Objects. No objects, other than parts of the test assembly, shall be nearer the test specimen or energized electrodes than 1-1/2 times the dry-arcing distance of the test specimen, with a minimum allowable distance of 1 foot (305 mm).

3.5 Spool Insulators

3.5.1 Mounting Arrangement. The test specimen shall be mounted horizontally or vertically [as specified in Fig. 1 through 5 of American National Standard for Wet-Process Porcelain Insulators (Spool Type), ANSI C29.3-1986], and in contact with two smooth metallic straps 1-1/2 inches (38 mm) wide and of any suitable thickness. A rod of suitable diameter shall pass through the axial hole of the test specimen and one end of each of the straps. The straps shall extend horizontally in one direction from the rod and remain parallel to each other for a distance from the test specimen of not less than the height of the test specimen. The other ends of

AMERICAN NATIONAL STANDARD C29.1-1988

the straps shall be suitably connected to a grounded support.

3.5.2 Energized Electrode. The energized electrode shall consist of one turn of No. 8 AWG conductor placed around the wire groove and served back on itself. This conductor shall be carried away from the test specimen parallel to and in a direction opposite to the supporting straps.

3.5.3 Proximity of Other Objects. No objects, other than parts of the test assembly, shall be nearer to the test specimen or energized electrodes than 1 foot (305 mm).

4. Electrical Tests

4.1 General. Test specimens used for the tests in this section shall have clean insulating surfaces.

4.2 Low-Frequency Dry Flashover Voltage Tests

4.2.1 Mounting Arrangement. The test-specimen mounting for dry flashover voltage tests shall be in accordance with Section 3.

4.2.2 Voltage Application. The initial applied voltage may be quickly raised to approximately 75% of the expected average dry flashover voltage value. The continued rate of voltage increase shall be such that the time to flashover will be not less than 5 seconds nor more than 30 seconds after 75% of the flashover value is reached.

4.2.3 Dry Flashover Voltage Value.¹ The dry flashover voltage value of a test specimen shall be the arithmetical mean of not less than five individual flashovers taken consecutively. The period between consecutive flashovers shall be not less than 15 seconds nor more than 5 minutes.

4.2.4 Corrections

4.2.4.1 Standard Conditions. Dry flashover voltage values shall be corrected in accordance with American National Standard Techniques for High-Voltage Testing, ANSI/IEEE 4-1978, except the following standard conditions shall apply:

Barometric pressure:	29.92 inches of mercury (10.086 × 10 ⁴ pascals)
Temperature:	77°F (25°C)
Vapor pressure:	0.6085 inch of mercury (2.051 × 10 ³ pascals)

¹ Probable variation: Due to inaccuracies of correction methods, difficulties of precise calibrations, and other uncontrollable conditions, a variation of ± 5% from the probable true average dry flashover voltage value may occur in tests conducted in one laboratory. Values obtained by tests conducted in different laboratories may vary by ± 8%.

Humidity and relative air density corrections shall be calculated in accordance with 4.2.4.2 and 4.2.4.3.

4.2.4.2 Humidity. The dry flashover voltage value shall be corrected to standard humidity conditions in accordance with the curves in Fig. 1. (Humidity correction curves are not available for spool and strain insulators.)

The vapor pressure shall be determined by the following procedure:

Humidity shall be measured with wet- and dry-bulb thermometers, the air being circulated past the thermometers at a velocity of 3 meters (9.84 feet), or more, per second, or with the sling psychrometer. The measurements shall be reduced to vapor pressure with the assistance of the Smithsonian Meteorological Tables or by the following formulas:

For U.S. customary units:

$$P_h = P_s - 0.000367b(t - t') \left(1 + \frac{t' - 32}{1571} \right)$$

where

- P_h = vapor pressure, in inches of mercury
- P_s = pressure, in inches of mercury, of saturated aqueous vapor at temperature t'
- b = barometric pressure, in inches of mercury
- t = temperature of air, in degrees Fahrenheit
- t' = wet-bulb temperature of air, in degrees Fahrenheit

For SI units:

$$P_h = P_s - 0.0876b(t - t')(1 + 0.00115t')$$

where

- P_h = vapor pressure, in pascals
- P_s = pressure, in pascals, of saturated aqueous vapor at temperature t'
- b = barometric pressure, in pascals
- t = temperature of air, in degrees Celsius
- t' = wet-bulb temperature of air, in degrees Celsius

4.2.4.3 Air Density. The dry flashover voltage value shall be corrected to standard atmospheric temperature and pressure conditions. To do so, divide the measured voltage value by the relative air density correction factor, K_d , calculated in one of the following ways:

For U.S. customary units:

$$K_d = 17.95 \frac{P}{(460 + T)}$$

where

- P = barometric pressure in inches of mercury
- T = air temperature in degrees Fahrenheit

For SI units:

$$K_d = 0.002955 \frac{P}{(273 + T)}$$

where

P = barometric pressure in pascals
 T = air temperature in degrees Celsius

or

$$K_d = 0.392 \frac{P}{(273 + T)}$$

where

P = barometric pressure in millimeters of mercury
 T = air temperature in degrees Celsius

4.3 Low-Frequency Wet Flashover Voltage Tests

4.3.1 Mounting Arrangement. The test specimen mounting for wet flashover voltage tests shall be in accordance with Section 3.

4.3.2 Precipitation. The precipitation shall be applied in accordance with subsection 1.3.3.2 and Table 1.2 (Practice in USA) of ANSI/IEEE 4-1978.

4.3.3 Preparation of Test Specimen. The preparation of the test specimen shall be in accordance with subsection 1.3.3.2 of ANSI/IEEE 4-1978.

4.3.4 Voltage Application. At not less than 1 minute after the final adjustment of the spray, the applied voltage may be raised quickly to approximately 75% of the expected average wet flashover voltage value. The continued rate of voltage increase shall be such that the time to flashover will be not less than 5 seconds nor more than 30 seconds after 75% of the wet flashover voltage value is reached.

4.3.5 Wet Flashover Voltage Value.² The wet flashover voltage value of a test specimen shall be the arithmetical mean of not less than five individual flashovers taken consecutively. The period between consecutive flashovers shall be not less than 15 seconds nor more than 5 minutes.

4.3.6 Corrections. Corrections shall be made in accordance with 4.2.4, except that no correction for humidity shall be made.

4.4 Low-Frequency Dry Withstand Voltage Tests

4.4.1 Mounting Arrangement. The test-specimen mounting for dry withstand voltage tests shall be in accordance with Section 3.

4.4.2 Voltage Application. 75% of the rated dry withstand voltage may be applied in one step and gradually raised to the required value in not less than 5 nor more than 30 seconds.

4.4.3 Test Voltage and Time. The test voltage, which is the rated dry withstand voltage with appropriate atmospheric corrections applied, shall be held on the test specimen for 1 minute.

4.4.4 Corrections. Corrections shall be made in accordance with 4.2.4. The test voltage applicable to existing atmospheric conditions is obtained from the rated withstand voltage, as given for standard atmospheric conditions, by use of the following equation:

$$V = V_s \times \frac{\delta}{H}$$

where

V = test voltage, in kilovolts, applied to test specimen

V_s = rated withstand voltage, in kilovolts

δ = relative air density

H = humidity correction factor applicable for the particular test specimen

² Probable variation: Due to variations in water spray, inaccuracies of correction methods, difficulties of precise calibrations, and other uncontrollable conditions, a variation of $\pm 8\%$ from the probable true average wet flashover voltage value may be expected in tests conducted in one laboratory. Values obtained by tests conducted in different laboratories may vary by $\pm 12\%$.

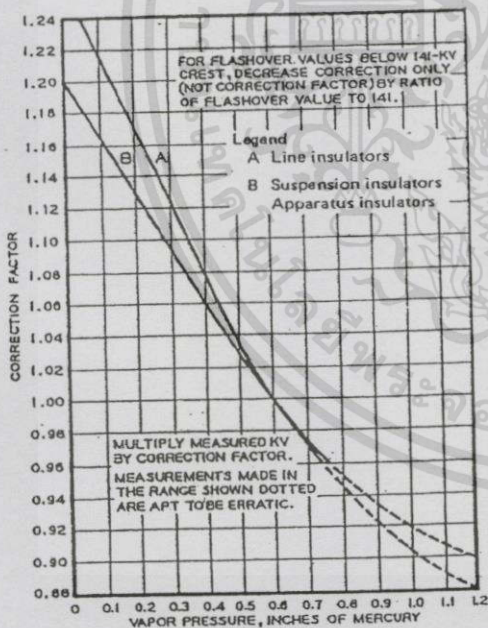


Fig. 1
 Low-Frequency Humidity Correction Factors

AMERICAN NATIONAL STANDARD C29.1-1988

4.5 Low-Frequency Wet Withstand Voltage Tests

4.5.1 **Mounting Arrangement.** The test-specimen mounting for wet withstand voltage tests shall be in accordance with Section 3.

4.5.2 **Precipitation.** The precipitation shall be applied in accordance with subsection 1.3.3.2 and Table 1.2 (Practice in USA) of ANSI/IEEE 4-1978.

4.5.3 **Preparation of Test Specimen.** The preparation of the test specimen shall be in accordance with subsection 1.3.3.2 of ANSI/IEEE 4-1978.

4.5.4 **Voltage Application.** 75% of the rated wet withstand voltage may be applied in one step and gradually raised to the required value in not less than 5 nor more than 30 seconds.

4.5.5 **Test Voltage and Time.** The test voltage, which is the rated wet withstand voltage, with appropriate atmospheric corrections applied, shall be held on the test specimen for 10 seconds.

4.5.6 **Corrections.** Corrections shall be in accordance with 4.2.4, except that no correction shall be made for humidity. The test voltage applicable to existing atmospheric conditions is obtained from the rated withstand voltage, as given for standard atmospheric conditions, by use of the following equation:

$$V = V_s \times \delta$$

where

V = test voltage, in kilovolts, applied to test specimen

V_s = rated withstand voltage, in kilovolts

δ = relative air density

4.6 Low-Frequency Dew Withstand Voltage Tests

4.6.1 **Preparation of Test Specimen.** The test specimen shall be placed in a chamber having a temperature of from -10°C to -15°C (14°F to 5°F) until the specimen is thoroughly cooled. (Cooling may take 10 to 12 hours.)

4.6.2 **Mounting Arrangement.** The test specimen shall be mounted in accordance with Section 3 in a test chamber having a temperature of approximately 77°F (25°C). The relative humidity in the test chamber shall be approximately 100%. This may be obtained by passing live steam at atmospheric pressure into the chamber.

4.6.3 **Voltage Application.** The voltage shall be raised rapidly to dew withstand test voltage, while the test specimen is completely covered with dew. The time to raise the voltage shall be not more than 20 seconds.

4.6.4 **Test Voltage and Time.** The test voltage, which is the rated dew withstand voltage with appropriate atmospheric corrections applied, shall be held on the test specimen for 10 seconds.

4.6.5 **Corrections.** Corrections shall be made in accordance with 4.5.6.

4.7 Impulse Flashover Voltage Tests

4.7.1 **General.** Impulse flashover voltage tests are made under dry conditions only.

4.7.2 **Mounting Arrangement.** The test-specimen mounting for impulse flashover voltage tests shall be in accordance with Section 3.

4.7.3 **Impulse Voltage Wave.** All tests shall be made with a 1.2×50 -microsecond wave, in accordance with ANSI/IEEE 4-1978.

4.7.4 **Critical Impulse Flashover Voltage Value.³** The critical impulse flashover voltage shall be determined in accordance with ANSI/IEEE 4-1978.

4.7.5 **Volt-Time Flashover Curves.³** The volt-time flashover curves shall be determined in accordance with ANSI/IEEE 4-1978.

4.7.6 Corrections

4.7.6.1 **Critical Impulse Flashover Voltage.** The critical impulse flashover voltage value shall be corrected to standard conditions in accordance with 4.2.4, except that the curves in Fig. 2 shall be used.

4.7.6.2 **Volt-Time Curves.** The full air-density corrections shall be applicable. The humidity correction shall be made as follows:

(1) When the critical flashover voltage value occurs at more than 10 microseconds, full corrections shall be applied to all values with time lags of 10 microseconds or more. When flashover above critical voltage occurs at less than 10 microseconds, the correction shall be reduced in the direct ratio that the time to flashover bears to 10 microseconds.

(2) When the critical flashover voltage value occurs at less than 10 microseconds, the correction shall be reduced in the direct ratio that the time to flashover bears to the time at the critical flashover.

4.8 Impulse Withstand Voltage Tests

4.8.1 **General.** Impulse withstand voltage tests are made to determine that the test specimen is capable of withstanding a specified impulse voltage.

4.8.2 **Mounting Arrangement.** The test-specimen mounting for impulse withstand voltage tests shall be in accordance with Section 3.

4.8.3 **Corrections.** Corrections shall be made in accordance with 4.4.4, except that the curves in Fig. 2 shall be used.

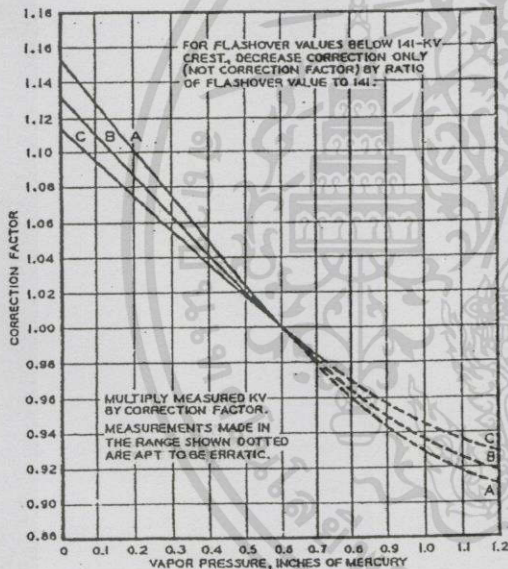
³ Probable variation: Due to inaccuracies of correction methods, difficulties of precise calibrations, and other uncontrollable conditions, a variation of $\pm 5\%$ from the probable true average impulse critical flashover voltage value may be expected in tests conducted in one laboratory. Values obtained by tests conducted in different laboratories may vary by $\pm 8\%$. In volt-time curves, similar variations are to be expected at points near the impulse critical flashover voltage value, with considerably larger variations involved as the time to breakdown decreases.

4.8.4 Voltage Application. Impulse withstand voltage tests shall be made with an impulse of that polarity which produces the lower flashover voltage on the test specimen. Three consecutive impulses shall be applied to the test specimen. The crest voltage of each shall be not less than the specified impulse withstand voltage, with appropriate atmospheric corrections.

4.9 Radio-Influence Voltage Tests

4.9.1 Mounting Arrangement. The test-specimen mounting shall be in accordance with Section 3, except that the clearance to objects, other than parts of the test assembly, shall in no case be less than 3 feet (914 mm) per 100 kilovolts of test voltage.

All hardware associated with the test circuit shall be relatively free of radio influence at a voltage 10% higher than the voltage at which the tests are to be performed.



Legend

- A Suspension insulators, positive wave
- B Line insulators, positive wave
Suspension insulators, negative wave
Apparatus insulators, positive wave
- C Line Insulators, negative wave
Apparatus insulators, negative wave

Fig. 2
Impulse Humidity Correction Factors

4.9.2 Equipment. The equipment used in making the radio-influence voltage tests shall be in accordance with NEMA 107-1964 (R1987), Methods of Measuring Radio Noise.⁴

4.9.2.1 Wave Shape. The wave shape of the applied voltage shall be a sine wave of acceptable commercial standards in accordance with ANSI/IEEE 4-1978.

4.9.2.2 Supply-Voltage Frequency. The frequency of the supply voltage shall be 60 hertz \pm 5%.

4.9.3 Atmospheric Conditions. Tests shall be conducted under atmospheric conditions prevailing at the time and place of test, but it is recommended that tests be avoided when the vapor pressure exceeds 0.6 inch of mercury (2.02×10^3 pascals). Since the effects of humidity and air density upon the radio-influence voltage are not definitely known, no correction factors are recommended for either at the present time. However, it is recommended that barometric pressure and dry- and wet-bulb thermometer readings be recorded so that if suitable correction factors should be determined, they could be applied to previous measurements.

4.9.4 Precautions in Making Radio-Influence Voltage Tests. The following precautions should be observed when making a radio-influence voltage test on a test specimen:

- (1) The test specimen should be at approximately the same temperature as the room in which the test is made.
- (2) The test specimen should be clean.
- (3) In some cases it may be found that the radio-influence voltage falls off rapidly after the 60-hertz voltage has been applied for a short time. In such cases it is permissible to stabilize conditions by preexciting the test specimen at normal operating voltage for a period not to exceed 5 minutes before proceeding with the tests.

4.9.5 Methods of Making Tests

4.9.5.1 Radio-Influence Voltage. The specified voltage shall be applied to the test specimen, and the radio-influence voltage shall be measured in microvolts at the specified radio frequency. It is considered impractical to read radio-influence test voltages that are less than 10 microvolts.

4.9.5.2 Radio-Influence Characteristics. The radio-influence characteristics are determined by plotting the test voltage against the corresponding radio-influence voltage.

4.10 Visual Corona Test

4.10.1 General. To assist in locating a source of

⁴ Available from National Electrical Manufacturers Association, 2101 L Street, N.W., Washington, D.C. 20037.

AMERICAN NATIONAL STANDARD C29.1-1988

radio-influence voltage, a corona test may be performed. The test shall be made in a thoroughly darkened room.

4.10.2 Mounting Arrangement. The test-specimen mounting shall be in accordance with 4.9.1.

4.10.3 Procedure. A voltage well above the corona point shall be applied and slowly lowered until all discharges disappear from the test specimen. The point of disappearance shall be the corona voltage. The observer's eyes shall be thoroughly accustomed to the darkened room before making visual observations.

4.11 Puncture Tests

4.11.1 Mounting Arrangement. Puncture tests shall be performed on fully assembled insulators only. The test specimen shall be inverted and immersed in insulating oil having a sufficient dielectric strength to prevent external flashover of the specimen. The oil shall be at least 6 inches (152 mm) deep over all parts of the test specimen.

Voltage shall be applied between the integrally assembled electrode (cap and pin) on all units having these parts. In the case of pin insulators having no conducting electrodes at one or both terminals, electrodes shall be provided as follows:

An electrode in the pinhole shall be provided by setting a metallic thimble, with suitable conducting material, such as cement or alloy. The thimble shall be provided with a close-fitting pin for attaching the conductor. The top of the test specimen shall be coated with conducting material to a diameter of approximately 1 inch (25 mm) larger than the test-specimen head.

4.11.2 Voltage Application. Voltage shall be applied between the electrodes, as described in 4.11.1. The initial applied voltage may be raised quickly to the rated dry flashover voltage of the test specimen. The voltage shall then be raised at the rate of approximately 10 000 volts every 15 seconds to the value at which puncture occurs.

4.11.3 Percent Average Variation of Puncture Voltage.⁵ The percent average variation of the puncture voltage is determined as follows:

Let

$V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$ = individual puncture voltage values, in kilovolts
 V = average puncture voltage, in kilovolts

⁵If test-equipment limitations are such that the test specimen cannot be punctured, the puncture value shall be considered to be the maximum available applied test voltage, provided this value exceeds 150% of the puncture rating.

then

$$V = \frac{(V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n)}{n}$$

Let

$$\begin{aligned} a_1 &= V - V_1 \\ a_2 &= V - V_2 \\ a_3 &= V - V_3 \\ A_n &= V - V_n \end{aligned}$$

NOTE: Consider all these values of a as positive; that is, neglect the signs.

Let

a = average variation, in kilovolts
 A = percent average variation

then

$$a = \frac{(a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n)}{n}$$

$$A = \frac{100a}{V}$$

5. Mechanical Tests**5.1 Ultimate Mechanical-Strength Tests**

5.1.1 General. Mechanical load shall be applied to the test specimen in the manner prescribed in 5.1.1 through 5.3.2. The load shall be started at zero and smoothly brought up in a practically stepless variation to the failure point. The load may be increased rapidly to approximately 75% of rated strength of the insulator. The rate of increase of load from 75% of rating to failure is given in Table 1.

5.1.2 Suspension Insulators

5.1.2.1 Tensile Strength. Mechanical-tensile load shall be applied between terminal fittings in line with the axis of the test specimen.

Table 1
Rate of Increase of Load

Class of Insulator	Type of Test	Increase in Load per Minute in Percentage of Rated Strength	
		Min	Max
Suspension Line Apparatus	Tensile	15	30
	Cantilever	30	60
Apparatus	Torsion	30	60
	Tensile	15	30
Apparatus	Compression	15	30

5.1.2.2 **Mechanical-Impact Strength.** The test specimen shall be mounted in the specified test machine in the specified manner under a tensile load of approximately 2000 pounds-force (8896 N). The bearing point of the pendulum shall be so adjusted that, when released, the copper nose will strike the outer rim of the shell squarely in a direction parallel to the axis of the unit and towards the cap. The test specimen shall receive an impact of the specified severity by releasing the pendulum when its shaft is opposite the corresponding mark on the indicating scale. The pendulum shall be released with no imparted acceleration. After receiving the specified impact, the test specimen shall be tested for soundness by momentary flashover.

5.1.3 **Line Insulators (Pin, Post) (Cantilever Strength).** Mechanical load shall be applied in line with the side groove of the test specimen and normal to the axis of the pinhole. The load at the tie-wire groove may be applied by means of a loop of flexible stranded cable or the equivalent. The mounting pin, connecting hardware, and linkages between the test specimen and the testing machine shall be such that no appreciable deflection takes place at values up to the failure point of the test specimen. Insulators whose design incorporates self-contained metal caps, mounting bases, pins, or conductor clamps, shall be tested with this hardware, using a suitable rigid support.

5.1.4 **Apparatus Insulators (Cap and Pin, Post)**

5.1.4.1 **Cantilever Strength.** Cantilever-strength tests shall be made with the test specimen adequately secured to the testing machine. The load shall be applied normal to the axis of the test specimen at the specified point of application. In demonstrating stack ratings, one insulator unit may be used. The equivalent lever arm may be obtained by bolting a bar or pipe of proper length and stiffness to the test specimen.

5.1.4.2 **Torsional Strength.** Torsional-strength tests shall be made with the test specimen adequately secured to the testing machine. The torsional load shall be applied to the test specimen through a torque member so constructed that the test specimen is not subjected to any cantilever stress.

5.1.4.3 **Tensile Strength.** Tensile-strength tests shall be made with the test specimen adequately secured to the testing machine. The load shall be applied in line with the axis of the test specimen.

5.1.4.4 **Compression Strength.** Compression-strength tests shall be made by applying load in compression in line with the axis of the test specimen.

5.1.5 **Strain Insulators (Tensile Strength).** Mechanical load shall be applied in line with the main axis of the test specimen, using flexible, stranded, steel cable. Each cable loop shall be secured with clamps so positioned that the distance between the edge of the nearest

clamp and the end of the test specimen is the same as the length of the test specimen. The diameter of the cable used should not exceed 50% of the diameter of the hole in the test specimen.

5.1.6 **Spool Insulators (Transverse Strength).** The test specimen shall be mounted between close-fitting parallel straps, using a through bolt of the same diameter as that for which the test specimen is designed. The straps and connecting linkage shall be such that no appreciable deflection will take place. Mechanical load shall be applied in the plane of the external wire groove. The load shall be applied by means of a loop of flexible, stranded, steel cable. The diameter of the cable shall not exceed the radius of the wire grooves.

5.1.7 **Wire Holders**

5.1.7.1 **Tensile Strength.** The mounting screw or bolt shall be installed in such a manner that the mounting surface of the test specimen does not touch the support. Load shall be applied in line with the axis of the mounting screw or bolt, using a loop of flexible, stranded, steel cable, the diameter of which shall not exceed the radius of the wire hole in the insulator. The loop shall be clamped, with the inside edge of the nearest clamp placed 9 inches (229 mm) from the end of the insulator.

5.1.7.2 **Cantilever Strength.** The mounting screw or bolt shall be held rigidly in such a manner that the mounting base of the test specimen seats squarely against the face of the plate. Load shall be applied in a plane parallel to the mounting surface, passing through the center of the wire groove, using the flexible loop arrangement described in 5.1.7.1.

5.2 **Combined Mechanical- and Electrical-Strength Test (Suspension Insulators).** Load shall be applied as described in 5.1.1 and 5.1.2.1. Simultaneously, a low-frequency voltage of not less than 75% of the rated dry flashover voltage shall be applied to the test specimen.

5.3 **Time-Load-Withstand-Strength Test**

5.3.1 **Mounting Arrangement.** The test-specimen mounting shall be in accordance with the pertinent provisions in 5.1.

5.3.2 **Loading.** The specified load shall be applied smoothly, without undue vibration or shock, and maintained for the specified period. After the load has been removed, the test specimen shall be checked for electrical soundness by being subjected to momentary flashover. Test specimens having more than one shell shall have each shell checked individually for electrical soundness.

5.4 **Porosity Test**

5.4.1 **Preparation of Test Specimens.** Freshly broken fragments of the insulator, having clean surfaces ex-

AMERICAN NATIONAL STANDARD C29.1-1988

posed, shall be used for this test. At least 75% of the surface area shall be free from glaze or other treatment. Fragments approximately 1/4 inch (6 mm) in the smallest dimension up to 3/4 inch (19 mm) in the largest dimension are recommended.

5.4.2 Testing Solution. For this test, a solution consisting of 1 gram of basic fuchsine dye dissolved in 1 liter of 50% alcohol shall be used. If a denatured alcohol is used, one should be selected which does not react with the dye to cause fading of the color.

5.4.3 Procedure. The test specimens shall be completely immersed in the testing solution within a pressure chamber. A minimum pressure of 4000 pounds-force per square inch (27 600 kN/m²) shall be applied for not less than 5 hours, or an optional test at minimum 10 000 pounds-force per square inch (68 900 kN/m²) for not less than 2 hours may be used. At the conclusion of the pressure application, the test specimens shall be thoroughly dried and broken for examination.

5.4.4 Interpretation of Results. Penetration into small fissures formed in preparing the test specimens shall be disregarded. Porosity is indicated by penetration of the dye into the test specimen to an extent visible to the unaided eye.

5.5 Thermal Test

5.5.1 General. The thermal test shall consist of alternate immersions of the test specimen in hot and cold water.

5.5.2 Testing Arrangement. The test specimens shall be arranged so that they are not in contact with each other and so that air shall not be entrapped during immersion. Free circulation of water shall be provided. Test specimens shall be at least 2 inches (51 mm) from the walls of the tank.

5.5.3 Equipment. Each bath shall have a weight of water at least 10 times the weight of the test specimen immersed. Either natural or forced circulation may be used to maintain the temperature of all parts of the bath within $\pm 4^\circ\text{F}$ (2°C) of the specified value. The recorded temperature shall be measured at least 4 inches (102 mm) from the heating or cooling elements.

5.5.4 Method of Making Test. The test specimen shall first be immersed in a hot water bath for 10 minutes. It shall then be withdrawn and immersed in a cold water bath for 10 minutes. Not more than 5 seconds shall elapse in transferring the test specimen from one bath to another. After the specified number of hot and cold cycles, the test specimen shall be tested for electrical soundness by momentary flashover.

5.6 Pinhole-Gaging Test

5.6.1 General. When the threaded pinholes of pin insulators are gaged, the specified pinhole gage shall be used.

5.6.2 Test Procedure. The gage shall be screwed into the test specimen until the gage is tight. The distance from the bottom of the pinhole to the point where the gage stops, as indicated by the plunger and scale on the gage, shall be read.

The gage shall be removed from the test specimen, and the number of revolutions of the gage required to release it from the pinhole shall be counted.

6. Galvanizing Test

Test for thickness of coating shall be in accordance with Standard Measurement of Coating Thickness by the Magnetic Method: Nonmagnetic Coatings of Magnetic Base Metals, ASTM B 499-75 (1987).

7. Routine Tests

7.1 Electrical Tests. Flashover tests on shells or insulators may be made in accordance with either the procedure in 7.1.1 or in 7.1.2.

7.1.1 High-Frequency Test

7.1.1.1 Method 1. The shells or insulators shall be subjected to a damped high-frequency voltage sufficient to cause flashover for from 3 to 5 seconds. The frequency shall be approximately 200 kilohertz in damped trains.

7.1.1.2 Method 2. The shells or insulators shall be subjected to a high-frequency discharge from a transformer adjusted to a no-load voltage of not less than 115% of the low-frequency dry flashover of the shells or insulators, this test to be continued for a period of from 3 to 5 seconds. The frequency superimposed upon the low-frequency voltage shall be higher than 100 kilohertz.

7.1.2 Low-Frequency Test. The shells or insulators shall be subjected to vigorous dry flashover for from 3 to 5 minutes. The voltage control shall be such that a continual flashover occurs and divides uniformly over the shells or insulators under test.

7.2 Mechanical Tests

7.2.1 Suspension Insulators. Prior to or simultaneous with the final electrical test, the assembled suspension insulators shall be given a tensile-strength test 3 seconds in duration, at the specified value, applied in line with the axis of the insulator.

7.2.2 Apparatus Insulators. Prior to or simultaneous with the final electrical test, the assembled apparatus insulators shall be given a tensile-strength test 3 seconds in duration, at the specified value, applied in line with the axis of the insulator.

ANSI C29.1 88 ■ 0724150 0029835 9 ■

AMERICAN NATIONAL STANDARD C29.1-1988

8. Revision of American National Standards Referred to in This Document

When the following American National Standards referred to in this document are superseded by a revision approved by the American National Standards Institute, Inc., the revision shall apply:

ANSI C29.3-1986, Wet-Process Porcelain Insulators (Spool-Type)

ANSI/IEEE 4-1978, Techniques for High-Voltage Testing

ANSI/IEEE 100-1988, Dictionary of Electrical and Electronics Terms



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ANSI C29.1 88 ■ 0724150 0029836 0 ■

American National Standards

The standard in this booklet is one of 8000 standards approved to date by the American National Standards Institute.

The Standards Institute provides the machinery for creating voluntary standards. It serves to eliminate duplication of standards activities and to weld conflicting standards into single, nationally accepted standards under the designation "American National Standards."

Each standard represents general agreement among maker, seller, and user groups as to the best current practice with regard to some specific problem. Thus the completed standards cut across the whole fabric of production, distribution, and consumption of goods and services. American National Standards, by reason of Institute procedures, reflect a national consensus of manufacturers, consumers, and scientific, technical, and professional organizations, and governmental agencies. The completed standards are used widely by industry and commerce and often by municipal, state, and federal governments.

The Standards Institute, under whose auspices this work is being done, is the United States clearinghouse and coordinating body for voluntary standards activity on the national level. It is a federation of trade associations, technical societies, professional groups, and consumer organizations. Some 1000 companies are affiliated with the Institute as company members.

The American National Standards Institute is the United States member of the International Organization for Standardization (ISO) and the International Electrotechnical Commission (IEC). Through these channels U.S. standards interests make their positions felt on the international level. American National Standards are on file in the libraries of the national standards bodies of more than 60 countries.

American National Standards Institute, Inc
1430 Broadway
New York, N.Y. 10018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ANSI C29.1 88 ■ 0724150 0029836 0 ■

American National Standards

The standard in this booklet is one of 8000 standards approved to date by the American National Standards Institute.

The Standards Institute provides the machinery for creating voluntary standards. It serves to eliminate duplication of standards activities and to weld conflicting standards into single, nationally accepted standards under the designation "American National Standards."


Each standard represents general agreement among maker, seller, and user groups as to the best current practice with regard to some specific problem. Thus the completed standards cut across the whole fabric of production, distribution, and consumption of goods and services. American National Standards, by reason of Institute procedures, reflect a national consensus of manufacturers, consumers, and scientific, technical, and professional organizations, and governmental agencies. The completed standards are used widely by industry and commerce and often by municipal, state, and federal governments.

The Standards Institute, under whose auspices this work is being done, is the United States clearinghouse and coordinating body for voluntary standards activity on the national level. It is a federation of trade associations, technical societies, professional groups, and consumer organizations. Some 1000 companies are affiliated with the Institute as company members.

The American National Standards Institute is the United States member of the International Organization for Standardization (ISO) and the International Electrotechnical Commission (IEC). Through these channels U.S. standards interests make their positions felt on the international level. American National Standards are on file in the libraries of the national standards bodies of more than 60 countries.

American National Standards Institute, Inc
1430 Broadway
New York, N.Y. 10018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



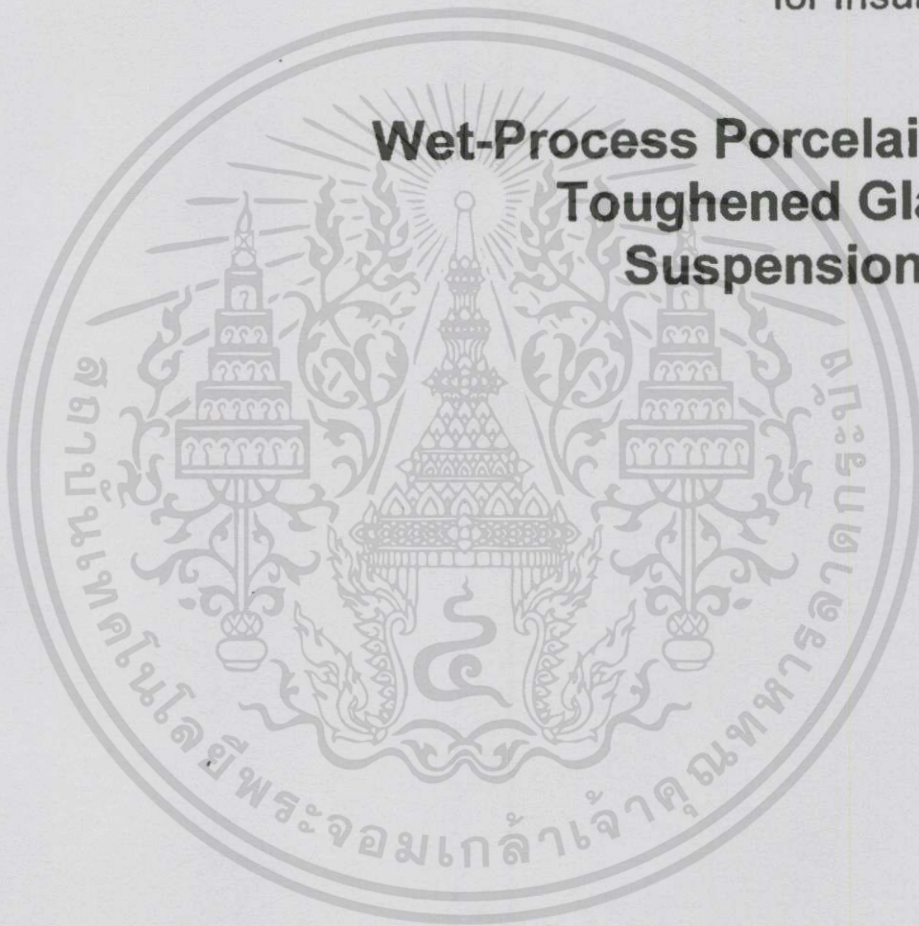
ภาคผนวก จ
มาตรฐาน ANSI C29.2-1992
for Insulators - Wet-Process Porcelain and Toughened Glass
Suspension Type

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ANSI C29.2-1992 (R1999)

**American National Standard
for Insulators—**

**Wet-Process Porcelain and
Toughened Glass—
Suspension Type**



Secretariat

National Electrical Manufacturers Association

Approved December 8, 1999

American National Standards Institute, Inc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 2 – Dimensions and characteristics of distribution insulators ANSI classes 52-1, 52-2, 52-9-A, 52-9-B)

Dimensional data	See ANSI C29.1-1988 Section	ANSI CLASS 52-1 (See Figure 1)	ANSI CLASS 52-2 (See Figure 1)	ANSI CLASS 52-9-A (See Figure 1)	ANSI CLASS 52-9-B (See Figure 1)
Connecting hardware coupling	–	Clevis	Clevis	Clevis	Clevis
Leakage distance, inches (mm)	2.5.2	7(178)	8-1/4(210)	6-3/4(171)	6-3/4(171)
Unit spacing dimension "A," inches	–	5-1/2	5-3/4	6-1/4	6-1/4
Shell diameter dimension "B," inches	–	6-1/2	8	4-1/2	5-1/4
Clevis cap dimension "C," inches	–	11/16	11/16	11/16	11/16
Clevis cap dimension "D," inches	–	11/16	11/16	11/16	11/16
Clevis cap dimension "E," inches	–	11/16	11/16	11/16	11/16
Eyebolt dimension "F," inches	–	1/2	1/2	1/2	1/2
Eyebolt dimension "G," inches	–	1/2	17/32	1/2	1/2
Eyebolt dimension "H," inches	–	7/8	11/16	7/8	7/8
Cotter bolt dimension "J," inches	–	5/8	5/8	5/8	5/8
Mechanical Data					
Combined mechanical & electrical strength, pounds (kN)	5.2	10000 (44)	15000 (67)	10000 (44)	10000 (44)
Mechanical impact strength, inch-pounds, (N-m)	5.1.2.2	45 (5.0)	45 (5.0)	45 (5.0)	45 (5.0)
Tension proof, pounds (kN)	7.2.1	5000 (22)	7500 (33.5)	5000 (22)	5000 (22)
Electrical Data					
Low-frequency dry flashover, kilovolts	4.2	60	65	60	60
Low-frequency wet flashover, kilovolts	4.3	30	35	30	30
Critical impulse flashover, positive, kilovolts	4.7	100	115	100	100
Critical impulse flashover, negative, kilovolts	4.7	100	115	90	90
Low-frequency puncture, kilovolts	4.11	80	90	80	80
Radio-Influence Voltage Data					
Low-frequency test voltage, rms to ground, kilovolts	4.7	7.5	7.5	7.5	7.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้⁹

Table 3 – Dimensions and characteristics of ball-and-socket transmission insulators (ANSI classes 52-3, 52-5, 52-8, and 52-11)

Dimensional data	See ANSI C29.1-1988 Section	ANSI CLASS 52-3 (See Figure 2)	ANSI CLASS 52-5 (See Figure 2)	ANSI CLASS 52-8 (See Figure 2)	ANSI CLASS 52-11 (See Figure 2)
Connecting hardware coupling	–	B & S Type B	B & S Type J	B & S Type K	B & S Type K
Applicable hardware gauges further described by:	–	Figures 4 & 5	Figures 5 & 6	Figures 7 & 8	Figures 7 & 8
Leakage Distance, inches (mm)	2.5.2	11-1/2 (292)	11 (279)	11 (279)	15 (381)
Unit spacing dimension "A," inches	–	5-3/4	5-3/4	5-3/4	6-1/8
Shell diameter dimension "B," inches	–	10-3/4	10-3/4	11-3/4	12-1/4
Mechanical Data					
Combined mechanical & electrical strength, pounds (kN)	5.2	15000 (67)	25000 (111)	36000 (160)	5000 (222)
Mechanical impact strength, inch-pounds, (N-m)	5.1.2.2	55 (6.0)	60 (7.0)	90 (10)	90 (10)
Tension proof, pounds (kN)	7.2.1	7500 (33.5)	12500 (55.5)	18000 (80)	25000 (111)
Electrical Data					
Low-frequency dry flashover, kilovolts	4.2	80	80	80	80
Low-frequency wet flashover, kilovolts	4.3	50	50	50	50
Critical impulse flashover, positive, kilovolts	4.7	125	125	125	140
Critical impulse flashover, negative, kilovolts	4.7	130	130	130	140
Low-frequency puncture, kilovolts	4.11	110	110	110	125
Radio-Influence Voltage Data					
Low-frequency test voltage, rms to ground, kilovolts	4.9	10	10	10	10
Maximum RIV at 1000 kHz, microvolts	4.9	50	50	50	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
10
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Table 4 – Dimensions and characteristics of clevis transmission insulators
(ANSI classes 52-4, 52-6, 52-10, 52-12)**

Dimensional data	See ANSI C29.1-1988 Section	ANSI CLASS 52-4 (See Figure 3)	ANSI CLASS 52-6 (See Figure 3)	ANSI CLASS 52-10 (See Figure 3)	ANSI CLASS 52-12 (See Figure 3)
Connecting hardware coupling	–	Clevis	Clevis	Clevis	Clevis
Leakage distance, inches (mm)	2.5.2	11-1/2 (292)	11 (279)	11 (279)	15 (381)
Unit spacing dimension "A," inches	–	5-3/4	5-3/4	6-1/2	7
Shell diameter dimension "B," inches	–	10-3/4	10-3/4	11-3/4	12-1/4
Clevis cap dimension "C," inches	–	11/16	11/16	11/16	3/4
Clevis cap dimension "D," inches	–	11/16	11/16	7/8	1
Clevis cap dimension "E," inches	–	11/16	11/16	13/16	15/16
Eyebolt dimension "F," inches	–	1/2	1/2	3/4	7/8
Eyebolt dimension "G," inches	–	17/32	17/32	1/2	9/16
Eyebolt dimension "H," inches	–	11/16	11/16	13/16	15/16
Cotter bolt dimension "J," inches	–	5/8	5/8	3/4	7/8
Mechanical Data					
Combined mechanical & electrical strength, pounds (kN)	5.2	15000 (67)	25000 (111)	36000 (160)	50000 (222)
Mechanical impact strength, inch-pounds, (N-m)	5.1.2.2	55 (6.0)	60 (7.0)	90 (10)	90 (10)
Tension proof, pounds (kN)	7.2.1	7500 (33.5)	12500 (55.5)	18000 (80)	25000 (111)
Electrical Data					
Low-frequency dry flashover, kilovolts	4.2	80	80	80	80
Low-frequency wet flashover, kilovolts	4.3	50	50	50	50
Critical impulse flashover, positive, kilovolts	4.7	125	125	125	140
Critical impulse flashover, negative, kilovolts	4.7	130	130	130	140
Low-frequency puncture, kilovolts	4.11	110	110	110	125
Radio-Influence Voltage Data					
Low-frequency test voltage, rms to ground, kilovolts	4.7	10	10	10	10

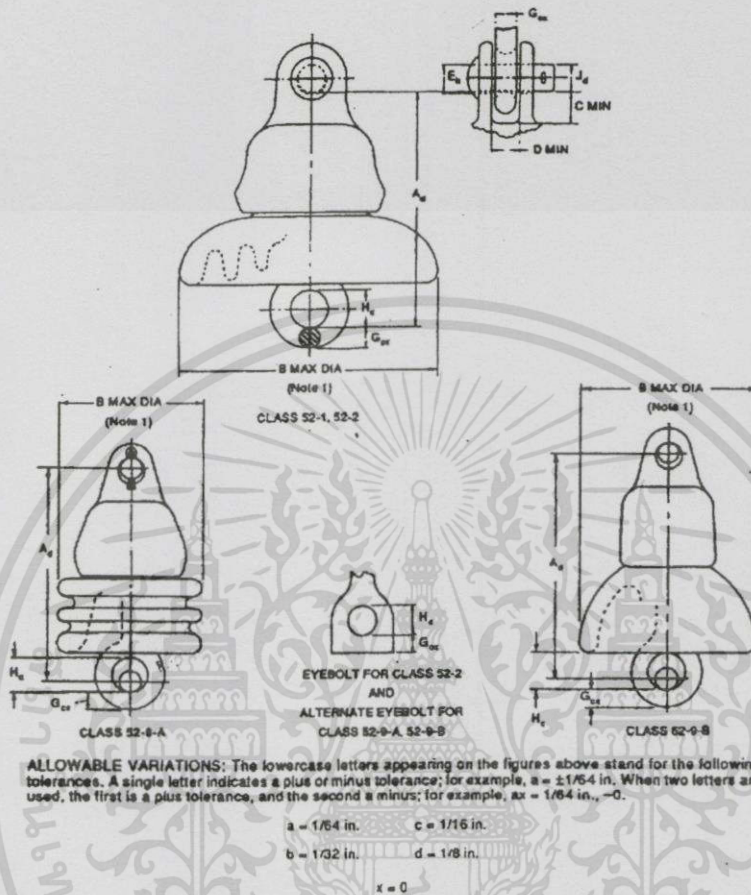
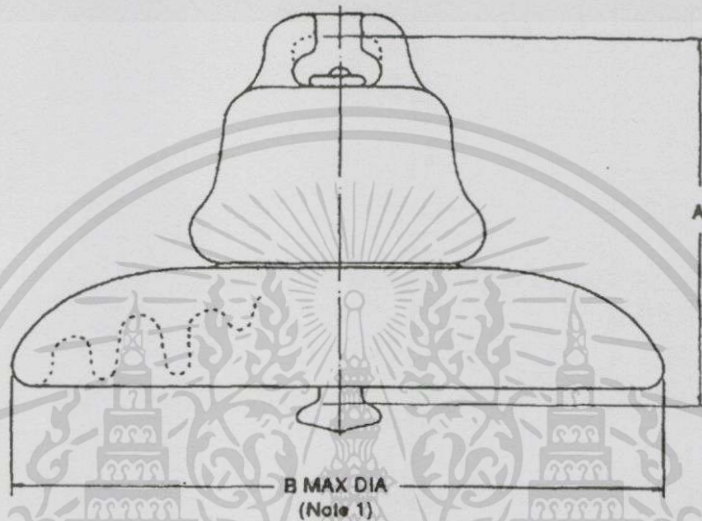


Figure 1 – Classes 52-1, 52-2, 52-9-A, and 52-9-B

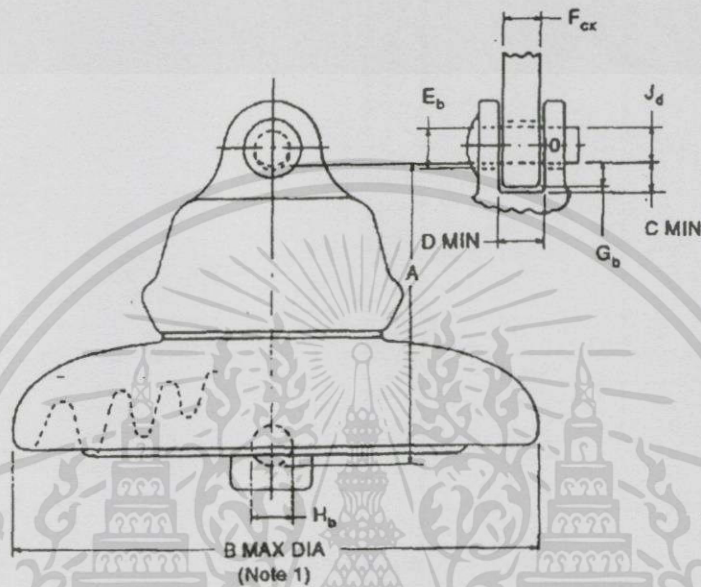


NOTES

- 1 For specific diameter and tolerance, see manufacturer's drawings.
- 2 The connecting length of a string of six insulators selected at random shall be equal to six times the nominal spacing of the insulators $\pm 3/4$ in (± 19.1 mm).
- 3 Dimensions and tolerances shall be determined, after galvanizing (where applicable), by the ball and socket gauges in figures 4, 5, 6, 7, and 8.
- 4 Connecting hardware parts are designated by Type according to applicable gauges as follows:
 - Type B defined by gauges in figures 4 and 5.
 - Type J defined by gauges in figures 5 and 6.
 - Type K defined by gauges in figures 7 and 8.

Figure 2 – Ball-and-socket suspension insulator classes 52-3, 52-5, 52-8, and 52-11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้¹³



ALLOWABLE VARIATIONS: The lowercase letters appearing on the figure above stand for the following tolerances. A single letter indicates a plus or minus tolerance; for example, $a = \pm 1/64$ in. When two letters are used, the first is a plus tolerance, and the second a minus; for example, $ax = 1/64$ in., -0 .

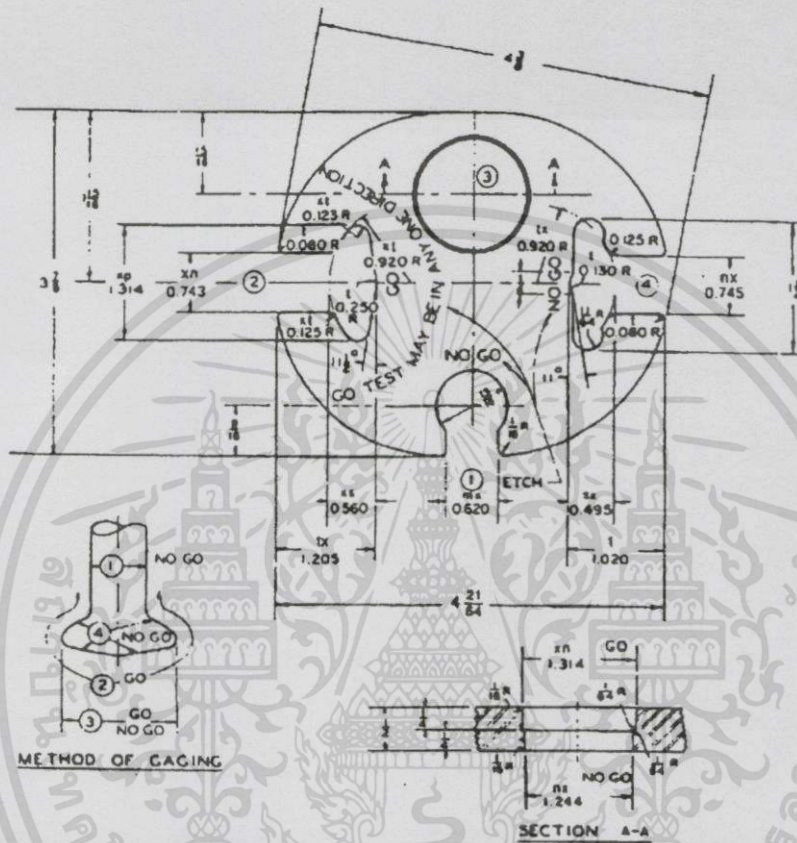
$a = 1/64$ in. $c = 1/16$ in.
 $b = 1/32$ in. $d = 1/8$ in.

$x = 0$

NOTES

- 1 For specific diameter and tolerance, see manufacturer's drawings.
- 2 All dimensions are in inches; for metric equivalents, see table 1.
- 3 The connecting length of a string of six insulators selected at random shall be equal to six times the nominal spacing of the insulators $\pm 3/4$ in (± 19.1 mm).
- 4 Tolerances apply after galvanizing, where applicable.

Figure 3 – Clevis suspension insulator classes 52-4, 52-6, 52-10, and 52-12



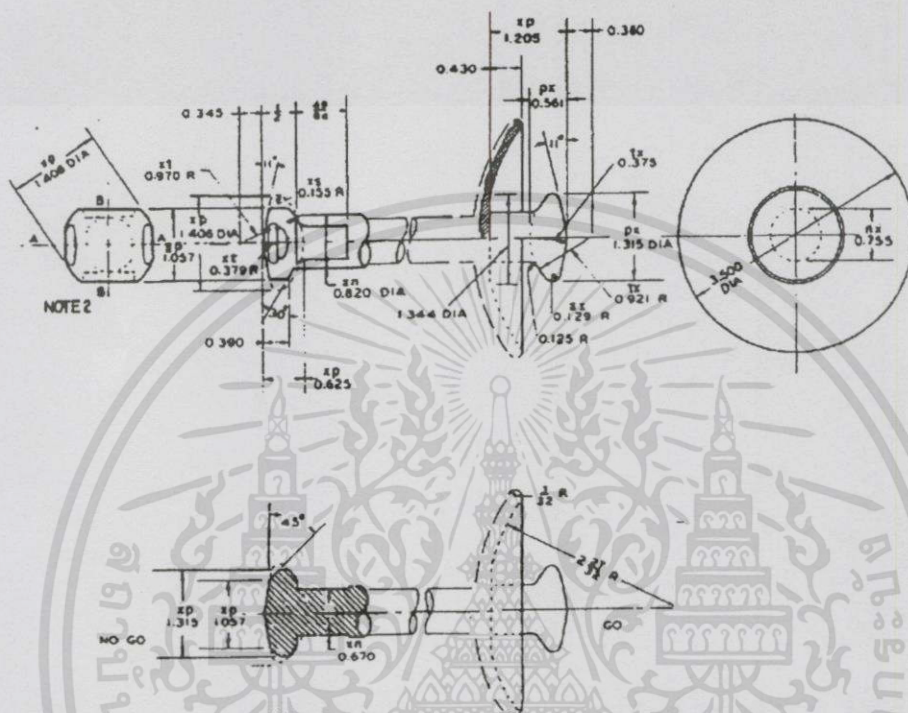
ALLOWABLE VARIATIONS: The letters appearing on the figure above stand for the following tolerances; for example, $m = \pm 0.002$ in. When two letters are used, the first is a plus tolerance, and the second a minus; for example, $mx = +0.0002$ in., -0.0000 .

$m = 0.0002$ in. $s = 0.004$ in.
 $n = 0.001$ in. $t = 0.005$ in.
 $p = 0.002$ in. $x = 0.000$ in.

NOTES

- 1 All dimensions are in inches unless otherwise indicated. For determination of equivalent metric dimensions, see ANSI/IEEE 268.
- 2 "No-go" test shall be for all directions. "Go" test may be in any one direction.
- 3 For position (3), the pin shall not pass through the "no-go" gauge at any inclination.

Figure 4 – Ball gauge for class 52-3 insulator



ALLOWABLE VARIATIONS: The letters appearing on the figure above stand for the following tolerances; for example, m = ±0.002 in. When two letters are used, the first is a plus tolerance, and the second a minus; for example, mx = +0.0002 in., -0.0000.

- m = 0.0002 in.
- s = 0.004 in.
- n = 0.001 in.
- t = 0.005 in.
- p = 0.002 in.
- x = 0.000 in.

NOTES

- 1 All dimensions are in inches unless otherwise indicated. For determination of equivalent metric dimensions, see ANSI/IEEE 268.
- 2 Check for "no-go" dimensions along axis A-A and B-B.

Figure 5 – Socket gauge for class 52-3 and 52-5 insulator

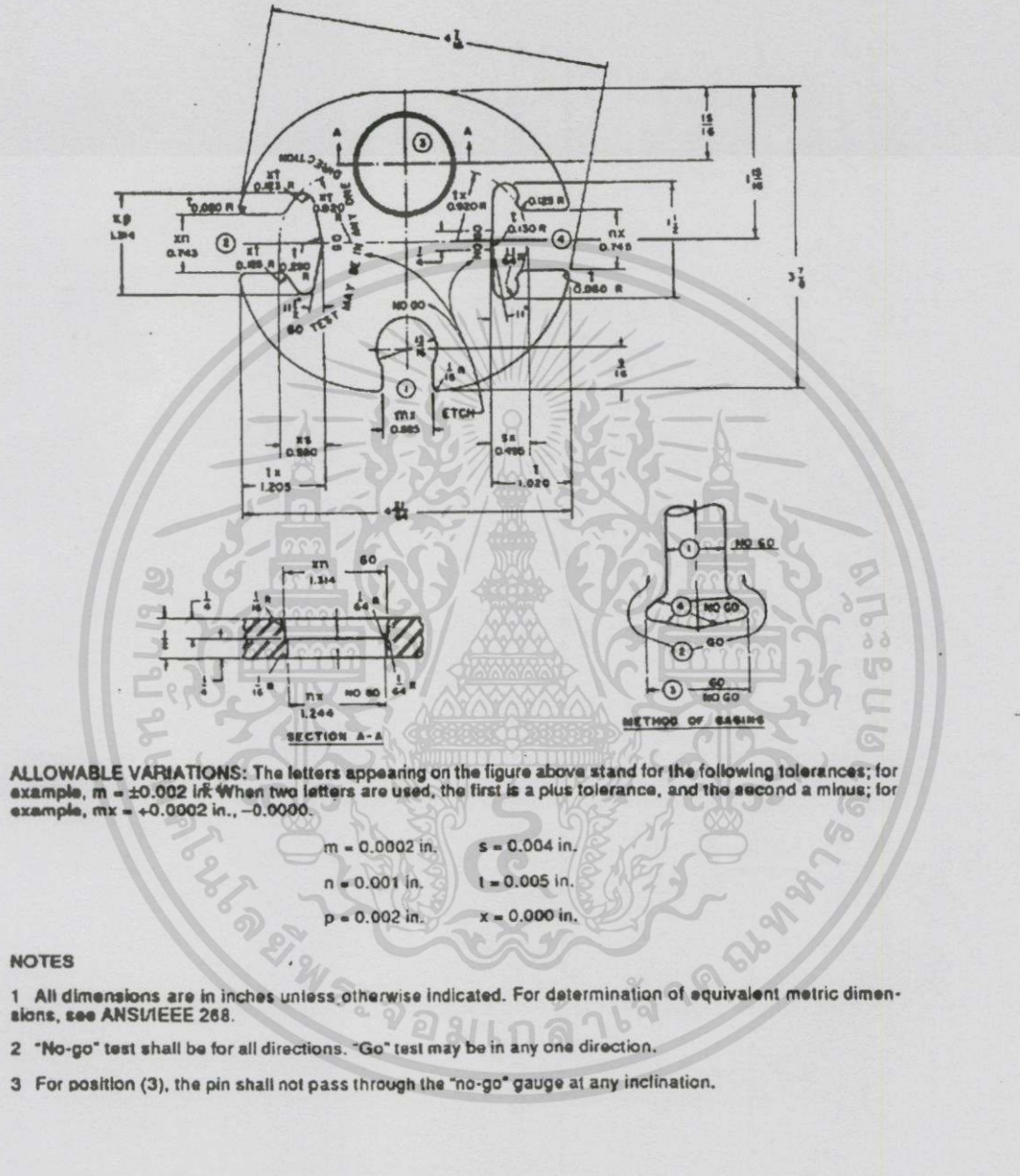
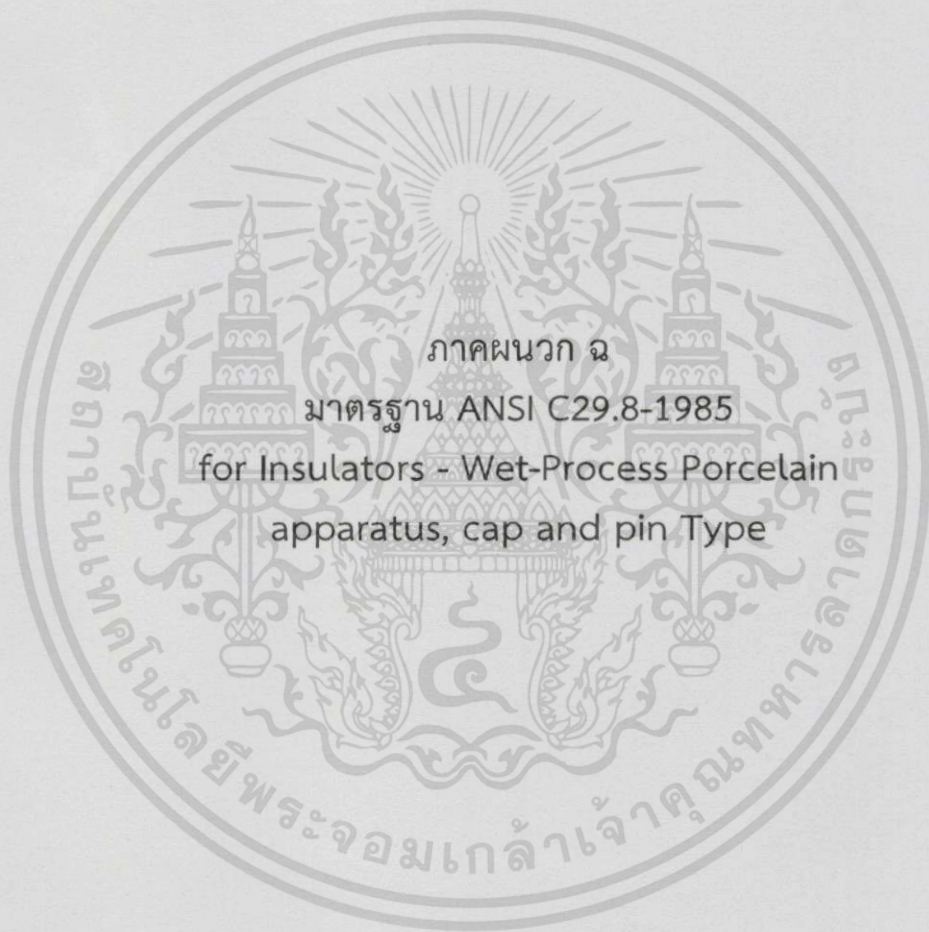


Figure 6 — Ball gauge for class 52-5 insulator



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ห้องสมุด
สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

American National Standard for Wet-Process Porcelain Insulators – Apparatus, Cap and Pin Type

Secretariat
National Electrical Manufacturers Association

Approved December 17, 1984

American National Standards Institute, Inc



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 Shell diameters given for the insulators listed in Table 1 shall not be exceeded by more than 3 percent to ensure physical clearances in assembled apparatus.

6.3 Minimum dimensions are limited by other specified characteristics.

6.4 The length tolerance for any individual unit shall be $\pm 1/32$ inch.

7. Marking

Each insulator unit shall bear symbols identifying the manufacturer and giving the year of manufacture. The marking shall be legible and durable.

8. Sampling, Inspection, and Tests

8.1 **General.** Tests described in 8.2 shall be required only on insulators of new designs. Tests described in 8.3 shall be required on each lot of insulators. Tests described in 8.4 shall be made on each insulator. Electrical tests described in 8.2 shall be conducted on completely assembled insulators.

8.2 Design Tests

8.2.1 **Low-Frequency Wet Withstand.** Three insulators shall be selected at random and tested in accordance with 4.5 of ANSI C29.1-1982. Failure of any insulator to meet the rated wet-withstand value given in Table 1 shall constitute failure to meet the requirements of this standard.

8.2.2 **Critical-Impulse Flashover, Positive.** Three insulators shall be selected at random for the critical-impulse flashover test, positive, and tested in accordance with 4.7 of ANSI C29.1-1982. Failure of the average critical-impulse flashover value of the three insulators to equal or exceed 92 percent of the rated critical-impulse flashover value given in Table 1 shall constitute failure to meet the requirements of this standard.

8.2.3 **Impulse Withstand.** Three insulators shall be selected at random and tested in accordance with 4.8 of ANSI C29.1-1982. Failure of any insulator to meet the rated impulse-withstand value given in Table 1 shall constitute failure to meet the requirements of this standard.

8.2.4 **Radio-Influence Voltage.** Five insulators shall be selected at random and tested in accordance with 4.9 of ANSI C29.1-1982. If one or more insulators fail to meet the requirements given in Table 1, five additional insulators shall be selected at random and tested. Failure of one or more of these additional insulators shall constitute failure to meet the requirements of this standard.

8.2.5 **Compression Strength.** Three insulators shall be selected at random and tested in accordance with 5.1.4.4 of ANSI C29.1-1982. Failure of the average strength of the three insulators to meet the strength requirement given in Table 1 or failure of any one insulator to equal 85 percent of that strength requirement shall constitute failure to meet the requirements of this standard.

8.2.6 **Thermal Shock.** Three insulators shall be selected at random and tested for ten complete cycles in accordance with 5.5 of ANSI C29.1-1982. The temperature of the hot-water bath shall be approximately 150°F (66°C), and the temperature of the cold-water bath shall be approximately 39°F (4°C). If one insulator fails, three additional insulators shall be selected at random and tested. Failure of more than one insulator from the first sample or from the first and second samples combined shall constitute failure to meet the requirements of this standard.

8.3 Quality Conformance Tests²

8.3.1 **Visual and Dimensional Tests.** Conformity with 5.2 may be determined by visual inspection. All insulators not conforming to 5.2 fail to meet the requirements of this standard.

Three insulators shall be selected at random from the lot and their dimensions checked against the dimensions on the manufacturer's drawing. Failure of more than one of these insulators to conform, within manufacturing tolerances, to the dimensions on this drawing shall constitute failure of the lot to meet the requirements of this standard.

8.3.2 **Porosity Test.** Specimens shall be selected from porcelain insulators destroyed in other tests and tested in accordance with 5.4 of ANSI C29.1-1982. Penetration of the dye into the body of the dielectric shall constitute failure of the lot to meet the requirements of this standard.

8.3.3 **Galvanizing Test.** Five pieces representative of each type of galvanized hardware used with the insulators shall be selected at random and tested in accordance with Section 6 of ANSI C29.1-1982. Five to ten measurements shall be uniformly and randomly distrib-

² Substantial test experience indicates that a total of 1/2% of the number of insulators in the lot is sufficient to establish characteristics demonstrable by destructive tests.

Table 1
Dimensions and Characteristics of Cap-and-Pin-Type Apparatus Insulators

Technical Reference Number	Number of Units per Stack	Height per Stack (in)	Diameter (in)	Maximum Cap Diameter (in)	Bolt Diameter (in)	Cantilever Strength (lb)		Tensile Strength (lb)	Torsional Strength (in-lb)	Compression Strength (lb)	Tension Prob. (lb)	Radio-Influence Voltage Data			Leakage Distance (in)	Low-Frequency Puncture (kV)	Impulse Withstand (kV)	Critical Impulse Flashover Positive (kV)	Technical Reference Number	Stack Unit
						Up-right	Under-hung					Low-Frequency Test Voltage (kV)	Maximum RIV (μ V at 1000 kHz)	Low-Frequency Wet Withstand (kV)						
1	1	7-1/2	7	5	3	2 000	1 000	5 000	6 000	10 000	1 250	5	50	7-1/2	80	95	105	105	1	
4	1	10	8	5	3	2 000	1 000	5 000	7 000	10 000	1 250	10	50	12	115	110	125	4		
7	1	12	10-1/2	6	3	2 000	1 000	5 000	8 000	10 000	1 250	15	100	12	145	150	170	7		
10	1	15	13	6	3	2 000	1 000	7 000	10 000	15 000	1 750	22	100	28	195	200	225	10		
13	1	18	14	7-5/8	3	2 000	1 000	8 000	12 000	15 000	2 000	30	200	36	225	250	280	13		
16	147	2	14	8	3	1 500	1 000	12 000	15 000	25 000	2 000	44	200	32	100	350	390	16		
41	1	8	9	6-1/2	5	4 000	3 000	10 000	12 000	20 000	2 000	5	50	8	90	95	105	41		
44	1	10	10	6-3/4	5	4 000	3 000	10 000	14 000	20 000	2 000	10	50	14	115	110	125	44		
46	1	12	12	8	5	4 000	3 000	10 000	16 000	20 000	2 000	15	100	18	145	150	170	46		
49	1	15	14	8-1/4	5	4 000	3 000	14 000	20 000	30 000	2 000	22	100	28	195	200	225	49		
56	140	2	17	9-3/4	5	3 000	2 350	20 000	40 000	60 000	—	44	200	66	160	350	410	56		
19	140	3	43-1/2	17	9-3/4	5	1 700	20 000	40 000	60 000	—	73	200	99	230	550	610	19		
25	140	4	58	17	9-3/4	5	1 200	20 000	40 000	60 000	—	103	500	132	315	750	810	25		
123	141	4	58	18	10-7/8	5	2 000	1 750	25 000	90 000	75 000	103	500	132	315	750	810	123		
126	140	5	72-1/2	17	9-3/4	5	910	840	20 000	40 000	60 000	—	500	165	385	900	1 010	126		
27	141	5	72-1/2	18	10-7/8	5	1 450	1 350	25 000	90 000	75 000	—	500	165	385	900	1 010	27		
128	140	6	87	17	9-3/4	5	750	700	20 000	40 000	60 000	—	146	198	455	1 050	1 210	128		
28	141	6	87	18	10-7/8	5	1 170	1 100	25 000	90 000	75 000	—	146	198	455	1 050	1 210	28		
129	142	6	87	18	10-7/8	7	1 170	1 100	25 000	90 000	75 000	—	146	198	455	1 050	1 210	129		
133	142	7	101-1/2	18	10-7/8	7	1 000	950	25 000	90 000	75 000	—	180	231	525	1 300	1 410	133		
135	142	8	116	18	10-7/8	7	900	860	25 000	90 000	75 000	—	210	264	590	1 470	1 610	135		
147	1	14-1/2	14	8	3	3 000	2 000	12 000	15 000	25 000	2 000	22	100	26	190	210	235	147		
140	1	14-1/2	17	9-3/4	5	7 000	4 000	20 000	40 000	60 000	2 000	22	100	33	210	235	235	140		
141	1	14-1/2	18	10-7/8	5	10 000	6 000	25 000	90 000	75 000	2 000	22	100	33	210	235	235	141		
142	1	14-1/2	18	10-7/8	7	10 000	6 000	25 000	90 000	75 000	2 000	22	100	33	210	235	235	142		
191	1	14-1/2	18	10-7/8	7	20 000	12 000	40 000	120 000	100 000	2 000	22	100	33	210	235	235	191		
196	191	6	87	18	10-7/8	7	2 300	2 300	40 000	120 000	100 000	—	146	198	455	1 050	1 210	196		
197	191	7	101-1/2	18	10-7/8	7	2 000	2 000	40 000	120 000	100 000	—	180	231	525	1 300	1 410	197		
198	191	8	116	18	10-7/8	7	1 750	1 750	40 000	120 000	100 000	—	210	264	590	1 470	1 610	198		
139	1	14-1/2	17	9-3/4	5	10 000	6 000	25 000	90 000	75 000	2 000	22	100	33	210	235	235	139		
174	139	4	58	17	9-3/4	5	2 000	1 750	25 000	90 000	75 000	—	103	132	315	750	810	174		
139	5	72-1/2	17	9-3/4	5	1 450	1 350	25 000	90 000	75 000	—	125	500	165	385	900	1 010	174		
139	6	87	17	9-3/4	5	1 170	1 100	25 000	90 000	75 000	—	146	500	165	385	900	1 010	139		
164	1	14-1/2	14	7-5/8	3	4 000	3 500	12 000	30 000	60 000	2 000	22	100	33	210	235	235	164		
166	164	2	29	14	7-5/8	3	2 000	2 000	12 000	30 000	60 000	—	44	66	160	350	410	166		
167	164	3	43-1/2	14	7-5/8	3	1 000	1 000	12 000	30 000	60 000	—	73	99	230	550	610	167		
168	164	4	58	14	7-5/8	3	1 000	1 000	12 000	30 000	60 000	—	103	132	315	750	810	168		
165	1	18	14	7-5/8	3	3 000	2 000	12 000	30 000	60 000	2 000	30	200	36	100	250	280	165		
169	165	2	36	14	7-5/8	3	1 000	1 000	12 000	30 000	60 000	—	73	72	200	450	470	169		
170	165	3	54	14	7-5/8	3	1 000	1 000	12 000	30 000	60 000	—	88	108	275	650	710	170		

The following bolt circles are standard. When tapped, the tapping shall be:
 3-inch bolt circle - 4 tapped holes 1/2-13 unified form special, pitch diameter 0.4715-0.4650, length of engagement 0.80 (tap after hot dip galvanizing)
 5-inch bolt circle - 4 tapped holes 5/8-11 unified form special, pitch diameter 0.5882-0.5810, length of engagement 0.625 (tap after hot dip galvanizing)
 7-inch bolt circle - 4 tapped holes 3/4-10 unified form special, pitch diameter 0.7077-0.7000, length of engagement 0.75 (tap after hot dip galvanizing)
 10-inch bolt circle - 8 tapped holes 5/8-11 unified form special, pitch diameter 0.5882-0.5810, length of engagement 0.625 (tap after hot dip galvanizing)
 *If high resistance coatings are applied to the insulators, such coatings shall be considered effective leakage surfaces, and the distance over them shall be included in the leakage distance.
 †Withstand ratings for stacks containing Technical Reference Numbers 139, 140, 141, 142, 164, 165, and 191 are predicted on the use of a subbase 3-1/2 inches high, or its equivalent.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

ลูกถ้วยแขวน : ปอร์ชเลน

มอก. ๓ ๕๔ - ๒๕๒๘

พิมพ์เพิ่มเติมครั้งที่ 3 พ.ศ. 2543 จำนวน 200 เล่ม

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
กระทรวงอุตสาหกรรม ถนนพระรามที่ 6 กรุงเทพฯ 10400
โทรศัพท์ 2023300

ประกาศในราชกิจจานุเบกษา ฉบับพิเศษ เล่ม ๔๘ ตอนที่ ๑๒

วันที่ ๒๘ มกราคม พุทธศักราช ๒๕๒๘

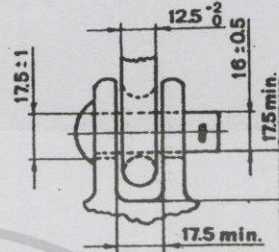
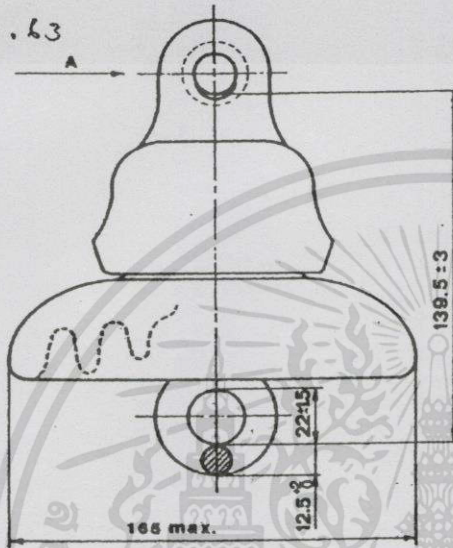
(๑)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอก.๓๔๔-๒๕๒๓

33

20.63



ภาพตามทิศทาง A

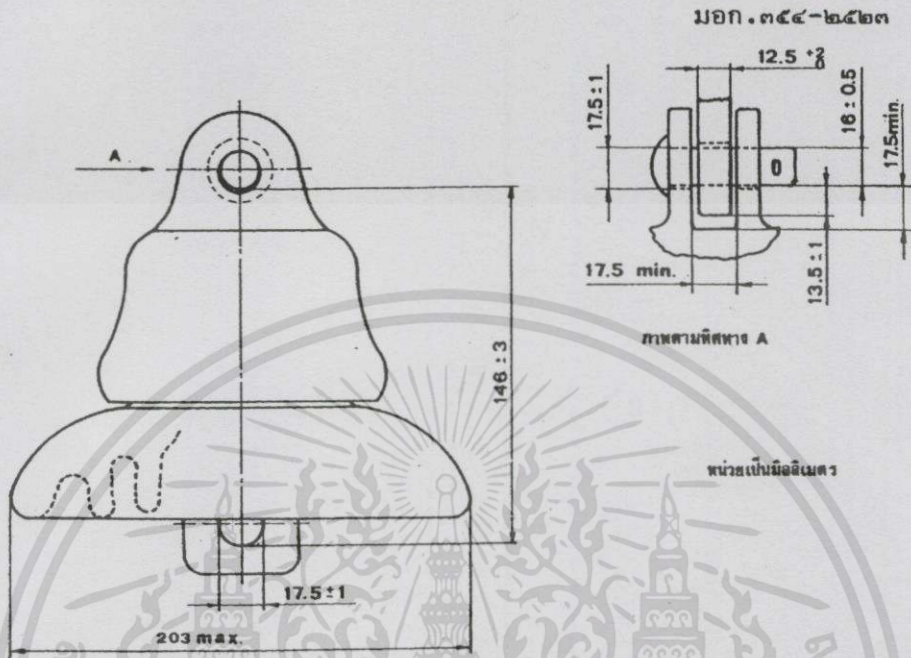
หน่วยเป็นมิลลิเมตร

ชนิดทางอิเล็กทรอนิกส์	178
ระยะรั้ว มิลลิเมตร	
ชนิดทางกล	
ความแข็งแรงรวมทั้งทางกลและทางไฟฟ้า กิโลวัตต์	44.48
ความแข็งแรงต่อการกระแทกทางกล เซนติเมตรวินาที	507.37
ความทนแรงดึง (tension proof) กิโลวัตต์	22.24
โลกเวลา กิโลวัตต์	26.69
ชนิดทางไฟฟ้า	
แรงดันไฟฟ้ารวมไปตามผิวทั้งหมดที่ความถี่ต่ำ กิโลวัตต์	60
แรงดันไฟฟ้ารวมไปตามผิวเป็นความถี่ต่ำ กิโลวัตต์	30
แรงดันไฟฟ้ารวมไปตามผิวทั้งหมดที่ความถี่สูงทางบก กิโลวัตต์	100
แรงดันไฟฟ้ารวมไปตามผิวทั้งหมดที่ความถี่สูงทางบก กิโลวัตต์	100
แรงดันไฟฟ้าเจาะผ่านความถี่ต่ำ กิโลวัตต์	80
ชนิดทางแรงดันไฟฟ้าบริเวณคลื่นวิทยุ	
แรงดันไฟฟ้าทดสอบความถี่ต่ำ, ค่าพินสมคร์เทียบกับดิน กิโลวัตต์	7.5
แรงดันไฟฟ้าบริเวณคลื่นวิทยุสูงสุดที่ 1 000 กิโลเฮิรตซ์ ไมโครวัตต์	50

รูปที่ 1 ลูกถ้วยแขวนแบบ ก (แบบ 52-1)

(ข้อ 3.1.1 และข้อ 3.2)

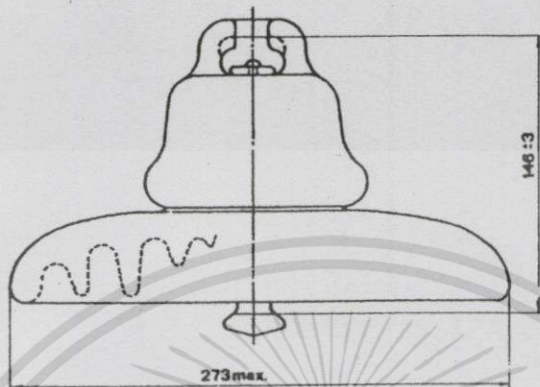
-๔-



ทิศทางติดตั้ง	209.5
ระยะรั้ว มิลลิเมตร	
ทิศทางกล	
ความแข็งแรงรวมทั้งทางกลและทางไฟฟ้า กิโลวัตต์	66.72
ความแข็งแรงต่อการกระแทกทางกล เซนติเมตรวินาที	564.85
ความทนแรงดึง กิโลวัตต์	33.36
โหลดเวลา กิโลวัตต์	44.48
ทิศทางไฟฟ้า	
แรงดันไฟฟ้าขาเข้าตามผิวแห้งความชื้น กิโลโวลต์	65
แรงดันไฟฟ้าขาเข้าที่ขมขืนผิวเปียกความชื้น กิโลโวลต์	35
แรงดันไฟฟ้าขาเข้าที่ขมขืนผิวแห้งบริเวณที่ขมขืนทางบวก กิโลโวลต์	115
แรงดันไฟฟ้าขาเข้าที่ขมขืนผิวแห้งบริเวณที่ขมขืนทางลบ กิโลโวลต์	115
แรงดันไฟฟ้าเข้าจะผ่านความชื้น กิโลโวลต์	90
ทิศทางแรงดันไฟฟ้าบริเวณคลื่นวิทยุ	
แรงดันไฟฟ้าทดสอบความชื้น, ความชื้นสควาร์เทียบกับคลื่น กิโลโวลต์	7.5
แรงดันไฟฟ้าบริเวณคลื่นวิทยุสูงสุดที่ 1 000 กิโลเฮิร์ตซ์ ไมโครโวลต์	50

รูปที่ 2 ลูกถ้วยแขวนแบบ ข (แบบ 52-2)
(ข้อ 3.1.2 และข้อ 3.2)

มอก.๓๔๔-๒๕๒๓

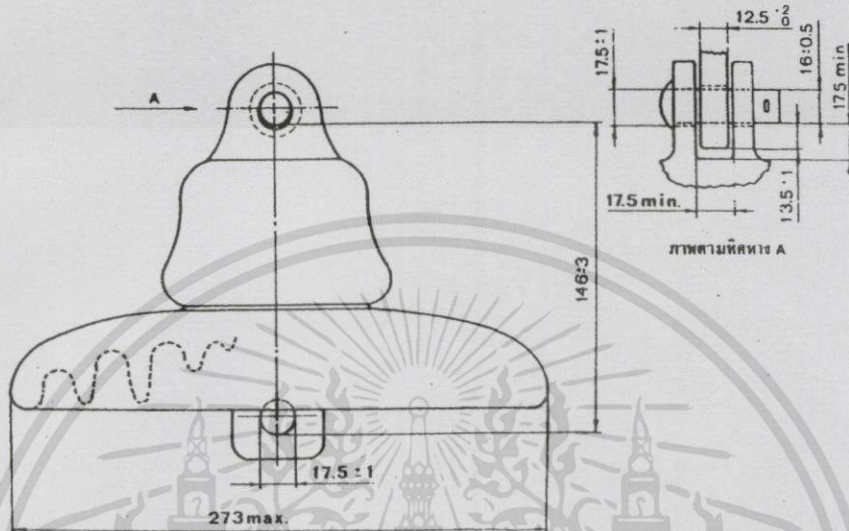


หน่วยเป็นมิลลิเมตร

พิภคทางมิติค่าสุด	
ระยะชั่ว มิลลิเมตร	292
พิภคทางกล	
ความแข็งแรงรวมทั้งทางกลและทางไฟฟ้า กิโลนิวตัน	66.72
ความแข็งแรงต่อการกระทบทางกล เซนติเมตรนิวตัน	621.34
ความทนแรงดึง กิโลนิวตัน	33.36
โหลดเวลา กิโลนิวตัน	44.48
พิภคทางไฟฟ้า	
แรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวแห้งความถี่ต่ำ กิโลโวลต์	80
แรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวเปียกความถี่ต่ำ กิโลโวลต์	50
แรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตทางบวก กิโลโวลต์	125
แรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตทางลบ กิโลโวลต์	130
แรงดันไฟฟ้าเจาะผ่านความถี่ต่ำ กิโลโวลต์	110
พิภคทางแรงดันไฟฟ้ารบกวนคลื่นวิทยุ	
แรงดันไฟฟ้าทดสอบความถี่ต่ำ,ค่ารูตมีนสแควร์เทียบกับดิน กิโลโวลต์	10
แรงดันไฟฟ้ารบกวนคลื่นวิทยุสูงสุดที่ 1 000 กิโลเฮิร์ตซ์ ไมโครโวลต์	50

รูปที่ 3 ลูกถ้วยแขวนแบบ ค (แบบ 52-3)
(ข้อ 3.1.3 และข้อ 3.2)

มอก.๓๕๔-๒๕๒๓



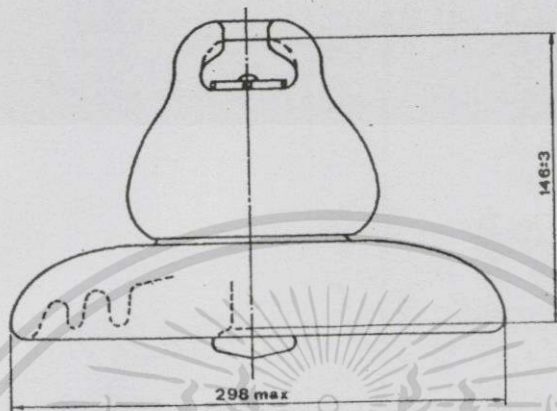
หน่วยเป็นมิลลิเมตร

ศึกษทางมิติค่าสุด	
ระยะรั้ว มิลลิเมตร	29.2
ศึกษทางกล	
ความแข็งแรงรวมทางกลและทางไฟฟ้า กิโลนิวตัน	66.72
ความแข็งแรงต่อการกระแทกทางกล เซนติเมตรนิวตัน	621.34
ความทนแรงดึง กิโลนิวตัน	33.36
โลกเวลา กิโลนิวตัน	44.48
ศึกษทางไฟฟ้า	
แรงดันไฟฟ้าวับไฟตามผิวแห้งความถี่ต่ำ กิโลโวลต์	80
แรงดันไฟฟ้าวับไฟตามผิวเปียกความถี่ต่ำ กิโลโวลต์	50
แรงดันไฟฟ้าวับไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตทางบวก กิโลโวลต์	125
แรงดันไฟฟ้าวับไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตทางลบ กิโลโวลต์	130
แรงดันไฟฟ้าเจาะผ่านความถี่ต่ำ กิโลโวลต์	110
ศึกษทางแรงดันไฟฟ้ารบกวนคลื่นวิทยุ	
แรงดันไฟฟ้าทดสอบความถี่ต่ำ, ค่ารบกวนสแควร์เทียบกับดิน กิโลโวลต์	10
แรงดันไฟฟ้ารบกวนคลื่นวิทยุสูงสุดที่ 1 000 กิโลเฮิรตซ์ ไมโครโวลต์	50

รูปที่ 4 ลูกถ้วยแขวนแบบ ง (แบบ 52-4)
(ข้อ 3.1.4 และข้อ 3.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอก. ๓๔๔-๒๕๒๓



หน่วยเป็นมิลลิเมตร

ทิศทางเปิดต่ำสุด	
ระยะรั้ว มิลลิเมตร	279.5
ทิศทางกล	
ความแข็งแรงร่วมทางกลและทางไฟฟ้า กิโลนิวตัน	160.13
ความแข็งแรงต่อการกระแทกทางกล เซนติ เมตรนิวตัน	1 016.73
ความทนแรงดึง กิโลนิวตัน	80.06
โหลดเวลา กิโลนิวตัน	106.75
ทิศทางไฟฟ้า	
แรงดันไฟฟ้าวับไฟตามผิวแห้งความถี่ต่ำ กิโลโวลต์	80
แรงดันไฟฟ้าวับไฟตามผิวเปียกความถี่ต่ำ กิโลโวลต์	50
แรงดันไฟฟ้าวับไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตทางบวก กิโลโวลต์	125
แรงดันไฟฟ้าวับไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตทางลบ กิโลโวลต์	130
แรงดันไฟฟ้าเจาะผ่านความถี่ต่ำ กิโลโวลต์	110
ทิศทางแรงดันไฟฟ้ารบกวนคลื่นวิทยุ	
แรงดันไฟฟ้าทดสอบความถี่ต่ำ, ค่าวัดมินัสแควร์เทียบกับดิน กิโลโวลต์	10
แรงดันไฟฟ้ารบกวนคลื่นวิทยุสูงสุดที่ 1 000 กิโลเฮิร์ตซ์ ไมโครโวลต์	50

รูปที่ 5 ลูกถ้วยแขวนแบบ จ (แบบ 52-8)
(ข้อ 3.1.5 และข้อ 3.2)

มอก.๓๔๔-๒๕๒๓

9.2.5.2 ความแข็งแรงต่อการกระแทกทางกล สุ่มตัวอย่างลูกถ้วย
แขวน 3 ลูก จากตัวอย่างที่ได้ตรวจสอบลักษณะทั่วไป
แล้ว มาทดสอบตามวิธีที่กำหนดในผนวก ค. ถ้าไม่เป็น
ไปตามเกณฑ์ที่กำหนดในข้อ 5.6.2 ตั้งแต่ 1 ลูกให้สุ่ม
ตัวอย่างมาทดสอบใหม่อีกจำนวน 3 ลูก

ในรายงานการทดสอบ ให้รายงานผลแต่ละตัวอย่าง

9.2.5.3 ความทนแรงดึง ให้ทดสอบลูกถ้วยแขวนทุกลูกตามวิธีที่
กำหนดในผนวก ง.

ในรายงานการทดสอบ ให้รายงานผลแต่ละตัวอย่าง

9.2.5.4 โหลดเวลา สุ่มตัวอย่างลูกถ้วยแขวน 5 ลูกจากตัวอย่าง
ที่ได้ตรวจสอบลักษณะทั่วไปแล้ว มาทดสอบตามวิธีที่กำ
หนดในผนวก จ. ถ้าไม่เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดในข้อ
5.6.4 ตั้งแต่ 1 ลูก ให้สุ่มตัวอย่างมาทดสอบใหม่อีก
จำนวน 5 ลูก

ในรายงานการทดสอบ ให้รายงานผลแต่ละตัวอย่าง

9.2.5.5 ความแข็งแรงส่วนที่เหลือ สุ่มตัวอย่างลูกถ้วยแขวน 25
ลูก จากตัวอย่างที่ได้ตรวจสอบลักษณะทั่วไปแล้ว มาทดสอบ
ตามวิธีที่กำหนดในผนวก ฉ.

ในรายงานการทดสอบ ให้รายงานผลแต่ละตัวอย่าง

9.2.6 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

9.2.6.1 แรงดันไฟฟ้าวาบไฟลามผิวแห้งความถี่ต่ำ สุ่มตัวอย่าง
ลูกถ้วยแขวน 3 ลูกจากตัวอย่างที่ได้ตรวจสอบลักษณะ
ทั่วไปแล้ว มาทดสอบตามวิธีที่กำหนดในมอก.227 ผนวก
ค. โดยใช้การเตรียมตัวอย่างและการแปลงเป็นค่าที่
วัดได้เพื่อเทียบกับค่าในภาวะมาตรฐานดังนี้

มอก.๓๔๔-๒๕๒๓

- (1) แขนงตัวอย่างลูกถ้วยหรือพวงลูกถ้วยในแนวคั้งที่ปลายของตัวนำซึ่งต้องลงดิน โดยให้ระยะในแนวคั้งจากส่วนบนสุดของชั้นส่วนโลหะ ประกอบลูกถ้วยไปถึงโครงสร้างที่รองรับไม่น้อยกว่า 914 มิลลิเมตร คัดตั้งอิเล็กโตรดที่ส่วนล่างของลูกถ้วยในแนวนอน และได้ฉากกับแกนของตัวอย่าง โดยมีระยะห่าง จากส่วนล่างสุดของชั้นของลูกถ้วย ถึงผิวบนของอิเล็กโตรดระหว่าง 0.5 กับ 0.7 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกถ้วยลูกล่างสุด อิเล็กโตรดนั้นต้องตรง เรียบ เป็นแท่งตันหรือท่อกลมซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกไม่น้อยกว่า 19 มิลลิเมตร และไม่เกิน 38 มิลลิเมตร ยาวพอที่จะไม่ทำให้เกิดการวาวไฟตามผิวที่ปลายทั้งสอง ระยะห่างระหว่างตัวอย่างทดสอบและอิเล็กโตรดกับส่วนอื่น ๆ ต้องไม่น้อยกว่า 1.5 เท่าของความยาวของระยะอาร์กแห้งหรือ 914 มิลลิเมตร แล้วแต่ค่าใดจะมากกว่า
- (2) ในกรณีที่ภาวะบรรยากาศในระหว่างการทดสอบไม่เท่ากับภาวะมาตรฐาน ให้แปลงผันค่าที่วัดได้เพื่อเทียบกับค่ามาตรฐานโดยใช้วิธีการตามที่กำหนดในมอก.279 ผนวก ช.

ในรายงานการทดสอบ ให้รายงานผลแต่ละตัวอย่างและค่าเฉลี่ย

มอก.๓๔๔-๒๕๒๓

- 9.2.6.2 แรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวเปียกความถี่ต่ำ สุ่มตัวอย่างอย่างสุ่มด้วยแขน 3 ลูก จากตัวอย่างที่ได้ตรวจสอบลักษณะทั่วไปแล้ว มาทดสอบตามวิธีที่กำหนดในมอก. 227 ผนวก ง. โดยใช้การเตรียมตัวอย่างเช่นเดียวกับข้อ 9.2.6.1(1) และการแปลงผันค่าที่วัดได้เช่นเดียวกับข้อ 9.2.6.1(2)

ในรายงานการทดสอบ ให้รายงานผลแต่ละตัวอย่างและค่าเฉลี่ย

- 9.2.6.3 แรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวฉนวนพลาสติก สุ่มตัวอย่างสุ่มด้วยแขนจากตัวอย่างที่ได้ตรวจสอบลักษณะทั่วไป แล้วจำนวน 3 ลูก สำหรับทดสอบทางบวก และอีกจำนวน 3 ลูกสำหรับทดสอบทางลบ มาทดสอบตามวิธีที่กำหนดใน มอก.279 ผนวก จ. โดยใช้การเตรียมตัวอย่างเช่นเดียวกับข้อ 9.2.6.1(1) และการแปลงผันค่าที่วัดได้เช่นเดียวกับข้อ 9.2.6.1(2)

ในรายงานการทดสอบ ให้รายงานผลแต่ละตัวอย่างและค่าเฉลี่ย

- 9.2.6.4 แรงดันไฟฟ้ารบกวนคลื่นวิทยุ สุ่มตัวอย่างสุ่มด้วยแขน 5 ลูกจากตัวอย่างที่ได้ตรวจสอบลักษณะทั่วไปแล้วมาทดสอบตามวิธีที่กำหนดใน มอก.279 ผนวก จ. โดยใช้การเตรียมตัวอย่างในข้อ 9.2.6.1(1) แต่ให้มีระยะห่างระหว่างตัวอย่างทดสอบและอิเล็กทรอนิกส์บางส่วนอื่นๆ ไม่น้อยกว่า 914 มิลลิเมตร ต่อแรงดันไฟฟ้าทดสอบ 100 กิโลโวลต์ ชิ้นส่วนโลหะทุกชิ้นที่ใช้ประกอบรวมในการทดสอบต้องไม่ก่อให้เกิดการรบกวนคลื่นวิทยุ ที่แรง

มอก.๓๕๔-๒๕๒๓

คันไฟฟ้า 1.1 เท่าของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ ถ้าไม่
เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดในข้อ 5.7.4 ตั้งแต่ 1 ลูก
ให้สุ่มตัวอย่างมาทดสอบใหม่อีกจำนวน 5 ลูก

ในรายงานการทดสอบ ให้รายงานผลแต่ละตัวอย่าง

9.2.6.5 แรงดันไฟฟ้าเจาะผ่าน สุ่มตัวอย่างลูกด้วยแฉวน 5 ลูก
จากตัวอย่างที่ได้ตรวจสอบลักษณะทั่วไปแล้ว มาทดสอบ
ตามวิธีที่กำหนดใน มอก.279 หมวด จ. เว้นแต่การ
ประกอบอิเล็กทรอนิกส์ให้ใช้ชิ้นส่วนโลหะที่ติดอยู่กับลูกด้วย
เป็นอิเล็กทรอนิกส์

ในรายงานการทดสอบ ให้รายงานผลแต่ละตัวอย่าง
ด้วย

9.2.7 ทดสอบ
สุ่มตัวอย่างลูกด้วยแฉวนแบบ ค และแบบ จ แบบละ 3 ลูก
ทดสอบหาแรงที่ใช้ถอดหมุดออกจากลูกด้วย จากตำแหน่งล็อก
ไปยังตอกล็อก ลูกละ 3 ครั้ง

9.2.8 การรบกวนไฟตามผิว
ให้ทดสอบลูกด้วยแฉวนทุกลูกตามวิธีที่กำหนดในหมวด ช.
ในรายงานการทดสอบ ให้รายงานผลแต่ละตัวอย่าง

ประวัติผู้เขียน



นายธนพัฒน์ อ้าแจ่ม

เกิดเมื่อวันที่ 1 มีนาคม พ.ศ.2536 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร
สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาปลายจาก โรงเรียนมัธยมสาธิตวัดพระศรี
มหาธาตุ มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากสถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ฝึกงานที่: บริษัท MECT จำกัด



นายธนริทธิ ตรีวรรณกุล

เกิดเมื่อวันที่ 7 มิถุนายน พ.ศ.2536 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร
สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาปลายจาก โรงเรียนชลราษฎรอำรุง
สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากสถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ฝึกงานที่: บริษัท MECT จำกัด



นายธีรพัฒน์ วิริยะชนพัฒน์

เกิดเมื่อวันที่ 11 สิงหาคม พ.ศ.2536 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร
สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาปลายจาก โรงเรียนราชินีนาถอาจารย์ สามเสน
วิทยาลัย 2
สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากสถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ฝึกงานที่: บริษัท ซีโน-ไทย เอ็นจิเนียริง แอนด์ คอนสตรัคชั่น
จำกัด มหาชน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้