

การออกแบบและสร้างลูกถ้วยแขวนคู่คอตันสำหรับสายส่งแรงสูง



นายโตมร สุนทรนภา

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

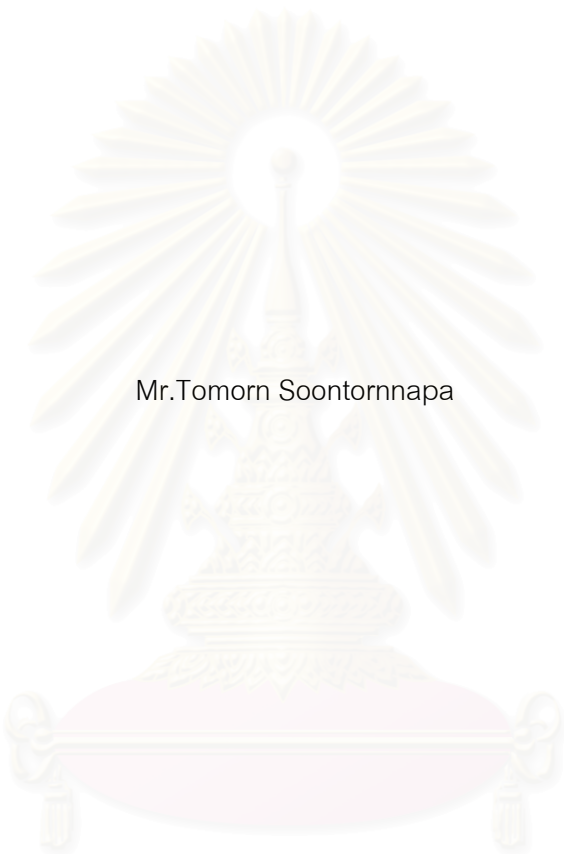
ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-0654-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DESIGN AND CONSTRUCTION OF SOLID CORE SUSPENSION INSULATORS
FOR HIGH VOLTAGE LINES

Mr. Tomorn Soontornnapa



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-0654-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและสร้างลูกถ้วยแขวนคู่คอตันสำหรับสายส่งแรงสูง
โดย	นายโตมร สุนทรนภา
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.สำรวย สังข์สะอาด
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ไพฑูรย์ ไชยนิล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.สำรวย สังข์สะอาด)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.สมบุญณ์ แสงวงศ์วานิชย์)

โตมร สุนทรนภา : การออกแบบและสร้างลูกถ้วยแขวนคู่คอตันสำหรับสายส่งแรงสูง. (Design and Construction of Solid Core Suspension Insulators for High Voltage Lines) อ. ที่
 ปริญญา : รัช. ดร.สำรวย สังข์สะอาด, อ. ที่ปรึกษาร่วม : อ. ดร.ชาญณรงค์ บาลมมงคล,
 84 หน้า. ISBN 974-03-0654-3.

ลูกถ้วยฉนวนที่ใช้ในระบบไฟฟ้าแบบซึ่งสายในอากาศกลางแจ้ง มีโอกาสได้รับแรงดันเกิน
 เสรีไฟฟ้าผ่าที่มีค่ายอดสูงและความชันหน้าคลื่นสูง จัดเป็นแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน ปกติแรงดัน
 อิมพัลส์หน้าคลื่นชันมีค่าความชันระหว่าง 200-2500 kV/ μ s ซึ่งมีผลทำให้ลูกถ้วยฉนวนเกิดการ
 เจาะทะลุได้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้รายงานการศึกษาวิจัย เพื่อแก้ปัญหาการเจาะทะลุอันเนื่องมาจากแรงดัน
 อิมพัลส์หน้าคลื่นชัน ทำการออกแบบและสร้างลูกถ้วยแขวนคู่คอตัน ให้มีลักษณะมิติอิงสมนัยกับ
 ลูกถ้วยแขวนธรรมดาสองลูกมาต่อกันมีลักษณะคอตัน โดยใช้มาตรฐาน IEC Publ. No. 815 อ้างอิง
 ในการออกแบบ และทำการจำลองแบบลูกถ้วยด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อให้ได้รูปแบบและมิติที่
 เหมาะสม ใช้ลูกถ้วยแขวนธรรมดา ANSI Class 52-4 เป็นลูกถ้วยฉนวนในการศึกษาวิจัยนี้ เพื่อความ
 เชื่อมั่นในการนำลูกถ้วยไปใช้งานในระบบ ลูกถ้วยที่ใช้ศึกษาวิจัยทั้งหมดจะนำมาทดสอบความคงทน
 ต่อการเจาะทะลุ (Puncture test) ด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน ตามมาตรฐาน AS-2947.1-1989
 และ CAN/CSA-C411.1-M89-1989 ได้กำหนดค่าความชันหน้าคลื่นแรงดันทดสอบ 2500 kV/ μ s
 รวมทั้ง ทำการทดสอบหาคุณลักษณะทางไฟฟ้า ทางกล และเปรียบเทียบผลกับลูกถ้วยแขวนธรรมดา
 ผลการทดสอบพบว่า ลูกถ้วยแขวนธรรมดาคือจะเกิดการเจาะทะลุได้ด้วยแรงดันอิมพัลส์ที่มีความชัน
 หน้าคลื่น 2500 kV/ μ s แต่ลูกถ้วยแขวนคู่คอตันสามารถทนต่อแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันได้ถึง
 10000 kV/ μ s จึงอาจกล่าวสรุปได้ว่าลูกถ้วยแขวนคู่คอตันสามารถแก้ปัญหาการเจาะทะลุได้

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง

ปีการศึกษาวิชา.....2544

ลายมือชื่อ.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

4170687921 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORDS : Steep Front/ Porcelain insulators / Puncture test

TOMORN SOONTORNNAPA : THESIS TITLE (Design and Construction of Solid Core Suspension Insulators for High Voltage Lines) THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. SAMRUAY SANGKASAAD, Dr. Sc. Techn. THESIS CO-ADVISOR : CHANNARONG BANMONGKOL, Dr. 84 pp. ISBN 974-03-0654-3

Insulators used in the overhead lines system have a chance to face lightning surge overvoltage with high amplitude and high steepness of wavefront so called steep-front impulse voltage. Normally, steep-front impulse voltage has steepness range between 200 – 2500 kV/ μ s, which can cause insulator punctured. This thesis reports the investigation for solving puncture problems caused by steep-front impulse voltage. Solid core suspension insulators were designed and constructed to have configuration and dimensions similar to two conventional suspension insulators connected together with solid core. The criteria of design were based on IEC standard Publ. No. 815. The form of insulators was simulated by using computer program for obtaining the suitable configuration and dimensions. The conventional suspension insulator ANSI Class 52-4 was selected to be as reference for this investigation. For having a high reliability in applications of insulator in power systems, all investigated insulators were tested by steep-front impulse voltage in accordance with Australian standard AS-2947.1-1989 and Canadian standard CAN/CSA-C411.1-M89-1989 which specified the steepness of the wavefront of the test voltage at 2500 kV/ μ s. Moreover, the electrical and mechanical characteristics of solid core suspension insulators were carried out and compared with normal suspension insulators. The testing results show that normal suspension insulators can be punctured by steep front impulse voltage at 2500 kV/ μ s, but the solid core suspension insulator could not be punctured even at higher steepness up to 10000 kV/ μ s. It may therefore be concluded that the solid core suspension insulator can solve the puncture problem.

Department Electrical Engineering

Field of study ... Electrical Power Engineering

Academic year 2001

Student's signature

Advisor's signature

Co-advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ก็ด้วยความกรุณาช่วยเหลือของ รองศาสตราจารย์ ดร. สำรวย สังข์สะอาด อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เอาใจใส่ดูแล ให้คำปรึกษาทั้งภาคทฤษฎี และภาคปฏิบัติการทดลอง ด้วยความตั้งใจ และความปรารถนาดีที่มอบให้ แก่ตัวผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้เป็นที่เรียบร้อย จึงขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้ ขอขอบคุณ บริษัทอาเซียอิมมูเลเตอร์จำกัดผู้ให้ความอนุเคราะห์เงินทุนผลิตลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนที่ใช้ในการทำวิจัย ขอขอบคุณ คุณอนุรักษ ศรีนาคเนื่อง ที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านการประสานงานและนำส่งลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนให้ทันตามกำหนดเวลา ขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านคำแนะนำ เทคนิคการทดสอบ อุปกรณ์และเอกสารการทดสอบ ตลอดจน ความช่วยเหลือเมื่อผู้วิจัยประสบกับปัญหาเฉพาะหน้า ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการโยธาทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือการทดสอบแรงดึงทางกล ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่จาก การไฟฟ้านครหลวง การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และการไฟฟ้าฝ่ายผลิต ที่อำนวยความสะดวกด้านข้อมูลเอกสารการวิจัย ขอขอบคุณ นิสิตปริญญาตรีและปริญญาโทอีกหลายท่านที่คอยให้ความช่วยเหลือ และเพื่อนๆน้องๆอีกมากมายที่คอยเป็นแรงใจ ขอขอบคุณศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง ที่ให้การสนับสนุนในด้านเงินทุนทำวิจัย และขอขอบคุณ สำนักงานเงินทุนสนับสนุนการวิจัย(สกว.) ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนการศึกษาแก่ผู้วิจัย

สุดท้ายนี้ทางผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา ที่คอยสนับสนุนและส่งเสริมในการเรียนต่อระดับปริญญาโทมาโดยตลอด ทั้งทางด้านการเงินและกำลังใจเสมอมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่	
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำทั่วไป	1
1.2 ที่มาของปัญหา	1
1.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2
1.4 ขอบข่ายงานวิจัย	2
บทที่ 2 การเกิดวาบไฟตามผิวและเจาะทะลุลูกถ้วยฉนวน	3
2.1 ลักษณะเส้นแรงดันเวลา	3
2.1.1 ลักษณะเส้นแรงดันเวลาของฉนวนอากาศและฉนวนแข็ง	4
2.2 การประสานสัมพันธ์การฉนวนของฉนวนภายนอกกับฉนวนภายใน	5
2.3 การเกิดเบรกดาวนในฉนวนแข็ง	6
2.3.1 การเกิดเบรกดาวนแบบบริสุทธ์หรือแบบไอออนิค	7
2.3.2 การเกิดเบรกดาวนเนื่องจากแรงกลไฟฟ้า	8
2.3.3 การเกิดเบรกดาวนแบบสตรีมเมอร์	9
บทที่ 3 ลูกถ้วยฉนวน	10
3.1 ลูกถ้วยแขวน	10
3.2 ลูกถ้วยฉนวนเนื่อพอร์ซเลน	11

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.1 พอร์ชเลนชนิดธรรมดา	12
3.2.2 พอร์ชเลนชนิดอะลูมินา	13
3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อความคงทนทางกลและทางไฟฟ้าของเนื้อพอร์ชเลน	14
3.3.1 ความพรุนของเนื้อพอร์ชเลน	14
3.3.2 ขนาดของส่วนผสมเนื้อพอร์ชเลน	15
3.3 กระบวนการผลิตลูกถ้วยฉนวนพอร์ชเลน	19
3.4 ลูกถ้วยในโครงการวิจัย	17
3.4.1 ลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4	17
3.4.2 ลูกถ้วยแขวนคู่คอดตัน	18
3.5 ลักษณะสมบัติทางมิติของลูกถ้วยฉนวน	19
บทที่ 4 การออกแบบสร้างลูกถ้วยแขวนคู่คอดตัน	20
4.1 การออกแบบเพื่อแก้ปัญหาเจาะทะลุ	20
4.2 เงื่อนไขของการออกแบบ	21
4.3 มิติที่ออกแบบของลูกถ้วยแขวนคู่คอดตัน	23
4.3.1 ข้อกำหนดในการเลือกมิติ	23
4.3.2 ผลการออกแบบตามข้อกำหนด	25
4.3.3 ผลการออกแบบลูกถ้วยแขวนคู่คอดตันตาม IEC Publ. No. 815	26
4.4 ลักษณะแรงดันกระจาย	26
4.4.1 ความเครียดสนามไฟฟ้ากระจายบนผิวลูกถ้วย	26
4.4.2 การจำลองแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	27
4.4.3 ผลการจำลองแบบลูกถ้วยแขวนธรรมดาและลูกถ้วยแขวนคู่คอดตัน	29
4.4.4 ผลการจำลองแบบเปรียบเทียบระหว่างลูกถ้วยแขวนธรรมดา 2 ลูกต่อกัน กับลูกถ้วยแขวนคู่คอดตันต้นแบบ และลูกถ้วยแขวนคู่คอดตันแบบสอง ...	32
บทที่ 5 การทดสอบและวิเคราะห์ผล	38
5.1 การทดสอบเฉพาะแบบ	38
5.1.1 มาตรฐาน ANSI C29.1(1988) การทดสอบเฉพาะแบบสำหรับลูกถ้วย แขวนประเภท B	40

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1.2 มาตรฐาน IEC 383-1993-04 การทดสอบเฉพาะแบบสำหรับลูกถ้วย แขนประเภท A	40
5.2 การทดสอบรูปร่างและมิติ	40
5.3 การทดสอบวาบไฟตามผิว	42
5.3.1 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการวาบไฟตามผิว 50Hz ในสภาวะแห้ง	42
5.3.2 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต	46
5.4 การทดสอบเจาะทะลุ	51
5.4.1 ผลการทดสอบเจาะทะลุลูกถ้วยแขน ANSI Class 52-4	52
5.4.2 ผลการทดสอบเจาะทะลุลูกถ้วยแขนคู่คอดตันต้นแบบ	54
5.4.3 ผลการทดสอบเจาะทะลุลูกถ้วยแขนคู่คอดต้นแบบสอง	56
5.5 ผลการทดสอบแรงดึงทางกลลูกถ้วยแขนคู่คอดต้นแบบสอง	57
5.6 ลักษณะทางด้านน้ำหนัก	63
5.7 ผลการทดสอบอุณหภูมิฉับพลันลูกถ้วยแขนคู่คอดต้นแบบสอง	64
บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ	66
6.1 สรุป	66
6.2 ประโยชน์ที่ได้รับ	67
6.3 ข้อเสนอแนะ	67
รายการอ้างอิง	68
ภาคผนวก	70
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบวัดค่ามิติของลูกถ้วยในโครงการวิจัย	71
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบแรงดันวาบไฟตามผิว 50Hz ในสภาวะแห้ง	74
ภาคผนวก ค ตัวอย่างผลการทดสอบแรงดันวาบไฟอิมพัลส์วิกฤต 1.2/50µs	77
ภาคผนวก ง ตัวอย่างรูปคลื่นทดสอบแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นขั้น	80
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	84

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
3.1 ลูกถ้วยแขวนที่ใช้ในระบบแรงดันของการไฟฟ้า	11
3.2 คุณสมบัติทางกลของลูกถ้วยชนิดที่มีเนื้อฉนวนต่างกัน	16
3.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยชนิดที่มีเนื้อฉนวนต่างกัน	17
4.1 ลักษณะมิติลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4	23
4.2 ค่ามิติออกแบบของลูกถ้วยแขวนคู่คอดตัน	25
4.3 ค่าพารามิเตอร์ตามมาตรฐาน IEC Publ. No. 815	26
4.4 ผลค่าความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวเนื้อพอร์ซเลนที่คำนวณได้	29
5.1 ค่ามิติของลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 ตามมาตรฐาน ANSI C29.2	41
5.2 สรุปผลการตรวจสอบค่ามิติของลูกถ้วยต่างๆ	42
5.3 สรุปผลทดสอบแรงดันวาทไฟตามผิว 50Hz ในสภาวะแห้งของลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 สองลูกต่อกันครั้งที่ 1	43
5.4 สรุปผลทดสอบแรงดันวาทไฟตามผิว 50Hz ในสภาวะแห้งของลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 สองลูกต่อกันครั้งที่ 2 (Revision)	44
5.5 สรุปผลการทดสอบค่าวาทไฟตามผิว 50Hz ในสภาวะแห้งของลูกถ้วยแขวนคู่คอดตันต้นแบบครั้งที่ 1	44
5.6 สรุปผลการทดสอบค่าวาทไฟตามผิว 50Hz ในสภาวะแห้งของลูกถ้วยแขวนคู่คอดตันต้นแบบครั้งที่ 2 (Revision)	44
5.7 สรุปผลการทดสอบค่าวาทไฟ 50Hz ในสภาวะแห้งของลูกถ้วยแขวนคู่คอดตันแบบสอง ...	45
5.8 สรุปผลการทดสอบค่าวาทไฟ 50Hz ในสภาวะแห้งของลูกถ้วยแขวนคู่คอดตันแบบสอง (Revision)	45
5.9 สรุปผลทดสอบค่าวาทไฟอิมพัลส์วิกฤต 1.2/50 μ s ขั้วลบของลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 สองลูกต่อกัน	48
5.10 สรุปผลทดสอบค่าวาทไฟอิมพัลส์วิกฤต 1.2/50 μ s ขั้วบวกของลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 สองลูกต่อกัน	48
5.11 สรุปผลทดสอบค่าวาทไฟอิมพัลส์วิกฤต 1.2/50 μ s ขั้วลบของลูกถ้วยแขวนคู่คอดตันแบบสอง	49

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
5.12 สรุปผลทดสอบค่าวาทไฟอิมพัลส์วิกฤต 1.2/50 μ s ขั้วบวกของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสอง	49
5.13 สรุปผลทดสอบค่าวาทไฟอิมพัลส์วิกฤต 1.2/50 μ s ของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันต้นแบบ	50
5.14 สรุปผลการทดสอบเจาะทะลุของลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 ด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน(จำนวนลูกถ้วยทดสอบ 30ลูก)	54
5.15 สรุปผลการทดสอบเจาะทะลุของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันต้นแบบ(จำนวนลูกถ้วย 3ลูก)	54
5.16 สรุปผลการทดสอบเจาะทะลุของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสอง	57
5.17 ค่ากำหนดแรงดึงทางกลของลูกถ้วยแขวนคอดันยาวตาม IEC 433,1998	58
5.18 สรุปผลการทดสอบแรงดึงทางกลของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองครั้งที่ 1	59
5.19 สรุปผลการทดสอบแรงดึงทางกลของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองครั้งที่ 2	61
5.20 เปรียบเทียบน้ำหนักระหว่างลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 ลูกถ้วยแขวนคู่คอดันต้นแบบ และลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสอง	63
5.21 ค่าพิกัดอุณหภูมิของการทดสอบอุณหภูมิฉับพลันตามมาตรฐาน ANSI	64
5.22 สรุปผลการทดสอบอุณหภูมิฉับพลันของลูกถ้วยของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสอง	65

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 ลักษณะเส้นแรงดันเวลาของแรงดันอิมพัลส์	3
2.2 กราฟลักษณะแรงดันเวลาของลูกถ้วยฉนวน	4
2.3 ตัวอย่างเส้นลักษณะแรงดันเวลาของลูกถ้วยแขวน	5
2.4 ประเภทลูกถ้วยฉนวนตามมาตรฐาน IEC Publ. No. 383-1, 1993	6
2.5 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนแข็งแปรตามช่วงเวลาป้อนแรงดัน	7
2.6 ภาพแถบวาเลนซ์และแถบนำไฟฟ้าของฉนวนโดยจะมีแถบของจุดบกพร่องแทรกอยู่	8
3.1 ลูกถ้วยแขวนชนิดพอร์ซเลนที่ใช้ในระบบสายส่งแรงสูงภายในประเทศ	10
3.2 ผังแสดงส่วนผสมของสารทำลูกถ้วยพอร์ซเลน	12
3.3 ภาพถ่ายจุลทรรศน์ของเนื้อพอร์ซเลนแบบอะลูมินา (x 10,000)	13
3.4 ภาพจำลองโครงสร้างเนื้อพอร์ซเลนที่ยังมีส่วนผสมบางชนิดหลงเหลืออยู่	14
3.5 พวงลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 เจาะทะลุหลังจากได้รับแรงดันเกินเสิร์จฟ้าผ่า	18
3.6 แบบลูกถ้วยที่ใช้ศึกษาวิจัยในโครงการนี้	18
3.7 ลักษณะทางมิติของลูกถ้วยแขวน	19
4.1 ตัวอย่างลูกถ้วยเมื่อได้รับแรงดันเกินเสิร์จฟ้าผ่า	20
4.2 กราฟลักษณะแรงดันเวลาของลูกถ้วยฉนวน	21
4.3 แบบลูกถ้วยที่ใช้ศึกษาวิจัย	22
4.4 ลักษณะปีกตามมาตรฐาน IEC Publ. No. 815	24
4.5 ภาพหน้าตัดหัวครอบโลหะตาม IEC Publ. No. 575	25
4.6 เส้นค้ำยันไฟฟ้าเท่าของลูกถ้วยแขวน	27
4.7 แบบจำลองลูกถ้วยที่ใช้ในการหารูปแบบที่เหมาะสม	28
4.8 (ก) แบบจำลองลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4, (ข) เส้นค้ำยันไฟฟ้าเท่าของลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4	30
4.9 กราฟความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวเจาะทะลุ 1	31
4.10 กราฟความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวเจาะทะลุ 2	31
4.11 (ก) แบบจำลองลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 สองลูกต่อกัน, (ข) เส้นค้ำยันไฟฟ้าเท่า ของลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 สองลูกต่อกัน	32

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.12 กราฟความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวอาร์กของแบบจำลองลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 สองลูกต่อกัน	33
4.13 (ก) แบบจำลองลูกถ้วยแขวนคู่คอดตันต้นแบบ, (ข) เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าของลูกถ้วยแขวนคู่คอดตันต้นแบบ (ค) ภาพขยายเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าบริเวณหัวครอบแรงสูง	34
4.14 (ก) แบบจำลองลูกถ้วยแขวนคู่คอดตันแบบสอง, (ข) เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าของลูกถ้วยแขวนคู่คอดตันแบบสอง (ค) ภาพขยายเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าบริเวณหัวครอบแรงสูง	34
4.15 กราฟความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวอาร์กของลูกถ้วยแขวนคู่คอดตันแบบแรก	35
4.16 กราฟความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวอาร์กของลูกถ้วยแขวนคู่คอดตันแบบสอง	35
4.17 กราฟความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวเจาะทะลุของลูกถ้วยแขวนคู่คอดตันแบบแรก	36
4.18 กราฟความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวเจาะทะลุของลูกถ้วยแขวนคู่คอดตันแบบสอง	36
5.1 ลูกถ้วยที่ใช้ในการศึกษาวิจัย	39
5.2 ลักษณะรูปร่างมิติของลูกถ้วย	41
5.3 วงจรทดสอบแรงดันวาทไฟตามผิวความถี่ 50 Hz ในสภาวะแห้ง	43
5.4 การทดสอบวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต 1.2/50 μ s	47
5.5 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน 1.2/50 μ s	50
5.6 วงจรทดสอบแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน	52
5.7 กราฟแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันของลูกถ้วยแขวน ANSI Cl. 52-4 ที่ความชัน 2,500 kV/ μ s	53
5.8 ลักษณะลูกถ้วยแขวน ANSI Cl. 52-4 ที่เกิดการเจาะทะลุที่ความชัน 2,500 kV/ μ s	53
5.9 กราฟแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันของลูกถ้วยแขวนคู่คอดตันต้นแบบ ทดสอบที่ความชัน 10,000 kV/ μ s	55
5.10 ลักษณะการติดตั้งลูกถ้วยแขวนคู่คอดตัน	55
5.11 กราฟแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันของลูกถ้วยแขวนคู่คอดตันแบบสอง ทดสอบที่ความชัน 10,000 kV/ μ s	56
5.12 ลักษณะผิวลูกถ้วยแขวนคู่คอดตันแบบสองหลังการทดสอบเจาะทะลุ	56
5.13 ส่วนประกอบโลหะยึดลูกถ้วยตามมาตรฐาน IEC Publ. No. 471, 1977	57
5.14 ลูกถ้วยแขวนคู่คอดตันประกอบที่ยึดโลหะเข้ากับเครื่องตั้งแรงกลขนาดพิกัด 40 ตัน	59

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
5.15 ลักษณะการแตกตัวของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองหลังการทดสอบแรงดึงทางกล ครั้งที่ 1	60
5.16 ลักษณะลูกถ้วยหลังการทดสอบแรงดึงทางกลครั้งที่ 2	62
5.17 ลักษณะหัวครอบโลหะลูกถ้วยหลังการทดสอบแรงดึงทางกล	62
5.18 การทดสอบอุณหภูมิฉับพลัน	65



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำทั่วไป

ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง (High voltage transmission lines system) โดยทั่วไปจะทำการติดตั้งแบบซึ่งสายในอากาศกลางแจ้ง (Overhead lines) ซึ่งอาจมีสายดินซึ่งป้องกันฟ้าผ่า (Overhead ground wires) หรือไม่มีเนื่องจากใช้ระบบป้องกันฟ้าผ่าแบบอื่น เช่นใช้กับดักฟ้าผ่า หรือ เป็นบริเวณที่มีสถิติฟ้าผ่าเกิดขึ้นน้อยครั้งมาก ลูกถ้วยฉนวน (Insulator) มีหลากหลายประเภท หลายขนาด ที่นำมาติดตั้งยึดสายตัวนำเข้ากับเสาสายส่ง ลูกถ้วยฉนวนที่ใช้ในระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงแบบนี้มีหน้าที่หลักคือ รับน้ำหนักของสายตัวนำและรับแรงดึงทางกลจากแนวต่างๆ ซึ่งมีอากาศเป็นฉนวนภายนอก ในลักษณะการติดตั้งบางกรณีบางตำแหน่งจะทำการติดตั้งเป็นลักษณะยึดปลายสาย (Dead end) เพื่อให้มีความอ่อนตัวต่อการติดตั้งมากขึ้น ลูกถ้วยฉนวนที่ใช้ในระบบของการไฟฟ้าฯ มักจะใช้ลูกถ้วยชนิดพอร์ซเลน (Porcelain) หรือ ชนิดแก้ว ส่วนเนื้อวัสดุชนิดสารอินทรีย์ หรือชนิดสารประกอบ (Composite) ยังไม่นิยมใช้ เนื่องจากสภาพภูมิอากาศของประเทศไทยไม่เหมาะสมต่อการนำมาติดตั้งใช้งาน ในระบบจำหน่ายจะใช้ลูกถ้วยแบบรับสายพาดผ่านเช่น ลูกถ้วยแท่ง (Post-type) และ ลูกถ้วยก้านตรง (Pin-type) ส่วนลูกถ้วยแขวน (Cap and pin insulator) จะใช้ในการยึดปลายสาย ยิ่งกว่านั้นเพื่อลดระดับพลังงานสูญเสียในสายส่ง ระดับแรงดันของระบบไฟฟ้าจึงมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้จำเป็นต้องใช้ลูกถ้วยแขวนจำนวนมากขึ้นตามระดับแรงดันระบบที่เพิ่มขึ้นนั้นด้วย

1.2 ที่มาของปัญหา

ลูกถ้วยฉนวนที่ใช้ในระบบสายซึ่งอากาศกลางแจ้งปกติจะได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าจากแรงดันกระแสสลับความถี่ต่ำ (Low frequency voltages) หรือบางครั้งอาจได้รับแรงดันเกินทราเนียนเซียนท์ (Transient overvoltages) แรงดันเกินทราเนียนเซียนท์อาจจะแบ่งออกเป็น แรงดันเกินหน้าคลื่นชันต่ำ (Slow-front overvoltages) ส่วนใหญ่เกิดเนื่องจากการสวิตชิงระบบไฟฟ้า และแรงดันเกินหน้าคลื่นชันสูง (Fast-front overvoltages) หรือแรงดันเกินหน้าคลื่นชันสูงมาก (Very fast-front overvoltages or Steep-front overvoltages) เกิดจากแรงดันเกินเสิร์จฟ้าผ่า ลูกถ้วยฉนวนประเภท B [1] ที่ใช้งานในระบบไฟฟ้าแรงสูงเมื่อทำการติดตั้งใช้งานไประยะหนึ่งพบว่า ลูกถ้วยฉนวนเกิดการเจาะทะลุ ซึ่งสันนิษฐานว่าได้รับแรงดันเกินเสิร์จฟ้าผ่าที่มีหน้าคลื่นชัน ส่งผลให้ลูกถ้วยฉนวนเสียสภาพการฉนวนอย่างถาวร เพราะการเจาะทะลุเป็นผลมาจากลูกถ้วยฉนวนได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าที่มีค่าสูงกว่า ค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของเนื้อฉนวนลูกถ้วยนั่นเอง

ดังนั้นจากปัญหาที่กล่าวไว้ข้างต้นจึงเห็นสมควรทำการศึกษาวิจัยการออกแบบและสร้าง ลูกถ้วยแขวนคู่คอดันสำหรับแก้ปัญหาคารเจาะทะลุนี้ขึ้น

1.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1) หน่วยปฏิบัติการวิจัยไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ทำการพัฒนาออกแบบ และสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันที่มีความชันตั้งแต่ 1,000 kV/ μ s ถึง 10,000 kV/ μ s [2] โดยใช้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50 μ s ขนาด 1,000 kV 30 kJ [3] เป็นตัวจ่ายให้กับวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันด้วยวิธีตัดรูปคลื่นด้วยสปาร์กแก๊ป ขึ้นได้สำเร็จในราวปี พ.ศ. 2537 เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยและวิเคราะห์ปัญหาการเกิดเจาะทะลุของ ลูกถ้วยฉนวน และสามารถใช้ในการทดสอบเจาะทะลุ (Puncture test) ตามมาตรฐานสากล [4,5,6] ได้

2) ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านทางเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ทำการศึกษาผลของแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันที่มีต่อลูกถ้วยฉนวนประเภท B ได้แก่ ลูกถ้วยแขวนและลูกถ้วยก้านตรง พบว่าแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันมีผลทำให้ลูกถ้วยฉนวนเกิดการเจาะทะลุได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าความชันรูปคลื่น จำนวนครั้งแรงดันที่ลูกถ้วยได้รับ ขนาดแรงดัน ชั่วแรงดัน และระยะเวลาที่แรงดันผ่านลูกถ้วยฉนวน [7]

1.4 ขอบข่ายงานวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการออกแบบและสร้างลูกถ้วยแขวนคู่คอดันสำหรับใช้แก้ปัญหาคารเจาะทะลุของลูกถ้วยฉนวนในระบบไฟฟ้าแรงสูง รวมทั้งศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันที่ออกแบบขึ้นมา และเป็นต้นแบบหรือเป็นแนวทางเริ่มในการพัฒนาเป็นอุตสาหกรรมการผลิตที่ออกแบบในประเทศต่อไป โดยมีขอบข่ายงานวิจัยดังนี้

1) ทำการศึกษาลักษณะรูปร่างมิติลูกถ้วยแขวนคู่คอดัน และออกแบบอิงตาม IEC Publ. No. 815 [8] และศึกษาลักษณะการกระจายแรงดันด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ [9]

2) ทำการทดสอบหาลักษณะสมบัติของลูกถ้วยแขวนคู่คอดัน ตาม IEC Publ. No. 383-1 [1] และ ANSI C29.1 [10]

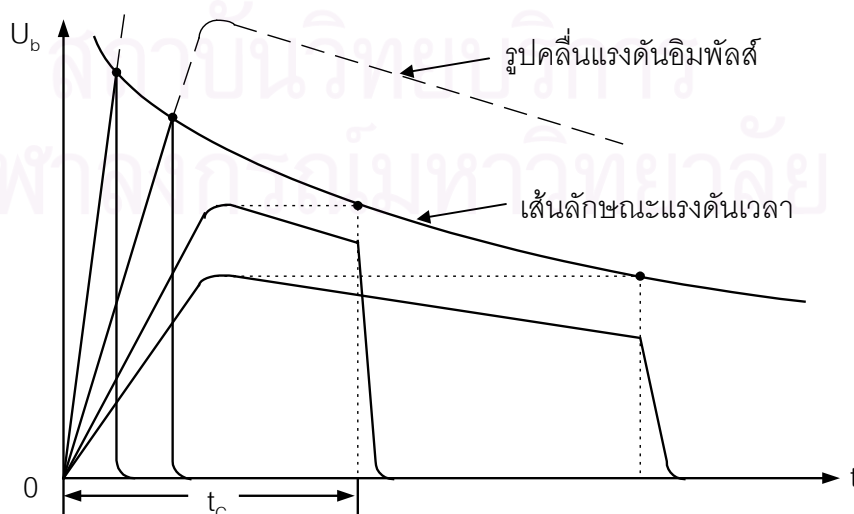
บทที่ 2

การเกิดวาบไฟตามผิวและเจาะทะลุฉนวนด้วยฉนวน

การออกแบบฉนวนด้วยฉนวนที่ดีเมื่อได้รับแรงดันเกินจะทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวได้ง่ายกว่า การเกิดเจาะทะลุ เพราะการเกิดเจาะทะลุย่อมหมายถึงการสูญเสียสภาพการฉนวนอย่างถาวร ดังนั้นจึงควรศึกษาถึงกลไกการเกิดเบรกดาวนซ์ของฉนวนก๊าซ และของแข็ง เนื่องจากฉนวนด้วยฉนวน เป็นของแข็งซึ่งมีอากาศเป็นฉนวนอยู่ภายนอกโดยรอบผิว ซึ่งการเกิดเบรกดาวนซ์จะเจาะทะลุ เนื้อฉนวนแข็งหรือวาบไฟตามผิวผ่านอากาศโดยรอบอาจอธิบายได้ด้วยลักษณะแรงดันเวลา

2.1 ลักษณะเส้นแรงดันเวลา (Voltage time characteristics)

ลักษณะเส้นแรงดันเวลาเป็นเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวนซ์ กับเวลาคลื่นตัด(Chopped time) t_c ของฉนวน ในกรณีของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า เมื่อพิจารณาถึงลักษณะเส้นแรงดันเวลา จะเห็นว่า ถ้าขนาดแรงดันค่ายอดมีค่าสูงขึ้นความชัน รูปคลื่นจะสูงขึ้น ความเครียดสนามไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้น ช่วงเวลาที่ทำให้เกิดเบรกดาวนซ์จะสั้นลง หรือ t_c จะน้อยลง เพราะว่าเวลาที่พอจะเวลานั้นสั้น ถ้าขนาดแรงดันที่ป้อนยังมีค่าสูงมากๆ ความชัน ยิ่งสูงมากขึ้น t_c ก็ยิ่งน้อย นั่นคือ เวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวนซ์(Time lag) ก็จะมีน้อยลง หรือ กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ความคงทนของฉนวนต่อแรงดันอิมพัลส์จะมีค่าสูงขึ้นถ้าความชันของแรงดัน อิมพัลส์เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเป็นไปตามลักษณะสมบัติของเส้นแรงดัน-เวลา ฉะนั้นลักษณะความคงทน ของการฉนวนต่อแรงดันเสิร์จที่มีความชันต่างๆกัน จะเป็นไปตามลักษณะเส้นแรงดันเวลาดังแสดง ในรูปที่ 2.1 [11]

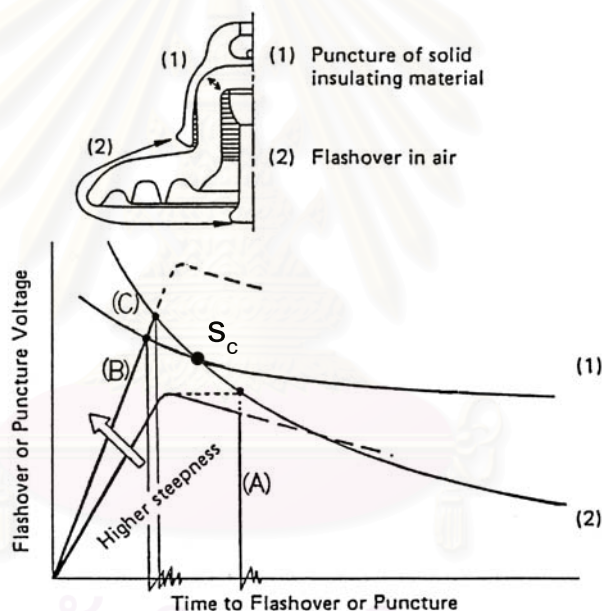


รูปที่ 2.1 ลักษณะเส้นแรงดันเวลาของแรงดันอิมพัลส์ [11]

ซึ่งแสดงถึงช่วงระยะเวลาต่างๆของแรงดัน หรือรูปคลื่นแรงดันที่ต่างกัน ได้แก่แรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าที่หน้าคลื่นความชันต่ำ แรงดันอิมพัลส์สวิตช์ซึ่งแบบเร็วและแบบช้า

2.1.1 ลักษณะเส้นแรงดันเวลาของฉนวนอากาศและฉนวนแข็ง

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเบรกดาวนในฉนวนแข็งของลูกถ้วยฉนวนที่สำคัญมีสองประการคือ ประการแรกขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันและความชันของแรงดันอิมพัลส์ซึ่งเป็นไปตามลักษณะเส้นแรงดันเวลาของลูกถ้วยฉนวน [12] ดังรูปที่ 2.2 เส้นโค้ง(1) เป็นลักษณะเส้นแรงดันเวลาของเนื้อฉนวนแข็ง ส่วนเส้นโค้ง(2) เป็นลักษณะเส้นแรงดันเวลาของอากาศที่หุ้มผิวลูกถ้วยฉนวนเมื่อแรงดันอิมพัลส์ที่มีความชันต่ำจะเกิดวาบไฟตามผิวในอากาศดังเช่นในกรณี(A)

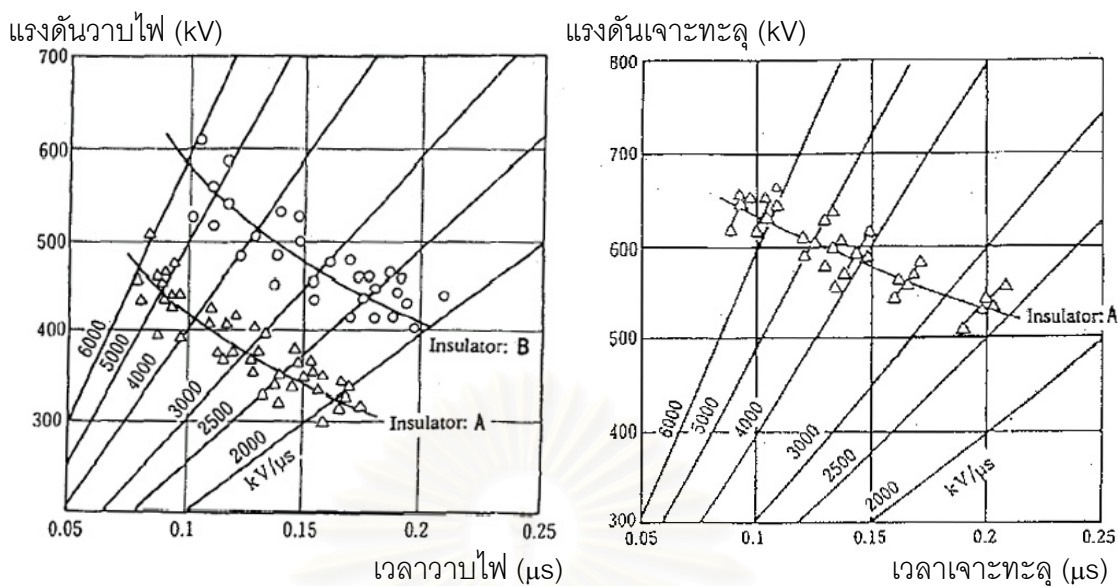


(1) เจาะทะลุผ่านเนื้อฉนวนลูกถ้วย

(2) วาบไฟตามผิวผ่านฉนวนอากาศ

รูปที่ 2.2 กราฟลักษณะแรงดันเวลาของลูกถ้วยฉนวน [12]

แต่ถ้าหากแรงดันอิมพัลส์มีความชันเพิ่มสูงขึ้นเลยจุดตัดกันระหว่างลักษณะเส้นแรงดันเวลาของฉนวนอากาศกับฉนวนแข็งอาจทำให้เกิดเจาะทะลุในเนื้อฉนวนแข็งได้ก่อนที่จะเกิดวาบไฟตามผิวดังเช่นในกรณี(B) นั่นคือปัจจัยประการที่สองที่มีผลต่อการเกิดเบรกดาวนในฉนวนแข็งขึ้นอยู่กับความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของเนื้อฉนวน อย่างไรก็ตามลักษณะเส้นแรงดันเวลายังขึ้นอยู่กับรูปแบบของลูกถ้วยฉนวน [13] ดังแสดงดังรูปที่ 2.3



ก. ฉนวนอากาศ

ข. ฉนวนแข็ง

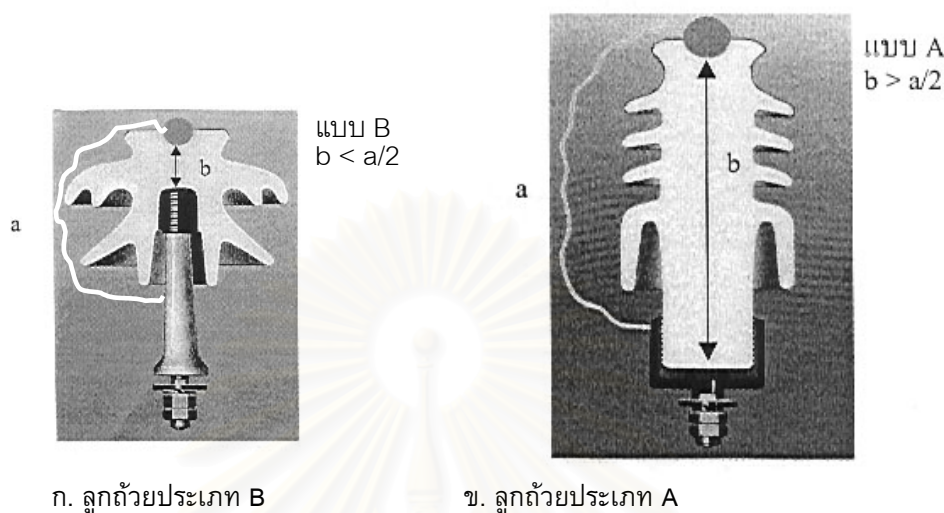
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างเส้นลักษณะแรงดัน-เวลาของลูกถ้วยฉนวน [13]

ลูกถ้วยแบบ B ที่ระบุในรูปกราฟที่ 2.3 ก. มีค่าระยะรั้ว (Leakage distance) ที่ยาวมากกว่า ลูกถ้วยแบบ A ส่งผลให้มีค่าแรงดันวาทไฟสูง เส้นลักษณะแรงดัน-เวลาจึงสูงกว่า และจะเห็นได้ว่า ยิ่งความชื้นสูงขึ้นค่าแรงดันวาทไฟจะยิ่งสูงขึ้น แต่เวลาวาทไฟจะสั้นลง ส่วนเส้นแรงดัน-เวลาของ ฉนวนแข็งเป็นดังรูปกราฟที่ 2.3 ข. เมื่อค่าความชื้นสูงขึ้นเวลาเจาะทะลุจะสั้นลง ถ้าทำการสังเกต จะพบว่า เมื่อนำเส้นลักษณะแรงดัน-เวลาของการวาทไฟและการเจาะทะลุมาซ้อนกันก็จะเป็นตาม รูปที่ 2.2 ที่กล่าวไว้ข้างต้น

2.2 การประสานสัมพันธ์การฉนวนของฉนวนภายนอกกับฉนวนภายใน

การออกแบบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าโดยปกติจะให้เกิดวาทไฟตามผิว ซึ่งเป็นฉนวนภายนอก ได้ง่ายกว่าการเบรกดาวนในเนื้อฉนวนแข็งซึ่งเป็นฉนวนภายใน [14] เนื่องจากการเกิดเบรกดาวนในเนื้อฉนวนแข็งเป็นการเสียสภาพการฉนวนอย่างถาวรไม่สามารถกลับคืนเป็นฉนวนได้อย่างเดิม เหมือนฉนวนภายนอกที่เป็นอากาศ เงื่อนไขดังกล่าวอาจทำได้ง่ายสำหรับกรณีแรงดันกระแสตรง หรือแรงดันกระแสสลับความถี่พลังงานหรือแรงดันอิมพัลส์ปกติ แต่ในกรณีแรงดันอิมพัลส์ที่มีหน้าคลื่นสั้น เวลาของสนามไฟฟ้าสั้นจะยังไม่เกิดเบรกดาวนในอากาศที่เป็นฉนวนภายนอกด้วยเหตุผลของเวลาล่าช้า ยิ่งไปกว่านั้นถ้าหากลูกถ้วยที่มีความหนาของเนื้อฉนวนตามแนวระยะเจาะทะลุ ผ่านเนื้อฉนวนแข็งน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของระยะวาทไฟตามผิวหรือเป็นลูกถ้วยฉนวนประเภท B [1]

ดังรูปที่ 2.4 ยังมีโอกาสเกิดเจาะทะลุได้ง่ายขึ้นถ้าหากสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจนถึงค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตที่ฉนวนแข็งของลูกถ้วยฉนวนจะสามารถทนได้ก็จะเกิดเบรกดาวนทันทีซึ่งใช้เวลาน้อยมาก



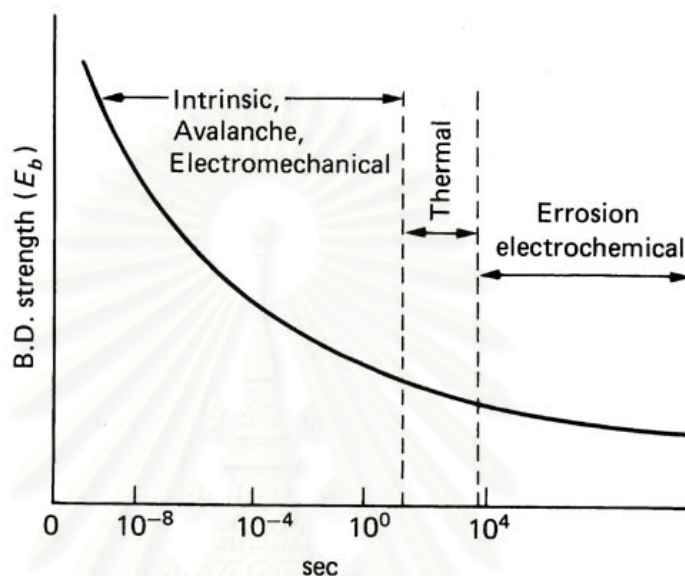
รูปที่ 2.4 ประเภทลูกถ้วยฉนวนตามมาตรฐาน IEC 383-1, 1993 [1]

2.3 การเกิดเบรกดาวนในฉนวนแข็ง

ในระบบไฟฟ้ามักจะใช้ฉนวนแข็งทำหน้าที่ยึดและรองรับแรงกลในขณะใช้งาน ฉนวนแข็งจึงเป็นฉนวนที่สำคัญในระบบและอุปกรณ์ไฟฟ้า การเกิดเบรกดาวนในฉนวนแข็งจะต่างไปจากการเกิดเบรกดาวนในฉนวนก๊าซ เนื่องจากฉนวนก๊าซสามารถกลับคืนสู่สภาพการฉนวนได้ดั้งเดิมภายในเวลาอันรวดเร็วหลังจากการเกิดเบรกดาวน แต่ฉนวนแข็งเมื่อเกิดเบรกดาวนจะเสียสภาพการฉนวนอย่างถาวร ใช้งานอีกไม่ได้ การเกิดเบรกดาวนในฉนวนแข็งอาจจะแบ่งออกตามช่วงเวลาของแรงดันที่ป้อนและรูปแบบของการเกิดเบรกดาวนได้ดังนี้ [15] คือ

- 1) เบรกดาวนแบบบริสุทธ์หรือแบบไอออนิก
- 2) เบรกดาวนเนื่องจากแรงกลไฟฟ้า
- 3) เบรกดาวนแบบสตรีมเมอร์
- 4) เบรกดาวนแบบเทอร์มัล
- 5) เบรกดาวนเนื่องจากผลทางเคมี
- 6) เบรกดาวนเนื่องจากดีสชาร์จภายใน

กระบวนการเกิดเบรกดาวนแบบต่าง ๆ จะเกิดในช่วงเวลาต่างกัันดังรูปที่ 2.5 จะพบว่า การเกิดเบรกดาวนแบบบริสุทธิ์หรือไอออนิก , แรงกลไฟฟ้าและสตรีมเมอร์ มีโอกาสเกิดโดยใช้เวลาในการเบรกดาวนน้อยมากในหน่วยนาโนวินาที ซึ่งสอดคล้องกับช่วงเวลาการเกิดเจาะทะลุในลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนที่ได้ทำการทดลอง ดังนั้นจึงขออธิบายเฉพาะการเกิดเบรกดาวนดังกล่าว

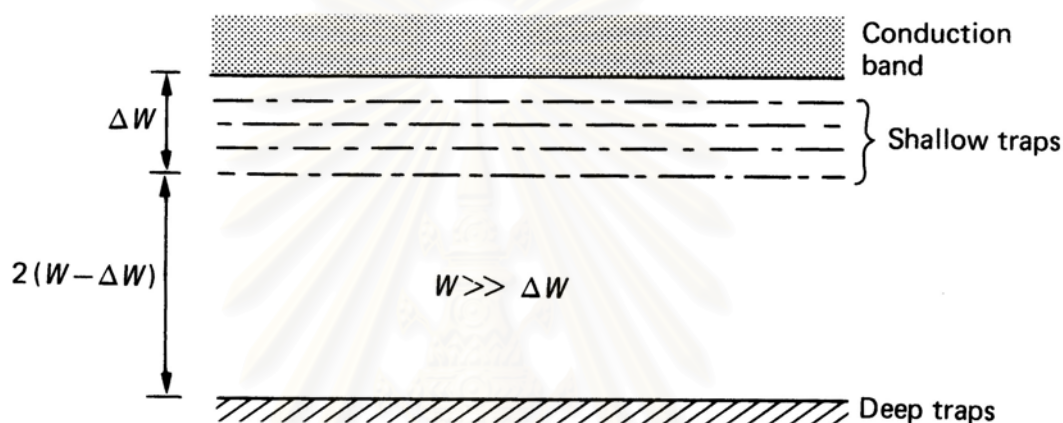


รูปที่ 2.5 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนแข็งแปรตามช่วงเวลาป้อนแรงดัน [15]

2.3.1 การเกิดเบรกดาวนแบบบริสุทธิ์หรือแบบไอออนิก

การเกิดเบรกดาวนแบบบริสุทธิ์หมายถึงการเกิดเบรกดาวนจากการป้อนแรงดันที่มีช่วงระยะเวลาสั้นมาก คือ ราว 0.01 ไมโครวินาที [11] และสนามไฟฟ้ามักมีค่าไม่ต่ำกว่า 10^6 V/cm [15] โดยที่เนื้อฉนวนมีความบริสุทธิ์ไม่มีสิ่งเจือปนและมีเนื้อเดียวสม่ำเสมอ (Homogenous) การเกิดเบรกดาวนแบบบริสุทธิ์ในฉนวนแข็งเป็นกระบวนการที่อิเล็กตรอนในฉนวนแข็งได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าที่มากเพียงพอที่ป้อนให้กับฉนวนแข็งทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานเพียงพอที่จะกระโดดข้ามช่องพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปสู่แถบนำไฟฟ้า ซึ่งเงื่อนไขได้จากสมการสมดุลพลังงานระหว่างอิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าที่ป้อนกับพลังงานที่สูญเสียให้กับแลตทิซ แถบนำไฟฟ้าและแถบวาเลนซ์จะแยกห่างจากกันด้วยช่องว่างพลังงานแถบ ที่อุณหภูมิห้องอิเล็กตรอนมีพลังงานไม่เพียงพอที่ผ่านแถบวาเลนซ์ไปสู่แถบนำไฟฟ้าได้ จึงไม่มีความนำไฟฟ้าคือเป็นฉนวนอย่างสมบูรณ์ การเกิดเบรกดาวนลักษณะนี้จะต้องอาศัยการเพิ่มจำนวนของอิเล็กตรอนอิสระแบบทวีคูณเท่านั้น [15]

โดยทั่วไปไม่มีฉนวนใดจะมีความบริสุทธิ์ไร้สิ่งเจือปน 100% ดังนั้นในฉนวนแข็งจะมีสิ่งเจือปนอยู่ อาจจะถูกอยู่ในโครงผลึกหรือภายในโครงผลึกเองมีความบกพร่องโดยขาดอะตอมบางจุดในโครงผลึก สิ่งเจือปนหรือความบกพร่องภายในโครงผลึกเหล่านี้เป็นตัวสร้างระดับพลังงานย่อยระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบนำไฟฟ้า ทำให้ระยะห่างระหว่างแถบวาเลนซ์ของสารเจือปนกับแถบนำไฟฟ้าห่างกันไม่มากนัก ดังรูปที่ 2.6 ดังนั้นอิเล็กตรอนได้รับพลังงานไม่มากนักก็สามารถขึ้นไปอยู่แถบนำไฟฟ้าได้ ส่งผลให้ฉนวนแข็งเริ่มนำกระแสไฟฟ้าตามมา ถ้าหากจำนวนอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนำไฟฟ้ามีมากพอจะทำให้ฉนวนแข็งนำไฟฟ้าและเกิดเบรกดาวนขึ้น



รูปที่ 2.6 ภาพแถบวาเลนซ์และแถบนำไฟฟ้าของฉนวนโดยจะมีแถบของจุดบกพร่องแทรกอยู่ [15]

สารประเภทที่มีโครงสร้างเป็นแบบผลึกจะเกิดเบรกดาวนตามแนวที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมน้อยที่สุดซึ่งมักจะสังเกตเห็นว่าร่องรอยของการเกิดเบรกดาวนในฉนวนจะไม่ใช่เส้นตรง[11]

2.3.2 การเกิดเบรกดาวนเนื่องจากแรงกลไฟฟ้า

สนามไฟฟ้าที่ป้อนให้กับฉนวนแข็งนอกจากจะทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานเพิ่มขึ้นแล้วยังจะทำให้เกิดแรงอัดระหว่างด้านของฉนวน เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากบริเวณผิวของฉนวนแข็งจะมีประจุอยู่ทั้งสนามไฟฟ้าเข้าและสนามไฟฟ้าออก จึงเกิดแรงดึงดูดขึ้นระหว่างประจุดังกล่าว ส่งผลให้เนื้อฉนวนแข็งได้รับแรงอัดตามมา ถ้าหากแรงกลไฟฟ้านี้เกินขีดจำกัดความคงทนต่อแรงอัดของฉนวนก็จะทำให้แตกสลายได้ โดยทั่วไปแรงอัดที่เกิดบนฉนวนแข็งจากสนามไฟฟ้ารวม 1MV/cm จะมีค่าหลายกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร [11]

2.3.3 การเกิดเบรกดาวนแบบสตรีมเมอร์ [11]

ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอที่ได้จากอิเล็กโตรดฝังเข้าไปในเนื้อของฉนวนแข็ง เบรกดาวนอาจเกิดขึ้นได้จากอะวาลานซ์เดี่ยวของอิเล็กตรอนที่เป็นไปในลักษณะเดียวกับทฤษฎีสตรีมเมอร์ อิเล็กตรอนที่เข้าไปในแถบนำไฟฟ้าของฉนวนที่แคโทดจะเคลื่อนที่ไปหาแอโนดและได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าขณะเคลื่อนที่ไป ถ้าพลังงานที่ได้จากสนามไฟฟ้านี้เกินค่าพลังงานไอออไนเซชันของโครงสร้างผลึก (Lattice ionizing energy) จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมโครงสร้างผลึก โดยจำนวนอิเล็กตรอนอิสระจะทวีเพิ่มขึ้นเป็นอะวาลานซ์และเบรกดาวนจะเกิดขึ้นเมื่อจำนวนอิเล็กตรอนในอะวาลานซ์มีจำนวนถึงค่าวิกฤต ในทางปฏิบัติการเกิดเบรกดาวนมักจะไม่เกิดการดีสชาร์จเพียงครั้งเดียวหรือในแนวเส้นทางเดียวแต่จะมีลักษณะเป็นแบบหลายแนวเส้นทางจากการดีสชาร์จหลายครั้ง



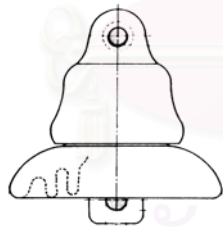
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3 ลูกถ้วยฉนวน

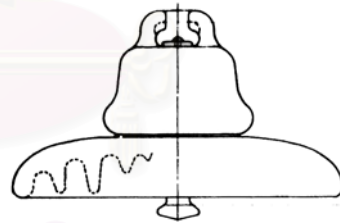
ลูกถ้วยฉนวน คือ อุปกรณ์ที่มีหน้าที่หลักใช้รับแรงทางกล และมีอากาศเป็นฉนวนภายนอก ใช้ยึดระหว่างสายตัวนำกับเสาส่ง ลูกถ้วยที่ใช้มีหลายแบบเช่น ลูกถ้วยก้านตรง ลูกถ้วยแขน ลูกถ้วยคอตันยาว และลูกถ้วยแบบอื่นๆ ในการวิจัยนี้จะขอกล่าวเฉพาะลูกถ้วยแขนเพราะเป็นลูกถ้วยที่นิยมใช้ในระบบแรงสูง มีทั้งชนิดเนื้อพอร์ซเลน และแก้วเหนียว สำหรับประเทศไทยจะนิยมใช้ลูกถ้วยแขนชนิดพอร์ซเลน เนื่องจากเป็นชนิดที่สามารถผลิตขึ้นได้เอง โดยใช้วัตถุดิบมากกว่า 85% เป็นของภายในประเทศ [17]

3.1 ลูกถ้วยแขน

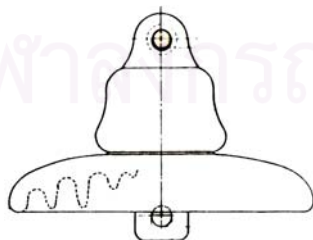
ลูกถ้วยแขนเป็นลูกถ้วยไฟฟ้าแรงสูง สามารถห้อยแขนต่อกันเป็นพวงได้ ส่วนบนของลูกถ้วยจะมีฝาครอบโลหะมีรูหรือช่อง ที่จะไปห้อยเกี่ยวกับก้านที่อยู่ด้านล่างของลูกถ้วยลูกบนได้ ลักษณะเป็นดังรูปที่ 3.1 ในกรณีที่ยึดสายไฟแรงสูงมากขึ้นจำนวนลูกถ้วยในพวงก็จะมีมากขึ้นเพื่อให้สามารถทนแรงดันได้สูงขึ้น ลักษณะและรูปร่างมิติจะออกแบบมาให้เหมาะกับระบบแรงดันใช้งาน สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.1



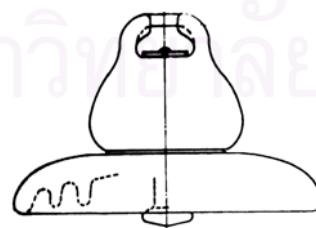
ก. ANSI CI. 52-2



ข. ANSI CI. 52-3



ค. ANSI CI. 52-4



ง. ANSI CI. 52-8

รูปที่ 3.1 ลูกถ้วยแขนชนิดพอร์ซเลนที่ใช้ในระบบสายส่งแรงสูงภายในประเทศ

ตารางที่ 3.1 ลูกถ้วยแขวนที่ใช้ในระบบแรงดันของการไฟฟ้าฯ [16]

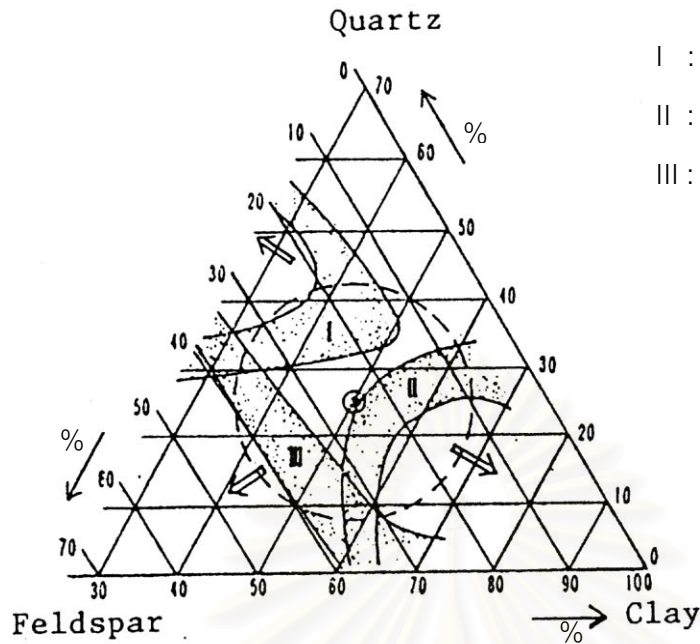
ระบบแรงดัน (kV)	ชนิดลูกถ้วย	จำนวนลูกถ้วยที่ใช้
24	ANSI Class 52-2	3
33	ANSI Class 52-4	3-4
69	ANSI Class 52-3	4
	ANSI Class 52-8	4
115	ANSI Class 52-3	7
	ANSI Class 52-8	10

3.2 ลูกถ้วยแขวนเนื้อพอร์ซเลน

การใช้งานของลูกถ้วยแขวนในขณะที่ทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้าอยู่นั้น คือต้องรับและทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันใช้งาน หรือแรงดันเกินเสิร์จที่เกิดขึ้นในระบบแล้ว ลูกถ้วยแขวนยังต้องทำหน้าที่รับแรงกล จากน้ำหนักของสายไฟ น้ำหนักของลูกถ้วยแขวนอื่นที่นำมาต่อซ้อนกันหรือห้อยต่อให้ยาวขึ้น แรงกลไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสลัดวงจร แรงลมพัดเมื่อเกิดพายุ ซึ่งแรงกลเหล่านี้มีทั้ง แรงดึง แรงกด และแรงบิด ยิ่งกว่านั้นลูกถ้วยก็ยังต้องมีความคงทนต่อความร้อนที่อาจเกิดจากแสงแดด หรือความร้อนที่เกิดจากการเกิดวาบไฟตามผิว หรือกระแสอาร์กลัดวงจร หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิบรรยากาศอย่างฉับพลัน กล่าวโดยสรุปแล้ว ลูกถ้วยแขวนที่ดี จะต้องมีความสมบัติดีทั้งทางไฟฟ้า ทางกลและทางความร้อน ลูกถ้วยแขวนจะมีความสมบัติในด้านใดก็ตามขึ้นอยู่กับส่วนผสมของสารที่นำมาประกอบเป็นลูกถ้วย กรณีของลูกถ้วยพอร์ซเลนจะมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ ดินเหนียว ดินขาว (China stone) หินฟันม้า (Felspar) หินแก้ว (Quartz) และอะลูมินา (Al_2O_3) ส่วนผสมอะไร สัดส่วนมากน้อยของสารเหล่านี้อย่างไร ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งานลูกถ้วยว่าต้องการให้มีความสมบัติเน้นในด้านใด ซึ่งอาจพิจารณาได้จากเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมดังแสดงในรูปที่ 3.2

พอร์ซเลนชนิดต่างๆสำหรับใช้ทำลูกถ้วยแขวน โดยปกติทั่วไปจะประกอบด้วยชนิดและปริมาณของผลึก (Crystal) ตามวัตถุประสงค์ที่ใช้ทำลูกถ้วย ในที่นี้จะขออธิบายเฉพาะเนื้อพอร์ซเลนที่ใช้ทั่วไปและที่ใช้ในสายการผลิต ดังต่อไปนี้ [18]

- 1) พอร์ซเลนชนิดธรรมดา (Conventional Porcelain)
- 2) พอร์ซเลนชนิดอะลูมินา (Alumina Porcelain)



- I : บริเวณความแข็งแรงทางกลสูง
- II : บริเวณความทนต่ออุณหภูมิสูง
- III : บริเวณความแข็งแรงทางไฟฟ้าสูง

รูปที่ 3.2 ผังแสดงส่วนผสมของสารทำลูกถ้วยพอร์ซเลน [18]

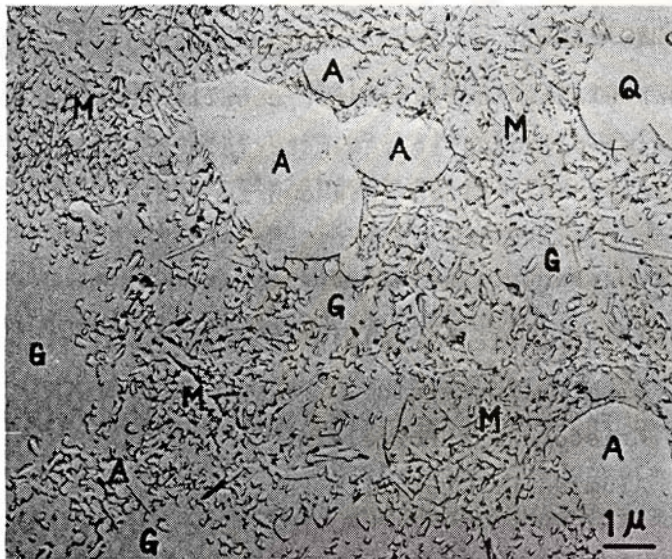
3.2.1 พอร์ซเลนชนิดธรรมดา (Conventional Porcelain)

พอร์ซเลนชนิดธรรมดาทำมาจาก ททรายแก้ว (Quartz) หินฟันม้า (Felspar) และดินเหนียว (Clay) เมื่อประกอบกันเป็นชิ้นพอร์ซเลนแล้วจึงนำไปเผาที่อุณหภูมิสูงถึง 1,200-1,300 °C โดยโครงสร้างหลังการเผาจะประกอบด้วยรูปผลึกที่มีทรายแก้ว 10-20% และมูลไคต์ 10-20% ที่เหลือจะเป็นส่วนที่ยังไม่เป็นสถานะแก้วโดยสมบูรณ์ เนื่องจากว่าผลึกทรายแก้ว (Quartz crystal) คือส่วนที่เหลือจากการหลอมละลายทรายแก้ว ในขณะที่ มูลไคต์ คือ ผลผลิตที่ได้จากการทำปฏิกิริยากันระหว่าง ดินเหนียวและหินฟันม้าที่อุณหภูมิสูง

ลักษณะสมบัติของพอร์ซเลนชนิดธรรมดานี้จะมีปริมาณของทรายแก้วที่ยังคงเหลืออยู่มาก หลังการเผา และมีขนาดเกรน (Grain) ที่หยาบในโครงผลึก พอร์ซเลนชนิดนี้มีความสามารถในการสร้างชิ้นส่วนฉนวนที่มีรูปร่างซับซ้อน หรือมีขนาดใหญ่ แต่ในทางตรงข้ามความคงทนต่อแรงทางกลยังมีค่าพิกัดไม่สูงนัก และความคงทนต่อแรงบิดในชิ้นส่วนที่นำไปทดสอบการฉาบผิวมีค่าเพียงประมาณ 600-1,000 kg/cm² ดังนั้นเนื้อวัสดุแบบนี้จึงนิยมใช้อย่างกว้างขวางในการสร้างลูกถ้วยฉนวนและบุชชิ่ง (Bushings) ที่ไม่ต้องการความคงทนสูงต่อแรงทางกล ต้นทุนต่ำ และง่ายต่อการผลิต

3.2.2 พอร์ซเลนชนิดอะลูมินา (Alumina Porcelain)

พอร์ซเลนอะลูมินาเป็นลูกถ้วยทนแรงดึงสูง (High mechanical strength) เป็นการพยายามที่จะปรับปรุงเนื้อพอร์ซเลนแบบธรรมดา โดยใช้อะลูมินา 10-40% ในส่วนผสมทั้งหมด แทนส่วนผสมทรายแก้ว โครงผลึกของเนื้อพอร์ซเลนหลังการเผาประกอบด้วย ผลึกคอร์ันดัม (Corundum crystal) 10-40% ในส่วนผลึกอื่นนอกจากคอร์ันดัมจะเป็นมุลไลต์ 8-20% และทรายแก้วน้อยกว่า 10% ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์ของเนื้อพอร์ซเลนชนิดอะลูมินาได้แสดงดังรูปที่ 3.3 [18]



- A : คอร์ันดัม
(ผลึกอะลูมินา)
- M : มุลไลต์
- Q : ควอตซ์ที่ยังเหลือ
- G : ผลึกแก้ว

รูปที่ 3.3 ภาพถ่ายจุลทรรศน์ของเนื้อพอร์ซเลนแบบอะลูมินา ($\times 10,000$) [18]

ความแข็งแรงทางกลของอะลูมินาพอร์ซเลนจะมีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพอร์ซเลนชนิดธรรมดา เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่า พอร์ซเลนอะลูมินามีเมตริกผลึกแก้วที่ทำให้แข็งแรงโดยค่ายังโมดูลัสสูง และ ความแข็งแรงที่เหมาะสมของคอร์ันดัม ยิ่งกว่านั้นคอร์ันดัมมีขนาดเกรนที่เล็กเพียง 3-5 μ และไม่เกิดการแตก (Crack) รอบๆ เกรนเช่นที่ พอร์ซเลนชนิดธรรมดามี ดังนั้นเมื่อจำนวนอะลูมินาเพิ่มและจำนวนทรายแก้วลดลง จึงส่งผลให้ความแข็งแรงของพอร์ซเลนชนิดอะลูมินามีมากขึ้น การทดสอบความคงทนต่อแรงบิดบนชิ้นส่วนที่มีสารเคลือบผิวระบุถึงค่าความแข็งแรงสูงถึง 1,000-1,700 kg/cm^2 เพราะความแข็งแรงทางกลและความเหนียว จึงเหมาะสำหรับใช้ทำลูกถ้วยที่ต้องการความแข็งแรงทางกลสูง

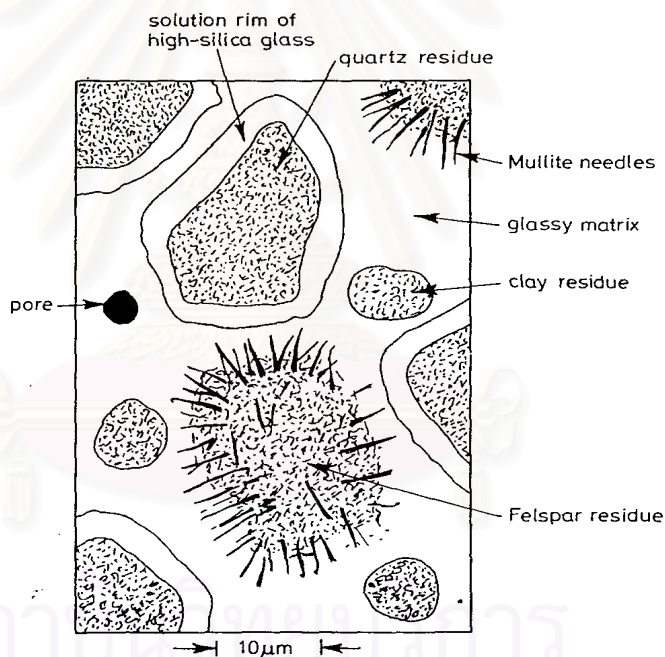
3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อความคงทนทางกลและทางไฟฟ้าของเนื้อพอร์ซเลน

เมื่อพิจารณาลงไปถึงระดับโครงสร้างภายในของเนื้อพอร์ซเลนพบว่า ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกลและทางไฟฟ้าของเนื้อพอร์ซเลนมีอยู่ 2 ประการ[19] คือ

- 1) ความพรุนของเนื้อพอร์ซเลน
- 2) ขนาดของส่วนผสมเนื้อพอร์ซเลน

3.3.1 ความพรุนของเนื้อพอร์ซเลน

ความพรุนของเนื้อพอร์ซเลนเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต การขึ้นรูปโดยกระบวนการเป็ยกหรือแห้งก็ตามต้องใช้นเนื้อพอร์ซเลนที่มีความชื้นเป็นส่วนหนึ่ง กระบวนการรีดหรืออัดเนื้อพอร์ซเลนก่อนนำไปขึ้นรูป ถ้าหากรีดหรืออัดเนื้อพอร์ซเลนไม่แน่นจะทำให้ยังคงมีช่องว่างภายในเนื้อพอร์ซเลน หรือแม้กระทั่งกระบวนการเผาในเตาอบ



รูปที่ 3.4 ภาพจำลองโครงสร้างเนื้อพอร์ซเลนซึ่งยังมีส่วนผสมบางชนิดหลงเหลืออยู่ [19]

ถ้าหากเผาที่อุณหภูมิต่ำจนเกินไปทำให้ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นในเนื้อพอร์ซเลนเพื่อให้เป็นโครงสร้างผลึกคล้ายแก้วเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ ย่อมส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลและทางไฟฟ้าโดยตรง แต่ถ้าหากเผาที่อุณหภูมิสูงจนเกินไปจะทำให้เกิดก๊าซซึ่งมาจากส่วนผสมภายในเนื้อพอร์ซเลนเริ่มระเหยออกมานั่นเองเป็นการเพิ่มช่องว่างหรือความพรุนมากขึ้น เพราะฉะนั้นความพรุนหรือช่องว่างในเนื้อพอร์ซเลนย่อมขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตเป็นส่วนใหญ่

การทดสอบหาคุณสมบัติที่เหมาะสมในกระบวนการเผาหลูกด้วยฉนวนพอร์ซเลนนั้น ส่วนใหญ่วัดจากความหนาแน่นของเนื้อพอร์ซเลนหลังการเผา แต่การใช้วิธีดังกล่าวให้ผลไม่ชัดเจนนักถึงแม้จะเผาเนื้อพอร์ซเลนที่อุณหภูมิต่ำหรือสูงเกินไป และผลที่ได้จากการทดสอบยังแตกต่างกันระหว่างเนื้อพอร์ซเลนที่เคลือบผิวกับไม่เคลือบผิว โดยเนื้อพอร์ซเลนที่ไม่ได้เคลือบผิวจะมีความหนาแน่นมากกว่าเนื้อพอร์ซเลนที่เคลือบผิวอันเนื่องมาจากสารที่เคลือบผิวของเนื้อพอร์ซเลนจะปิดกั้นไม่ให้ก๊าซซึมออกมาได้

โดยปกติแล้วการเผาหลูกด้วยฉนวนพอร์ซเลนที่อุณหภูมิสูงจนเกินไปจะเกิดช่องว่างแบบเปิดที่มีขนาดใหญ่อันเนื่องมาจากการระเหยเป็นก๊าซของส่วนผสมในเนื้อพอร์ซเลน ส่งผลให้ความคงทนทางไฟฟ้าและทางกลลดลง และที่สำคัญยังทำให้หลูกด้วยฉนวนพอร์ซเลนเกิดรอยร้าวที่สารเคลือบผิวได้ง่ายขณะทำการทดสอบแรงดึง อันเป็นสาเหตุให้หลูกด้วยฉนวนแตกได้ง่ายยิ่งขึ้นไม่ผ่านเกณฑ์การทดสอบ เนื่องจากการเผาหลูกด้วยฉนวนพอร์ซเลนที่อุณหภูมิสูงจนเกินไปนอกจากจะเกิดก๊าซดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ยังทำให้ส่วนผสมทรายแก้วและส่วนผสมอื่นๆ สามารถละลายเพื่อเกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้น โดยเฉพาะรอยต่อระหว่างเนื้อพอร์ซเลนกับสารเคลือบผิว จึงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวระหว่างเนื้อพอร์ซเลนกับสารเคลือบผิวไม่แตกต่างกันมากนัก เมื่อกระบวนการเผาในเตาได้ลดอุณหภูมิลงจะทำให้เนื้อพอร์ซเลนหดตัวใกล้เคียงกับสารเคลือบผิว ส่งผลให้เกิดแรงกดเข้าหากันที่ชั้นสารเคลือบผิวน้อย เมื่อนำหลูกด้วยฉนวนพอร์ซเลนที่เผาด้วยอุณหภูมิสูงมาทำการทดสอบแรงดึงทำให้แรงกดเข้าหากันที่ชั้นของสารเคลือบผิวที่มีอยู่เดิมช่วยหักล้างกับแรงดึงจากภายนอกได้ไม่มากนัก ส่งผลให้ชั้นสารเคลือบผิวต้องรับแรงดึงมากอันเป็นสาเหตุให้ชั้นสารเคลือบผิวแตกหรือมีรอยร้าวซึ่งเป็นสาเหตุให้หลูกด้วยฉนวนพอร์ซเลนแตกทั้งลูกตามมา[19] ดังนั้นควรใช้คุณสมบัติที่พอเหมาะที่ยังสามารถทำให้เนื้อพอร์ซเลนและชั้นสารเคลือบผิวยังคงมีความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวไว้ระดับหนึ่งส่งผลให้หลูกด้วยฉนวนพอร์ซเลนมีความคงทนทางกลเพิ่มขึ้น

3.3.2 ขนาดของส่วนผสมเนื้อพอร์ซเลน

รอยแตกหรือรอยร้าวในเนื้อพอร์ซเลนซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่มีผลกระทบต่อความคงทนทางกลและทางไฟฟ้า รอยแตกหรือรอยร้าวที่เกิดขึ้นนอกจากอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการเผาแล้วยังขึ้นอยู่กับขนาดของส่วนผสมที่หลงเหลืออยู่ โดยที่ส่วนผสมที่มีขนาดใหญ่และทำให้เกิดรอยแตกหรือรอยร้าวได้ง่ายคือส่วนผสมทรายแก้ว [19]

ขณะเดียวกันตำแหน่งของการเกิดรอยแตกหรือรอยร้าวยังขึ้นอยู่กับขนาดของส่วนผสมทรายแก้วเช่นเดียวกัน ถ้าหากขนาดของอนุภาคใหญ่กว่าหรือเท่ากับระยะห่างระหว่างจุดของโครงผลึกแล้ว รอยแตกหรือรอยร้าวที่เกิดขึ้นรอบๆอนุภาคจะสามารถเชื่อมต่อกันระหว่างจุดภายใน

โครงผลึก ส่งผลให้กระบวนการเผาไม่สามารถลดปริมาณช่องว่างแบบเปิดลงได้ แต่การบดส่วนผสมทรายแก้วให้ได้ขนาดเล็กลงตามที่ต้องการนั้นทำได้ยาก จึงได้นำส่วนผสมผงอะลูมินามาแทนส่วนผสมทรายแก้วซึ่งมีขนาดเล็กกว่าส่วนผสมทรายแก้วและไม่ทำให้เกิดรอยแตกหรือรอยร้าวของจุดในโครงผลึกยอมส่งผลให้มีความแข็งแรงทางกลและทางไฟฟ้าสูงขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 3.2 และ 3.3

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางกลของลูกถ้วยฉนวนที่มีเนื้อฉนวนต่างกัน [19]

Property	Siliceous Porcelain		Aluminous Porcelain	
	U	G	U	G
- Bulk	2.26 - 2.42		2.60 - 3.25	
- True, without pores	2.42 - 2.50		2.78 - 3.47	
Unglazed/Glazed	U	G	U	G
Strength(MPa)				
- Flexural	42 – 90	56 - 120	100 - 140	120 – 170
- Tensile	21 – 42	28 - 56	50 - 70	60 – 80
- Compressive	280 – 450	380 - 690	400 - 600	500 – 700
Fracture impact energy(J)	2.0 - 3.0		2.5 - 4.0	
Modulus elastic,tensile(J)	55 - 80		80 – 120	
Expansibility (20-100 ^o C) (x10 ⁻⁶ / ^o K)	3.5 - 5.5		4.6 - 6.0	
Thermal conductivity (W/m ^o K)	1.0 - 2.5		2.0 - 25.0	
Specific heat (20-100 ^o C)(J/g ^o K)	0.46 - 0.72		0.11 - 0.13	

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนที่มีเนื้อฉนวนต่างกัน[19]

Property	Unit	Siliceous Porcelain	Aluminous Porcelain
Permittivity (50 - 60 Hz, 20°C) (1 MHz, 20°C)	air = 1	5.0 - 6.5	6.0 - 7.5
	air = 1	4.8 - 5.6	5.0 - 6.5
Loss tangent (50 - 60 Hz, 20°C) (1 MHz, 20°C)	$\times 10^{-3}$	10.0 - 25.0	12.0 - 30.0
	$\times 10^{-3}$	5.0 - 12.0	5.0 - 12.0
Puncture strength (50 - 60 Hz, 20°C)	kV/mm	10.0 - 20.0	10.0 - 20.0
Impulse puncture strength (1/5 μ s)	KV/mm	40.0 - 50.0	40.0 - 50.0
$\rho \equiv$ Volume resistivity 20°C 300°C	$\Omega \cdot \text{cm}$	10^{13}	10^{12}
	$\Omega \cdot \text{cm}$	10^6	10^{11*}
$T_p \equiv$ Temperature for $\rho = 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$	°C	280 - 340	830 - 1070*

* ค่าจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเปอร์เซ็นต์ของ Na เพิ่มขึ้น

3.4 ลูกถ้วยในโครงการวิจัย

ลูกถ้วยฉนวนที่ใช้ศึกษาวิจัยในโครงการนี้ จะใช้ลูกถ้วยแขวน เพราะเป็นลูกถ้วยประเภท B ที่มีโอกาสเกิดเจาะทะลุได้ และเพื่อแก้ปัญหาการเจาะทะลุ จะใช้ลูกถ้วยแขวนคู่คอดันที่ออกแบบสร้างขึ้น ซึ่งจัดเป็นลูกถ้วยฉนวนประเภท A

3.4.1 ลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4

เนื่องจากลูกถ้วยที่ประสบกับปัญหาการเจาะทะลุนั้น มักเป็นลูกถ้วยแบบแขวนประเภท B จากข้อมูลการไฟฟ้าพบว่า ลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 มักเกิดการเจาะทะลุ เมื่อทำการติดตั้งใช้งานไประยะหนึ่ง โดยสันนิษฐานว่าเกิดจากได้รับแรงดันเกินเสิร์จฟ้าผ่าที่มีหน้าคลื่นชัน ลักษณะการเจาะทะลุเป็นดังรูปที่ 3.5



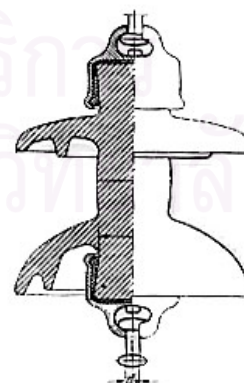
รูปที่ 3.5 พวงลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4
เจาะทะลุหลังจากได้รับแรงดันเกินเสิร์จฟ้าผ่า

3.4.2 ลูกถ้วยแขวนคู่คอตัน (Solid core suspension insulator)

ลูกถ้วยแขวนคู่คอตันเป็นลูกถ้วยฉนวนประเภท A ที่นำมาแก้ปัญหาเจาะทะลุ มีลักษณะโครงร่างปกติคล้ายลูกถ้วยแขวนธรรมดาสองลูกต่อกัน แต่จะมีการเชื่อมกันด้วยเนื้อพอร์ซเลนต้นแทนก้านโลหะ ขนาดความยาวในแนวแกนและความกว้างของปีกมีค่าประมาณใกล้เคียงกับลูกถ้วยแขวนธรรมดา ทำจากเนื้อพอร์ซเลนเหมือนแบบลูกถ้วยแขวนธรรมดา ลักษณะของปีกบนจะมีลักษณะคล้ายกับปีกของลูกถ้วยแขวน ส่วนปีกล่างจะมีลักษณะโค้งมากกว่าดังรูปที่ 3.6 ข. ลูกถ้วยแขวนคู่คอตันสามารถนำมาใช้แทนลูกถ้วยแขวนในระบบไฟฟ้าแรงสูงได้



ก. ลูกถ้วยแขวน



ข. ลูกถ้วยแขวนคู่คอตัน

รูปที่ 3.6 แบบลูกถ้วยที่ใช้ศึกษาวิจัยในโครงการนี้

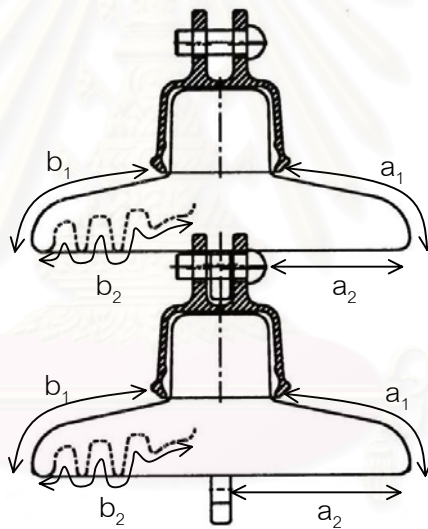
3.5 ลักษณะสมบัติทางมิติของลูกถ้วยฉนวน

ลักษณะทางมิติที่เกี่ยวข้อง และมีผลต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยที่ควรทราบ ความหมายมีดังต่อไปนี้ [17]

1) ระยะรั่ว (Leakage distance) คือ ระยะที่สั้นที่สุดที่วัดตามผิวลูกถ้วยระหว่าง อิเล็กโทรด โดยส่วนหนึ่งของระยะรั่วจะเป็นส่วนกันมิให้ผิวเปียกได้ง่ายเมื่ออยู่ในสภาพฝนตก ซึ่งจะช่วยให้ลูกถ้วยมีความคงทนต่อแรงดันวาบไฟตามผิวได้สูงขึ้น ดังระยะ b คือ $(b_1 + b_2)$ ในรูป 3.7

2) ระยะรั่วป้องกัน (Protective leakage distance) คือ ระยะที่ไม่เปียกฝนซึ่งปกติจะหมายถึง ระยะได้ปีก ดังรูป คือ ระยะผลรวมของ b_2

3) ระยะอาร์ก (Arcing distance) คือ ระยะสั้นสุดที่วัดระหว่างอิเล็กโทรดผ่านอากาศ หรือ กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ระยะที่วัดตามแนวที่เกิดอาร์กนั่นเอง ระยะอาร์กแบ่งเป็นระยะอาร์กแห้ง (Dry arcing distance) และ ระยะอาร์กเปียก (Wet arcing distance)



รูปที่ 3.7 ลักษณะทางมิติของลูกถ้วยฉนวน

- ระยะอาร์กแห้ง หมายถึง ระยะอาร์กที่วัดในสภาวะลูกถ้วยแห้ง ซึ่งจะมีทั้งลักษณะที่วัดตามผิว และส่วนที่เป็นอากาศ คือระยะผลรวมของ a_1 และ a_2 ดังในรูป

- ระยะอาร์กเปียก หมายถึง ระยะอาร์กที่วัดในลักษณะลูกถ้วยเปียก ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นความเปราะระเปื้อนระยะอาร์กเปียกก็คือ ระยะผลรวมของ a_2 ในรูป

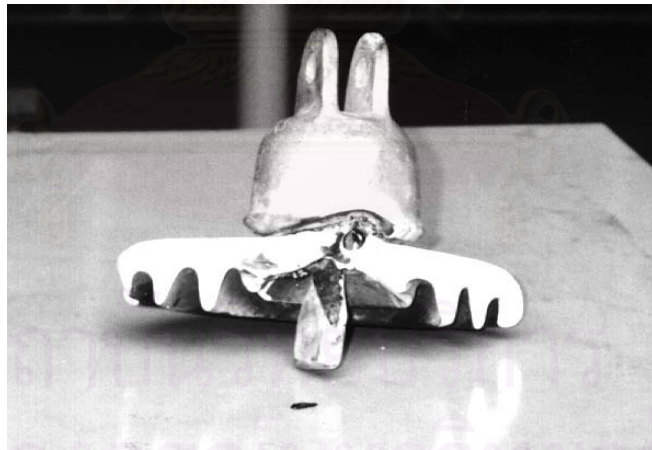
บทที่ 4

การออกแบบสร้างลูกถ้วยแขวนคู่คอตัน

ลูกถ้วยฉนวนจำเป็นต้องได้รับความเครียดอย่างต่อเนื่องทั้งทางกล และทางไฟฟ้า ซึ่งจะมากขึ้นเรื่อยๆ กับลักษณะของสายส่งนั้นๆ ความเครียดเหล่านี้อาจจะเพิ่มมากขึ้นตามสภาวะแวดล้อมที่ผิดปกติได้ ทางเลือกในการออกแบบลูกถ้วยฉนวนทั่วไปจะต้องทำโดยพิจารณาถึงสิ่งเหล่านี้ด้วย [20] ได้แก่ ลักษณะของระบบไฟฟ้าที่จะนำลูกถ้วยไปใช้ ระดับความเชื่อมั่นระบบ ข้อจำกัดที่ยอมรับได้ของความสั่นไหวในการปฏิบัติงาน สภาวะแวดล้อมตามธรรมชาติ และผลของความเสื่อมสภาพของลูกถ้วยตามระยะเวลาใช้งาน

4.1 การออกแบบเพื่อแก้ปัญหาเจาะทะลุ

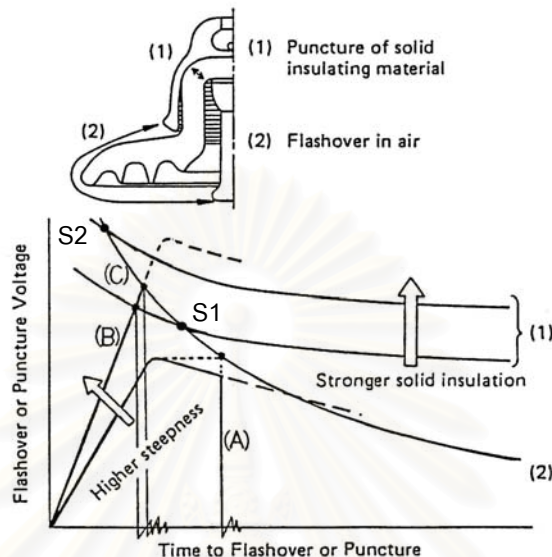
การออกแบบลูกถ้วยฉนวนโดยปกติทั่วไปจะทำการออกแบบให้ลูกถ้วยเกิดการร้าวไฟตามผิวผ่านฉนวนอากาศง่ายกว่าเกิดการเจาะทะลุผ่านเนื้อลูกถ้วยฉนวนเมื่อขณะได้รับแรงดันเกิน ยิ่งไปกว่านั้นความเครียดสนามไฟฟ้าบนลูกถ้วยแต่ละลูกในพวงลูกถ้วยแขวนมีความสำคัญในส่วนที่จะกำหนดถึงอัตราการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยฉนวนได้



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างลูกถ้วยเมื่อได้รับแรงดันเกินเสิร์จฟ้าผ่า

เนื่องจากลูกถ้วยฉนวนที่ใช้งานในระบบไฟฟ้าแรงสูงเมื่อทำการติดตั้งใช้งานไประยะหนึ่งพบว่าลูกถ้วยเกิดการเจาะทะลุผ่านเนื้อฉนวน ซึ่งสันนิษฐานว่าได้รับแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันจากฟ้าผ่า ส่งผลให้ลูกถ้วยฉนวนเสียหายการฉนวนอย่างถาวรตามรูปที่ 4.1 การเกิดเจาะทะลุนี้เป็นผลมาจากลูกถ้วยได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของเนื้อฉนวนลูกถ้วย เพราะฉะนั้นทางแก้ไขปัญหาการเจาะทะลุผ่านเนื้อฉนวนลูกถ้วยนั้น

สามารถทำได้โดยการให้ลูกถ้วยมีค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของเนื้อฉนวนลูกถ้วยได้มากขึ้นกว่าเดิมดังรูปที่ 4.2 [12]



รูปที่ 4.2 กราฟลักษณะแรงดัน-เวลาของลูกถ้วยฉนวน [12]

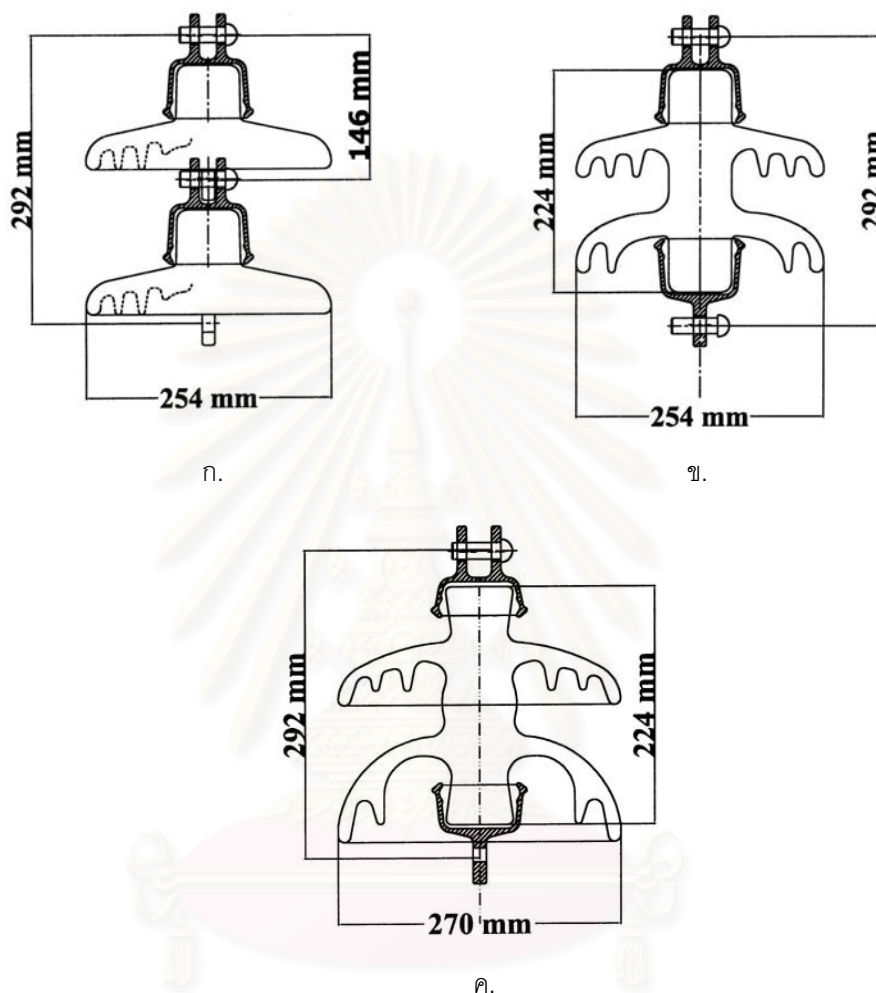
- (1) เจาะทะลุผ่านเนื้อฉนวนลูกถ้วย
- (2) วาบไฟตามผิวผ่านฉนวนอากาศ

ในรูปกราฟลักษณะแรงดันเวลาของการwabไฟผ่านฉนวนอากาศ (2) จะตัดกราฟลักษณะแรงดันเวลาของการเจาะทะลุผ่านเนื้อฉนวน (1) ที่จุด S1 ปกติแรงดันฟ้าผ่าจะมีความชันตั้งแต่ 200–2,500 kV/ μ s [13] ซึ่งมีความชันไม่เกินความชันวิกฤต ณ จุด S1 นี้ ทำให้เกิดการwabไฟผ่านฉนวนอากาศ ถ้าความชันมีค่าเกินความชันวิกฤตนี้จะทำให้เกิดการเจาะทะลุผ่านเนื้อฉนวนลูกถ้วยได้ การแก้ปัญหาเจาะทะลุจึงทำโดยเลื่อนกราฟ (1) สูงขึ้นไปตัดกราฟ (2) ที่จุด S2 ก็จะสามารถทำให้ลูกถ้วยเกิดการwabไฟผ่านฉนวนอากาศแทนที่จะเกิดการเจาะทะลุ การเพิ่มความแข็งแรงของลูกถ้วยฉนวนทำได้ 2 วิธีคือ ทำการปรับปรุงทางด้านเนื้อสารที่ใช้ผลิตลูกถ้วย หรือ อีกทางหนึ่งคือการเพิ่มระยะหรือความหนาเนื้อฉนวนระหว่างอิเล็กโทรดให้มีค่ามากขึ้น

4.2 เงื่อนไขการออกแบบ

เนื่องจากลูกถ้วยแขวนคู่คอตันยังมีได้มีการออกแบบสร้างขึ้นภายในประเทศ และเพื่อนำลูกถ้วยแขวนคู่คอตันนี้ไปใช้งานจริงหรือเป็นต้นแบบ จึงจำเป็นต้องมีเงื่อนไขในการพิจารณาออกแบบดังต่อไปนี้

1) การออกแบบจะให้ลูกถ้วยมีลักษณะเป็นลูกถ้วยแขวนคู่คอดันโดยมีมิติอิงสมนัยกับลูกถ้วยแขวนธรรมดาสองลูกต่อกันตามรูปที่ 4.3 ก. เชื่อมด้วยเนื้อพอร์ซเลนตันลักษณะเป็นตามรูปที่ 4.3 ข.



รูปที่ 4.3 แบบลูกถ้วยที่ใช้ศึกษาวิจัย

- ก. ลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 ต่อเป็นพวงสองลูก
- ข. ลูกถ้วยแขวนคู่คอดันตันแบบ
- ค. ลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสอง

2) ลักษณะทางด้านมิติใช้ ANSI C29.2 [21] ซึ่งมิติที่พิจารณาคือ ระยะรั้ว, ระยะอาร์ก, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และระยะตามแนวแกนกลาง ประกอบกับลูกถ้วยฉนวนเวลาใช้งานจริง จะได้รับสิ่งเปราะอะเปื้อนจับเกาะจึงใช้มาตรฐาน IEC 815 [8] ร่วมในการออกแบบเพื่อให้มีการทำความสะอาดตัวเองได้ การไม่ให้เกิดน้ำฝนไหลเป็นสายเวลาเกิดฝนตก และไม่ให้เกิดวาบไฟข้าม

ปีกที่อยู่ใกล้กัน นอกจากนี้ยังคำนึงถึงการกระจายสนามไฟฟ้าที่ดีในการออกแบบด้วยเพื่อลักษณะการวางไฟตามผิวที่ดีขึ้น

3) วัสดุฉนวนที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ใช้เนื้อพอร์ซเลนชนิดอะลูมินา เหตุที่ใช้เนื้อวัสดุชนิดนี้ เพราะเป็นเนื้อที่อยู่ในสายการผลิตที่มีคุณสมบัติทนต่อแรงดึงทางกล และเป็นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้แล้วภายในประเทศมาเป็นเวลาหลายปี

4.3 มิติที่ออกแบบของลูกถ้วยแขวนคู่คอดัน

เนื่องจากพบว่าลูกถ้วยแขวนแบบ ANSI Class 52-4 เป็นแบบหนึ่งที่มีมักเกิดการเจาะทะลุ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคใช้ 3-4 ลูกในระบบ 33 kV การไฟฟ้านครหลวงใช้ลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-3 จำนวน 4 ลูกสำหรับระบบ 69 kV การไฟฟ้านครหลวงและการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคใช้ ลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-3 จำนวน 7 ลูก สำหรับระบบ 115 kV และ เพียงลูกถ้วยทั้งสองแบบต่างกันที่ลักษณะโลหะค้ำปลั่งยึดลูกถ้วยเท่านั้น ประกอบกับโรงงานผลิตลูกถ้วยมีหัวครอบโลหะแบบ Clevis and tongue พร้อมอยู่แล้วจึงสะดวกต่อการประกอบสร้าง ลักษณะด้านมิติจึงเลือกใช้ลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 เป็นแนวและเกณฑ์ในการออกแบบ

4.3.1 ข้อกำหนดในการเลือกมิติ

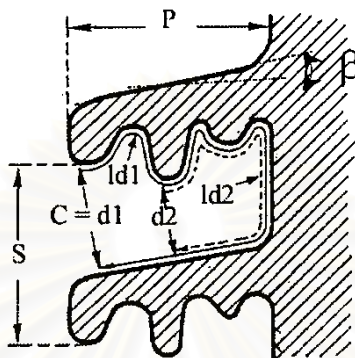
เนื่องจากพวงลูกถ้วยแขวนในระบบการไฟฟ้าต่างๆมีจำนวนลูกถ้วยต่อพวงเป็นจำนวนคู่หรือคี่ ทั้งนี้ขึ้นกับระดับแรงดันใช้งานของระบบ ระดับความเชื่อมั่น ระดับความเปราะเปื้อนในแต่ ละท้องถิ่น เพื่อให้มีความสามารถนำไปใช้งานได้กับทุกระบบจึงมีข้อกำหนดในการเลือกมิติดังนี้

1) ลักษณะมิติของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันจะต้องมีมิติอิงตามลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 จำนวน 2 ลูกต่อกันเชื่อมด้วยเนื้อพอร์ซเลนตัน ซึ่งลักษณะมิติต้องเป็นไปตามมาตรฐาน ANSI C29.2 ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ลักษณะมิติลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4

ค่ามิติของลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 ต่อ 1 ลูกถ้วย		
ระยะรั้ว	ระยะเส้นผ่านศูนย์กลางปีก	ระยะความยาวตามแนวก้าน
292 มิลลิเมตร (ค่าต่ำสุด)	273 มิลลิเมตร (ค่าสูงสุด)	146±3 มิลลิเมตร

2) แม้ลูกถ้วยแขวนคู่คอดันจะไม่มีมาตรฐานออกแบบ แต่ลักษณะลูกถ้วยแขวนคู่คอดันมีลักษณะใกล้เคียงกับลูกถ้วยแขวนธรรมดาสองลูกต่อกัน และลูกถ้วยแขวนคอดันยาว ซึ่งมาตรฐาน IEC 815 [8] ให้คำแนะนำในการออกแบบลูกถ้วยในสภาวะเปรอะเปื้อน ปีกของลูกถ้วยขนวนจะต้องออกแบบให้มีลักษณะดังรูปที่ 4.4



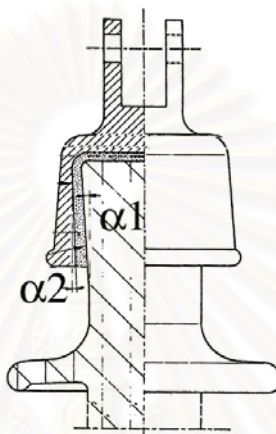
รูปที่ 4.4 ลักษณะปีกตามมาตรฐาน IEC 815 [8]

โดยปีกของลูกถ้วยขนวนจะต้องออกแบบให้มีค่าต่างๆ คือ

- $C \geq 30 \text{ mm}$ เพื่อหลีกเลี่ยงการเชื่อมต่อของสายฝนระหว่างปีก
 - $S/P \geq 0.8$ เพื่อให้สามารถเกิดการทำความสะอาดตัวเองเนื่องจากการสะท้อนของน้ำฝนระหว่างปีก
 - $L_{dx}/d_x < 5$ เพื่อป้องกันการรวบไฟจากครีบบนขั้วของปีกบนลงมายังปีกล่าง
 - $\beta > 5^\circ$ เพื่อการชำระสิ่งสกปรกได้ดีขึ้น
 - $C.F. \leq 4$ สำหรับสภาวะเปรอะเปื้อนระดับ 4
 - $P.F. > 0.7$ สำหรับสภาวะเปรอะเปื้อนระดับ 4
- เมื่อ
- C คือ ระยะทางที่วัดจากปลายครีบนอกสุดของปีกบนลงมาตั้งฉากกับปีกล่าง
 - S คือ ระยะทางที่วัดจากปลายครีบนอกสุดของปีกบนลงมายังปลายครีบนอกสุดของปีกล่าง
 - P คือ ระยะทางที่วัดจากคอดันออกมาถึงขอบนอกสุดของปีก
 - L_{dx} คือ ระยะตามผิวที่วัดระหว่างจุดปลายระยะ d_x
 - d_x คือ ระยะทางที่วัดจากปลายครีบบนขั้วของปีกบนลงมาตั้งฉากกับปีกล่าง
 - β คือ มุมเอียงของปีกบนที่ทำกับแนวระดับ
 - $C.F.$ คือ อัตราส่วนระหว่าง ระยะรั้ว ต่อ ระยะอาร์กแห้ง

- l คือ ระยะตามผิวที่วัดระหว่างจุดปลายระยะ S
 P.F. คือ $(2P + S) / l$

3) การออกแบบที่ยืดให้ทนทานต่อแรงดึงทางกล มุม α_1 และ α_2 ดังรูปที่ 4.5 มีความสำคัญมาก โดยตามมาตรฐาน IEC 575 [22] แนะนำค่ามุมทั้งสองควรอยู่ในช่วงระหว่าง $4^\circ - 12^\circ$ โดยปกติใช้ 8°



รูปที่ 4.5 ภาพหน้าตัดหัวครอบโลหะตาม IEC Publ. No. 575 [22]

4.3.2 ผลการออกแบบตามข้อกำหนด

การออกแบบลูกถ้วยแขวนคู่คอดันตาม ANSI C29.2 ให้มีมิติและลักษณะสมนัยกับลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 สองลูกต่อกันได้ผลตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่ามิติออกแบบของลูกถ้วยแขวนคู่คอดัน

ลูกถ้วย	ค่ามิติ (มิลลิเมตร)			
	เส้นผ่านศูนย์กลางปีก	ความยาวตามแนวแกน	ระยะรั้ว	ระยะอาร์กแห้ง
ธรรมดา	254	292	650	375
ต้นแบบ	254	292	630	290
แบบสอง	270	292	720	380

จากผลการออกแบบจะเห็นได้ว่าระยะอาร์กของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองจะมีค่ามากกว่าของลูกถ้วยแขวนธรรมดา เหตุเนื่องจากคุณลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าบางประการของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันต้นแบบมีค่าต่ำกว่าลูกถ้วยแขวนธรรมดา จึงได้เพิ่มระยะอาร์กให้มากขึ้น

4.3.3 ผลการออกแบบลูกถ้วยแขวนคู่คอดันตาม IEC Publ. No. 815

จากการออกแบบตามมาตรฐาน IEC Publ. No. 815 ได้ผลดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ตามมาตรฐาน IEC Publ. No. 815

พารามิเตอร์	C	S/P	$L_{d1}/d1$	β	C.F.	P.F.
ค่ามาตรฐาน	> 30 mm	≥ 0.8	< 5	$> 5^\circ$	≤ 4	> 0.7
ค่าออกแบบของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันต้นแบบ	37 mm	1.02	5.5	13°	2.0	0.8
ค่าออกแบบของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสอง	60 mm	1.2	4.89	8.5°	2.1	0.88

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าการออกแบบลักษณะทางด้านมิติได้ใช้มาตรฐานของ ANSI และ IEC ร่วมในการออกแบบ แต่กระนั้นในส่วนนี้จะอิงการออกแบบตามมาตรฐานของ ANSI เป็นหลัก เพราะว่าลักษณะทางด้านมิติจะสัมพันธ์กับคุณลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วย ในส่วนการทดสอบทางไฟฟ้านั้นส่วนใหญ่ได้กระทำการทดสอบตามมาตรฐานของ ANSI ซึ่งมาตรฐาน ANSI ได้ระบุค่าพิกัดแรงดันทดสอบ ขบวนการเตรียมการทดสอบ และวิธีการทดสอบไว้อย่างละเอียดชัดเจนกว่ามาตรฐานการทดสอบลูกถ้วยฉนวนของ IEC

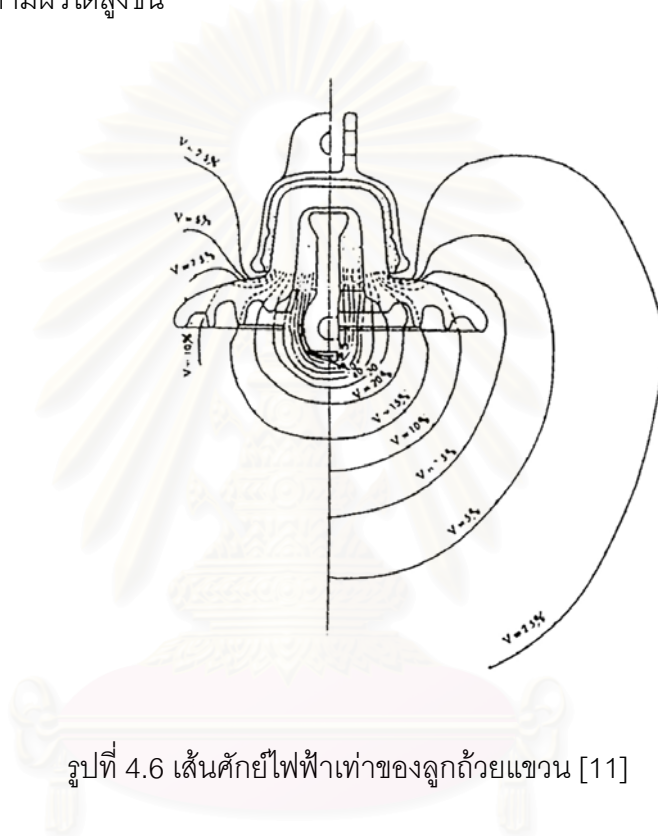
4.4 ลักษณะแรงดันกระจาย

การวิเคราะห์การกระจายสนามไฟฟ้าได้นำมาใช้ประกอบเพื่อหาเหตุผลของการออกแบบลูกถ้วย โดยทำการจำลองแบบลูกถ้วยด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ [9] จำลองแบบลูกถ้วยในลักษณะต่างๆ ซึ่งได้ผลพบว่าการออกแบบปีกลูกถ้วยให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากขึ้น จำนวนครีบบอกมากขึ้น ความหนามากขึ้นจะสามารถทำให้ลักษณะการกระจายสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยมีค่าดีขึ้น

4.4.1 ความเครียดสนามไฟฟ้ากระจายบนผิวลูกถ้วย

การออกแบบลักษณะรูปร่างของลูกถ้วยนั้น จะออกแบบให้ครีบบอกหรือชั้นของลูกถ้วยมีผิวโค้งไปตามเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า (Equipotential lines) [11] เพื่อให้ความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวลูกถ้วยมีค่าน้อยที่สุด ดังในรูปที่ 4.6 แสดงถึงสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าของลูกถ้วยแขวนที่ผิวลูกถ้วยด้านบนที่ติดอยู่กับฝาครอบโลหะจะมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณอื่นจะเป็นเหตุให้เกิดโคโรนาขึ้นในบริเวณนี้ได้ง่ายและนำไปสู่การเกิดวาบไฟ (Flashover)

ฉะนั้นแรงดันใช้งานจึงต้องต่ำกว่าค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด (Corona inception voltage) ความกว้างของปีกชั้นลูกถ้วย และควาหนาของเนื้อลูกถ้วย (ระหว่างฝาดกรอบโลหะบน-ก้านยึดส่วนล่าง) ต้องออกแบบให้มีความสัมพันธ์กันในด้านความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า คือ ความคงทนต่อแรงดันวาบไฟตามผิว (Flashover voltage) จะต้องน้อยกว่าความคงทนต่อแรงดันเจาะทะลุ (Puncture voltage) ในส่วนครีปได้ปีกลูกถ้วยนั้นทำไว้เพื่อเพิ่มระยะรั้วซึ่งเป็นส่วนที่สั้นที่สุดที่วัดตามผิว ลูกถ้วยระหว่างอิเล็กโตรด จะเป็นส่วนกันมิให้ผิวเปียกได้ง่ายเมื่ออยู่ในสภาพฝนตก เป็นผลให้ทนต่อแรงดันวาบไฟตามผิวได้สูงขึ้น



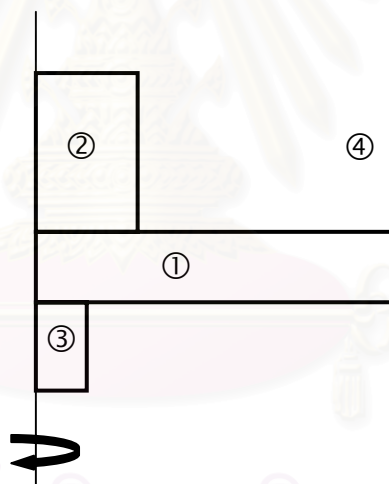
รูปที่ 4.6 เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าๆของลูกถ้วยแขวน [11]

4.4.2 การจำลองแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การวิเคราะห์ปัญหาความเครียดสนามไฟฟ้ากระจายบนลูกถ้วยได้มีส่วนสำคัญยิ่งต่อการออกแบบ การวิเคราะห์ปัญหาความเครียดสนามไฟฟ้าแรกเริ่มได้ทำการหาค่าสนามไฟฟ้าของฉนวนระหว่างอิเล็กโตรดที่มีลักษณะสมมาตรกันรอบแกนหมุนโดยใช้กระดาษกึ่งตัวนำ (semiconductor paper) โดยการทาสีโลหะบนกระดาษสารกึ่งตัวนำให้มีรูปลักษณะเลียนแบบอิเล็กโตรด ส่วนไดอิเล็กตริกที่มีค่าเปอร์มิตติวิตี (Permittivity, ϵ) ต่างกัน สามารถแทนค่าเปอร์มิตติวิตีเหล่านี้ได้ด้วยควาหนาของกระดาษ ถ้า ϵ สูงก็วางกระดาษกึ่งตัวนำซ้อนกันหลายชั้นตามอัตราส่วน จวบจนปัจจุบันวิธีการวิเคราะห์ที่นิยมมากคือ วิธีเชิงเลข (Numerical method) [23] เป็นวิธีที่ประมาณค่าผลลัพธ์ของสนามไฟฟ้า ในที่นี้คือสมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equation) ด้วยวิธีเชิงเลข เช่น วิธีจำลองประจุ (Charge simulation method) วิธีไฟไนต์

ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite difference method) และวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite element method) ในการวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรมวิเคราะห์ปัญหาสนามไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ [9] ซึ่งใช้การมินิไมซ์ค่าพลังงานศักย์สะสมในสนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากความสัมพันธ์ของศักย์

การจำลองแบบลูกถ้วยเพื่อหารูปแบบที่เหมาะสม ได้ทำการจำลองแบบดังรูปที่ 4.7 เพื่อศึกษาลักษณะแรงดันกระจายบนลูกถ้วยฉนวน และความเครียดสนามไฟฟ้าในส่วนตามผิวเพื่อนำมาวิเคราะห์หาเหตุผลของการออกแบบลูกถ้วย โดยทำการจำลองขึ้นส่วนเนื้อพอร์ซเลน (Porcelain), ① ที่มีค่าเปอร์มิตติวิตี้ $\epsilon_r = 5$ และค่าความนำไฟฟ้า $\sigma = 1e-13$ S/m ทำการจำลองขึ้นส่วนโลหะอะลูมิเนียม (Aluminum), ② ③ ที่มีค่าเปอร์มิตติวิตี้ $\epsilon_r = 1$ และค่าความนำไฟฟ้า $\sigma = 3.72e+7$ S/m และทำการจำลองส่วนที่เป็นอากาศ, ④ มีค่าเปอร์มิตติวิตี้ $\epsilon_r = 1.0006$ และค่าความนำไฟฟ้า $\sigma = 0$ S/m พร้อมกับกำหนดค่าแรงดัน 100V ให้กับชั้นส่วนอิเล็กโตรดเสมือนก้านยึด ③ และกำหนดค่าแรงดัน 0V ให้กับแบบอิเล็กโตรดที่แทนหัวครอบโลหะ ② ผลการจำลองแบบลูกถ้วยในลักษณะต่างๆเป็นดังตารางที่ 4.4



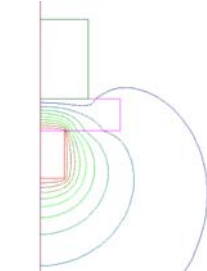
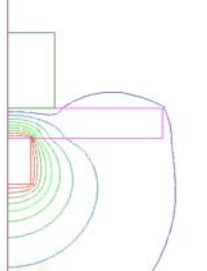
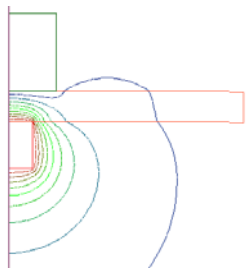
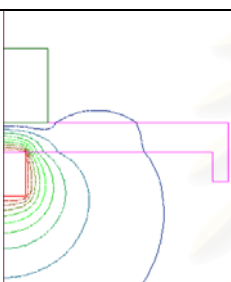
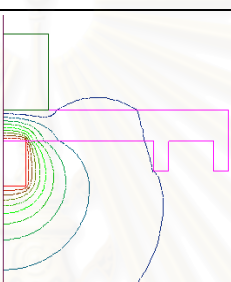
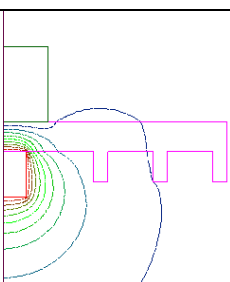
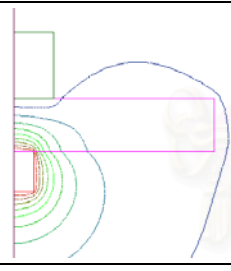
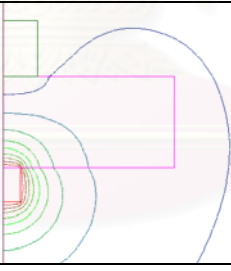
รูปที่ 4.7 แบบจำลองลูกถ้วยที่ใช้ในการหาเหตุผลของการออกแบบ

จากตารางที่ 4.4 ได้ผลพบว่า

- 1) การออกแบบปีกลูกถ้วยให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากขึ้น
- 2) จำนวนครีบกมากขึ้น
- 3) ความหนามากขึ้น

จะสามารถทำให้ลักษณะการกระจายสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยมีค่าดีขึ้น

ตารางที่ 4.4 ผลค่าความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวเนื้อพอร์ซเลนที่คำนวณได้

$E_{\max} = 109,717 \text{ V/m}$	$E_{\max} = 16,824 \text{ V/m}$	$E_{\max} = 12,401 \text{ V/m}$
		
ความยาวปีก 50 mm	ความยาวปีก 100 mm	ความยาวปีก 150 mm
$E_{\max} = 15,139 \text{ V/m}$	$E_{\max} = 12,949 \text{ V/m}$	$E_{\max} = 8,860 \text{ V/m}$
		
1 ครีป	2 ครีป	3 ครีป
$E_{\max} = 29,195 \text{ V/m}$	$E_{\max} = 9,051 \text{ V/m}$	
		
ปีกหนา 40 มิลลิเมตร	ปีกหนา 80 มิลลิเมตร	

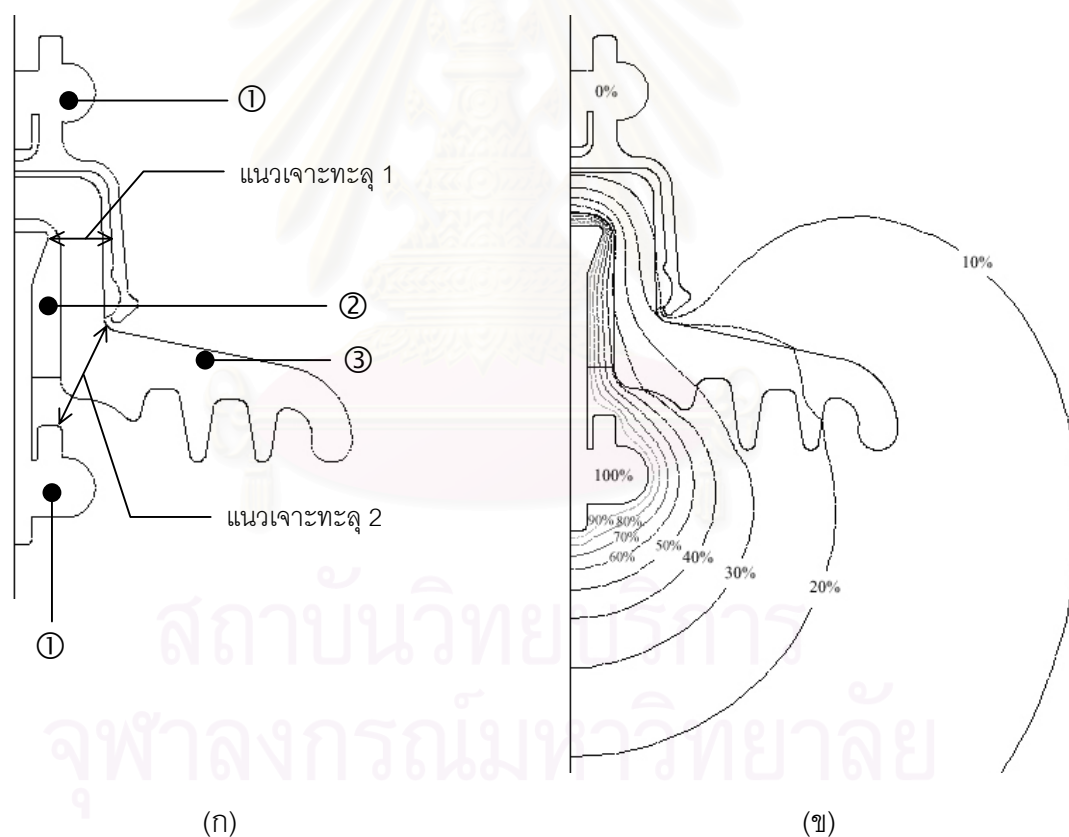
หมายเหตุ E_{\max} หมายถึง ขนาดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด จะเกิดที่ขอบเหลี่ยมของหัวครอบโลหะด้านแรงสูง (ด้านล่าง) ที่ติดกับบริเวณอากาศ และส่วนเนื้อพอร์ซเลน

4.4.3 ผลการจำลองแบบลูกถ้วยแขวนธรรมดาและลูกถ้วยแขวนคู่คอดัน

ในส่วนนี้ได้ทำการจำลองแบบลูกถ้วยแขวนธรรมดาแบบลูกเดี่ยว และ จำลองเปรียบเทียบระหว่างลูกถ้วยแขวนธรรมดา 2 ลูกต่อกัน กับลูกถ้วยแขวนคู่คอดันต้นแบบ และลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสอง เพื่อศึกษาหาเหตุผลของปัญหาความเครียดสนามไฟฟ้าบนลูกถ้วยตามแนวอาร์ก และตามแนวเงาะทะเล

ทำการจำลองแบบลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 ซึ่งมีลักษณะเป็นดังรูปที่ 4.8 (ก) เริ่มทำการจำลองโดยกำหนดค่า Permittivity และค่า Conductivity ให้กับบริเวณขอบเขตปัญหา บริเวณ ① เป็นการจำลองหัวครอบโลหะและก้านยึดลูกถ้วยด้วยวัสดุ Aluminum บริเวณ ② เป็นการจำลองวัสดุซีเมนต์ (Cement) ที่มีค่า $\epsilon_r = 2.3$ และค่า $\sigma = 0$ S/m บริเวณ ③ เป็นการจำลองปีกลูกถ้วยฉนวนด้วยวัสดุพอร์ซเลน ต่อมาทำการกำหนดค่าแรงดันให้กับชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ทรอด สำหรับก้านยึดลูกถ้วยกำหนดแรงดัน 100V ส่วนหัวครอบโลหะกำหนดแรงดัน 0V แล้วทำการคำนวณ และทำการวาดเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าบนลูกถ้วยได้ผลเป็นดังรูปที่ 4.8 (ข)

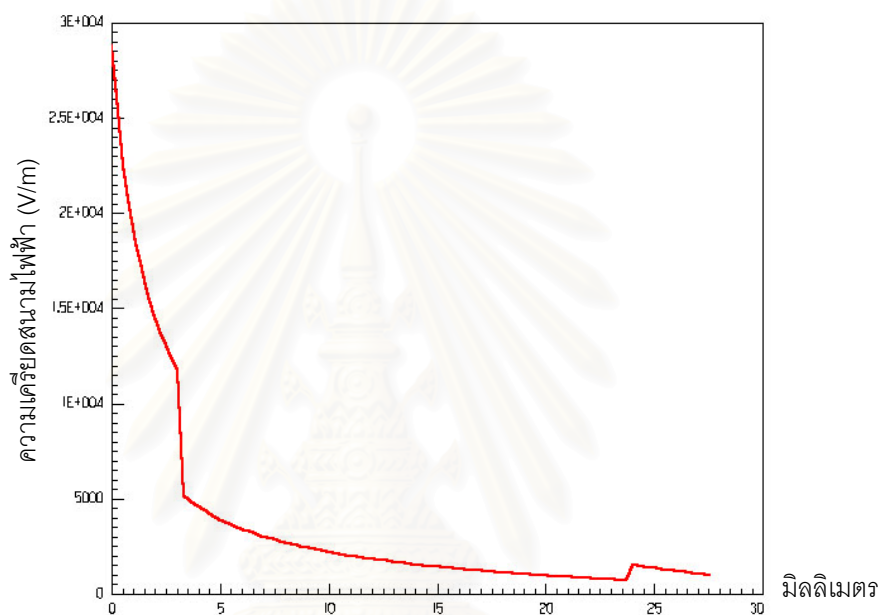
เพื่อหาเหตุผลของการเจาะทะลุ จึงได้ทำการคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าตามแนวเจาะทะลุ (Puncture path) จากรูปที่ 4.8(ข) พิจารณาพบว่าบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงจะอยู่บริเวณแนวเจาะทะลุที่ 1 และตามแนวเจาะทะลุที่ 2 ดังแสดงไว้ในรูป 4.8(ก) ทำการคำนวณและทำการวาดรูปกราฟได้ผลค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเป็นดังรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 ตามลำดับ



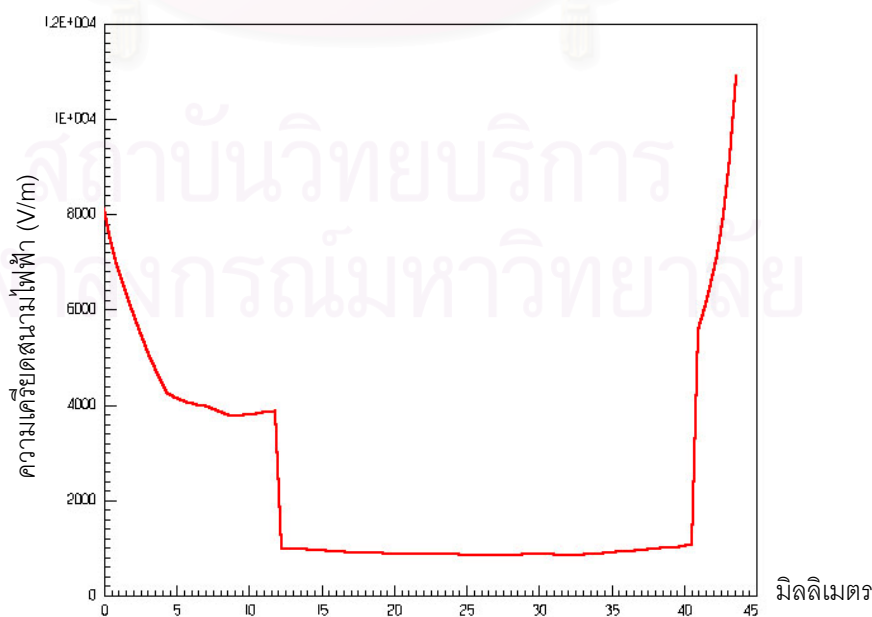
รูปที่ 4.8 (ก) แบบจำลองลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4

(ข) เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าของลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4

แนวเจาะทะลุที่ 1 เป็นแนวที่มีโอกาสเกิดการเจาะทะลุมากที่สุดเพราะจากรูปกราฟที่ 4.9 ความเครียดบริเวณมุมก้านยึดลูกถ้วยมีค่าสูงสุด 28,767 V/m ส่วนบริเวณแนวเจาะทะลุที่ 2 บริเวณปลายหัวครอบโลหะมีค่าความเครียด 10,895 V/m น้อยกว่าความเครียดบริเวณมุมก้านยึดลูกถ้วยประมาณ 38% ดังนั้นการเจาะทะลุมักจะเกิดในแนวเจาะทะลุที่ 1 และ 2 นี้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยที่ผ่านมา[7] แต่อย่างไรก็ตามการเจาะทะลุนั้นสามารถมีโอกาสเกิดในแนวอื่นได้ ทั้งนี้ถ้าลูกถ้วยนั้นมีจุดบกพร่องภายในตัวเนื้อพอร์ซเลน หรือได้รับความเครียดทางกลอื่นร่วมด้วย



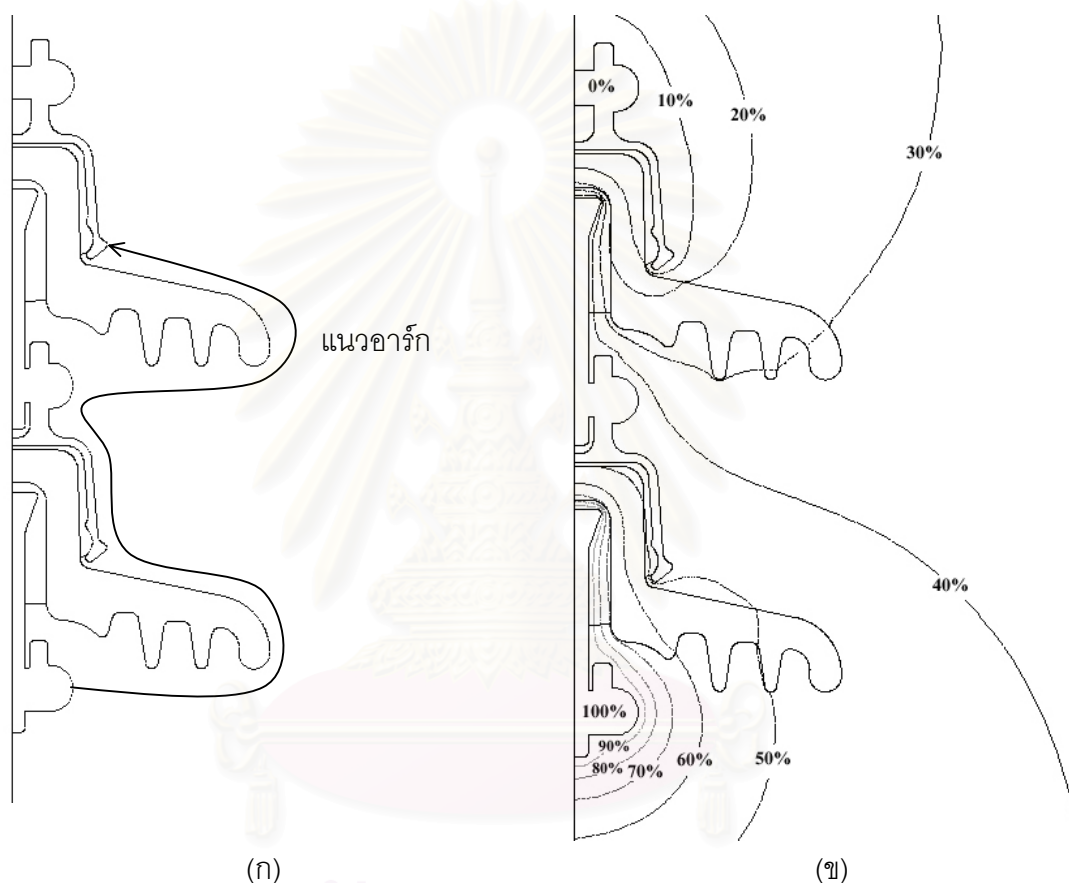
รูปที่ 4.9 กราฟความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวเจาะทะลุ 1



รูปที่ 4.10 กราฟความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวเจาะทะลุ 2

4.4.4 ผลการจำลองแบบเปรียบเทียบระหว่างลูกถ้วยแขวนธรรมดา2ลูกต่อกัน กับลูกถ้วยแขวนคู่คอดันต้นแบบ และลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสอง

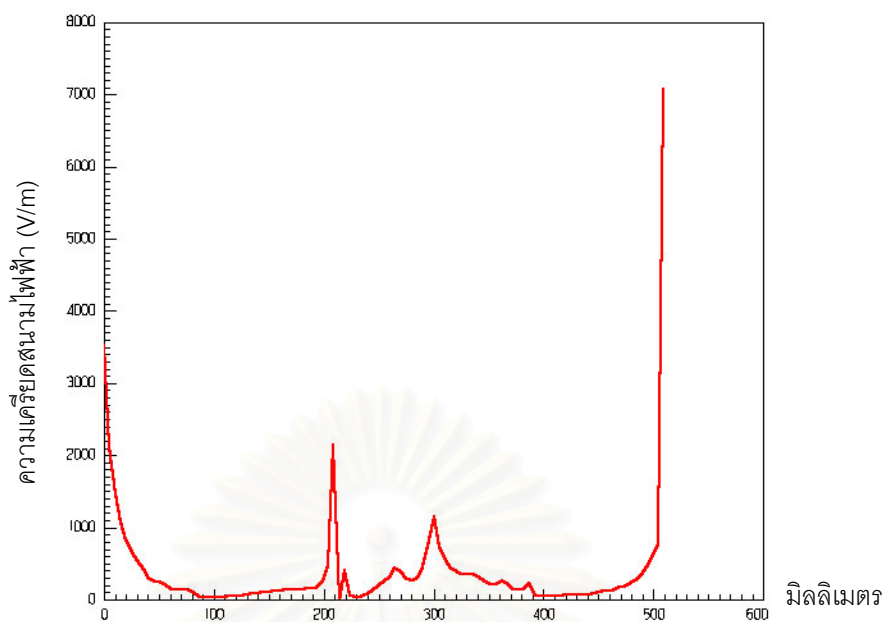
เริ่มจากการจำลองแบบลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 ต่อกันเป็นพวงสองลูก ทำการคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวอาร์กที่แสดงไว้ในรูป4.11(ก) ได้ผลดังรูปกราฟ 4.12 และทำการวาดเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าได้ดังรูปที่4.11(ข)



รูปที่ 4.11 (ก) แบบจำลองลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 สองลูกต่อกัน

(ข) เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าของลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 สองลูกต่อกัน

จากรูปที่4.11(ข) จะเห็นได้ว่าลูกถ้วยแขวนธรรมดาสองลูกต่อกันจะมีการกระจายสนามไฟฟ้าที่ต่ำกว่าลูกถ้วยแขวนธรรมดาลูกเดียว และเมื่อทำการคำนวณหาค่าขนาดความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวอาร์กซึ่งได้ผลตามรูปกราฟที่4.12 พบว่า ณ ตำแหน่งก้านยึดลูกถ้วยมีความเครียดสนามไฟฟ้า 3,526 V/m ซึ่งต่ำกว่าในกรณีลูกถ้วยเดี่ยว 56% ณ จุดเดียวกัน ดังนั้นการต่อลูกถ้วยเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งลูกจะสามารถลดความเครียดสนามไฟฟ้าได้ถึงครึ่งเท่าตัว ในขณะที่ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดมีค่า 7,073 V/m เกิดขึ้นที่บริเวณหัวครอบโลหะด้านแรงต่ำ

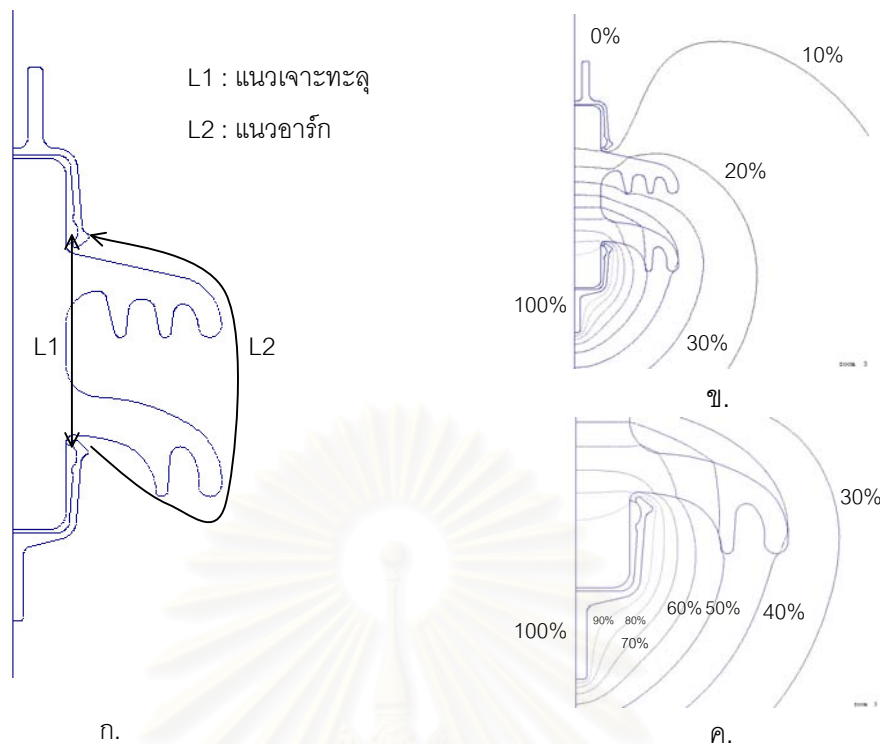


รูปที่ 4.12 กราฟความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวอาร์ก
ของแบบจำลองลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 สองลูกต่อกัน

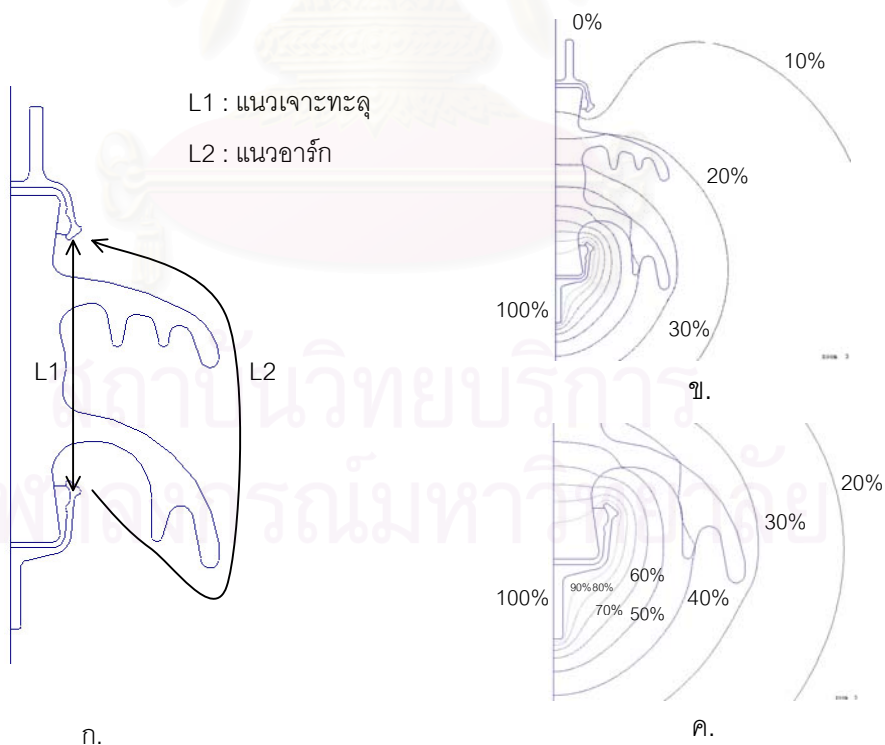
ทำการจำลองแบบในลักษณะวิธีเดียวกันกับลูกถ้วยแขวนธรรมดา สามารถหาลักษณะการกระจายสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยแขวนคู่คอดตันต้นแบบ และแบบสองได้ดังรูปที่ 4.13 (ข) และ 4.14 (ข) จากรูปจะเห็นได้ว่าการกระจายสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยแขวนคู่คอดตันแบบสองเมื่อเทียบกับต้นแบบจะมีลักษณะการกระจายที่ดีกว่า เนื่องจากความหนาเนื้อฉนวนพอร์ซเลนระหว่างส่วนอิเล็กโตรดมีค่ามากขึ้นและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปีกมากขึ้น

เมื่อพิจารณาการกระจายสนามไฟฟ้าในส่วนหัวครอบโลหะส่วนบนของลูกถ้วยแขวนคู่คอดตันแบบสองเมื่อเทียบกับแบบแรกพบว่า ในลูกถ้วยแขวนคู่คอดตันแบบสองมีการกระจายสนามไฟฟ้าดีกว่าแบบแรก ยิ่งกว่านั้นในส่วนแกนกลางที่เป็นคอดตันเนื้อพอร์ซเลนจะเห็นได้ชัดว่ามีลักษณะการกระจายสนามไฟฟ้าที่ดีกว่า

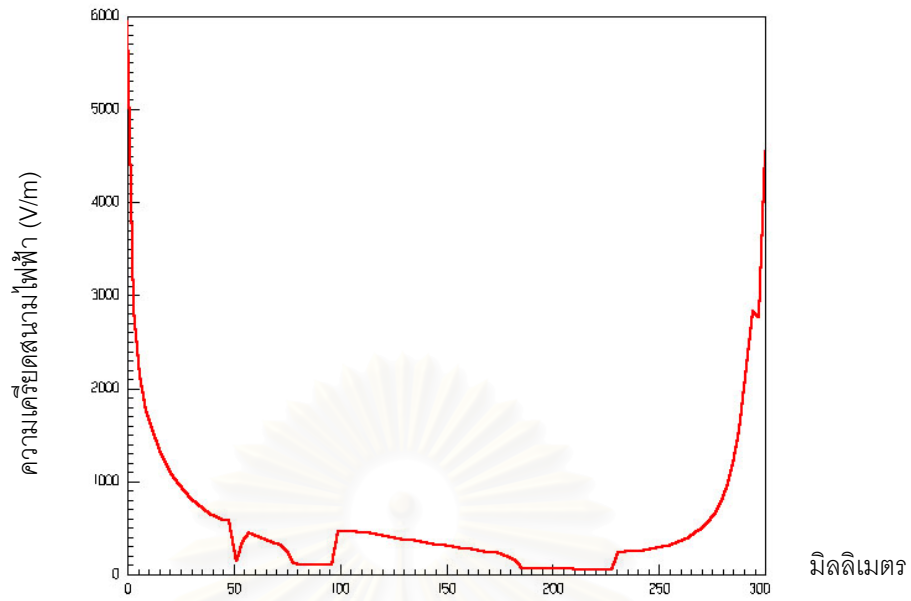
เมื่อพิจารณาค่าสนามไฟฟ้าตามแนวอาร์ก(ในรูปที่ 4.13 (ก) และ 4.14 (ก)) ที่เริ่มต้นระยะจากหัวครอบโลหะแรงสูงไปสู่อำนาจครอบโลหะแรงต่ำ ผลปรากฏว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณหัวครอบโลหะแรงสูงของลูกถ้วยแขวนคู่คอดตันแบบสองมีค่าสูงกว่าแบบแรก 14.7% แต่ความเครียดสนามไฟฟ้าในส่วนหัวครอบโลหะแรงต่ำในลูกถ้วยแขวนคู่คอดตันแบบสองมีค่าต่ำกว่าแบบแรก 42% โดยแบบแรกมีค่า 4,547.83 V/m ส่วนในแบบสองมีค่า 2,619.24 V/m ดังรูปกราฟที่ 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ



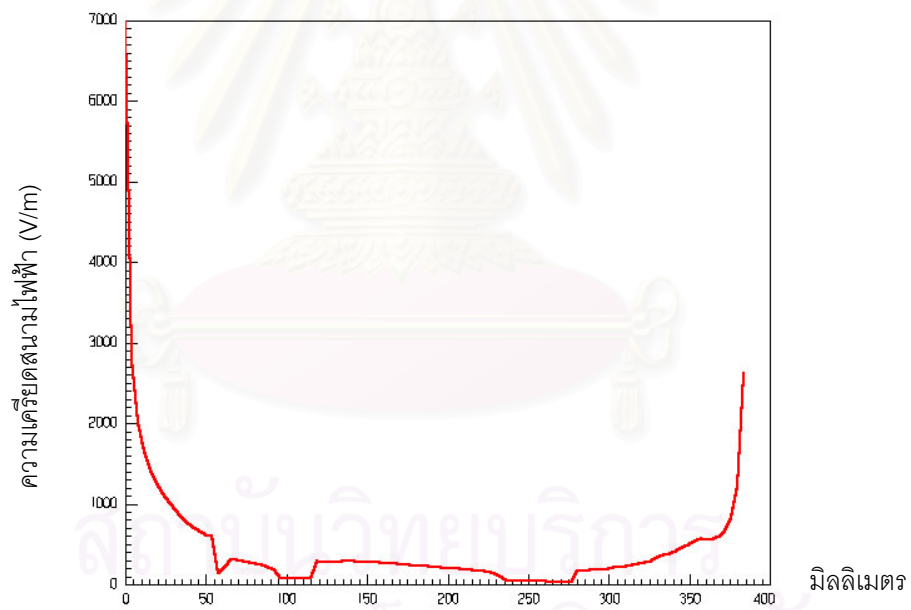
รูปที่ 4.13 (ก) แบบจำลองลูกถ้วยแขวนแขนคู่คอดันต้นแบบ (ข) เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าของลูกถ้วยแขวนแขนคู่คอดันต้นแบบ (ค) ภาพขยายเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าบริเวณหัวครอบแรงสูง



รูปที่ 4.14 (ก) แบบจำลองลูกถ้วยแขวนแขนคู่คอดันแบบสอง (ข) เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าของลูกถ้วยแขวนแขนคู่คอดันแบบสอง (ค) ภาพขยายเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าบริเวณหัวครอบแรงสูง

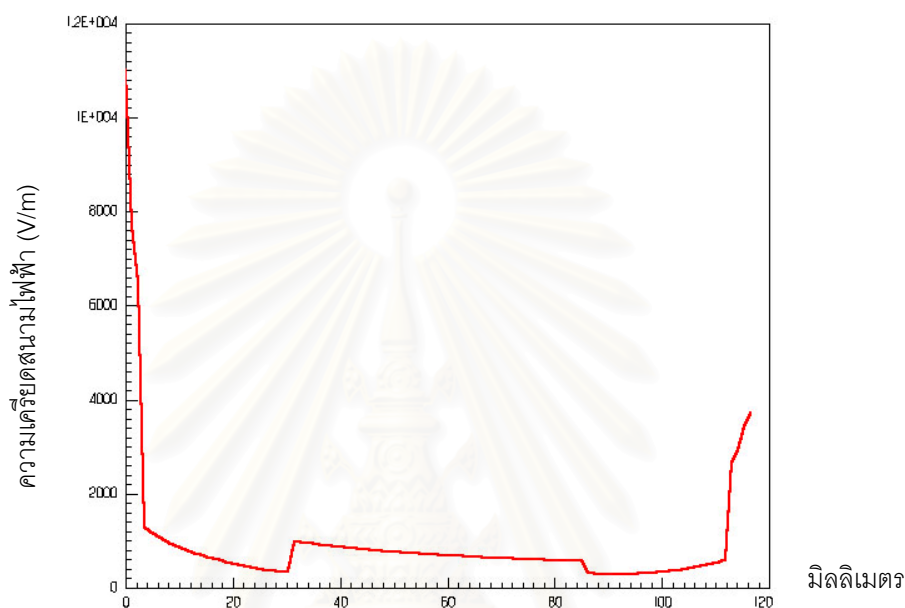


รูปที่ 4.15 กราฟความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวอาร์กของลูกถ้วยแขวนคู่คอดตันต้นแบบ

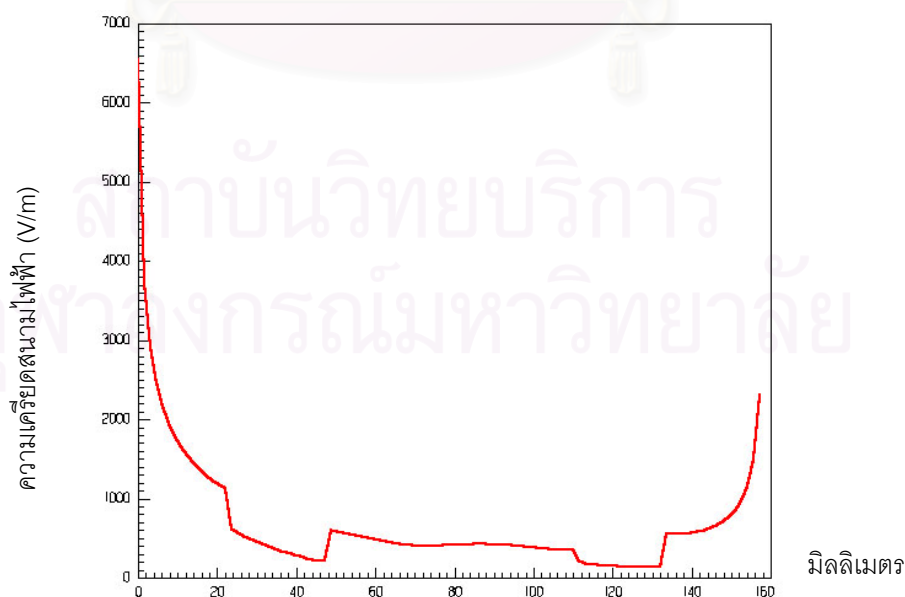


รูปที่ 4.16 กราฟความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวอาร์กของลูกถ้วยแขวนคู่คอดตันแบบสอง

ความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวเจาะทะลุที่แสดงไว้ในรูป 4.13 (ก) และ 4.14 (ก)) ของ ลูกถ้วยแขวนคู่คอดตันแบบแรกและแบบสอง สามารถคำนวณและวาดรูปกราฟความเครียดสนามไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจะพบว่า ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณ หัวครอบโลหะแรงสูงของลูกถ้วยแขวนคู่คอดตันแบบสองมีค่า 6,649 V/m ต่ำกว่าของลูกถ้วยแขวนคู่คอดตันแบบแรก 44% ซึ่งในแบบแรกมีค่า 11,913 V/m



รูปที่ 4.17 กราฟความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวเจาะทะลุของลูกถ้วยแขวนคู่คอดตันแบบแรก

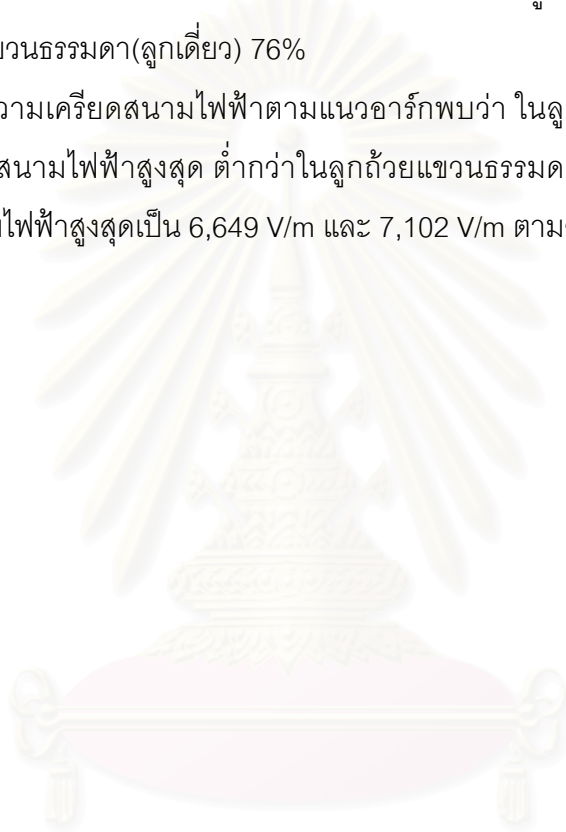


รูปที่ 4.18 กราฟความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวเจาะทะลุของลูกถ้วยแขวนคู่คอดตันแบบสอง

ส่วนในบริเวณหัวครอบโลหะแรงต่ำของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองมีค่าต่ำกว่าในลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบแรก อยู่ 32% โดยมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในแต่ละแบบ 2,665 V/m และ 3,916 V/m ตามลำดับ

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองจะมีโอกาสการเกิดเจาะทะลุได้น้อยกว่าในลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบแรก และเมื่อนำค่าความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวเจาะทะลุของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองมาเปรียบเทียบกับลูกถ้วยแขวนธรรมดาพบว่า ในลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณโลหะแรงสูง ต่ำกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในลูกถ้วยแขวนธรรมดา(ลูกเดี่ยว) 76%

ส่วนค่าความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวอาร์กพบว่า ในลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ต่ำกว่าในลูกถ้วยแขวนธรรมดาสองลูกต่อกัน 6.4% โดยค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเป็น 6,649 V/m และ 7,102 V/m ตามลำดับ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

การทดสอบและวิเคราะห์ผล

การทดสอบผลิตภัณฑ์ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าเป็นสิ่งจำเป็น ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่า ลูกถ้วยที่ผลิตขึ้นในโรงงานนั้นมีคุณสมบัติและคุณภาพได้ตามที่มาตรฐานกำหนด ซึ่งเมื่อนำไปใช้งานแล้วจะทำให้การฉนวนของระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ามีความเชื่อถือได้ ไม่เกิดผิดพลาด มาตรฐานได้กำหนดให้มีการทดสอบเกี่ยวกับรูปร่างและมิติ คุณสมบัติทางไฟฟ้า คุณสมบัติทางกล ฯลฯ ซึ่งสามารถแบ่งการทดสอบออกได้เป็น 3 ประเภทคือ [17] การทดสอบประจำ (Routine test) ลูกถ้วยที่ทำการผลิตขึ้นมาทุกลูกจะต้องผ่านการทดสอบนี้ตามข้อกำหนด การทดสอบเฉพาะแบบ (Type test) เป็นการทดสอบเพื่อออกมาตรฐานรับรอง และการทดสอบเพื่อตรวจรับ (Acceptance test) เป็นการทดสอบเพื่อดูว่าผลิตภัณฑ์ลูกถ้วยยังคงได้คุณภาพตามมาตรฐานตามข้อกำหนดอยู่หรือไม่ ในที่นี้จะได้กล่าวถึงการทดสอบเฉพาะแบบนี้

ลูกถ้วยแขวนคู่คอตันต้นแบบ และลูกถ้วยแขวนคู่คอตันแบบสองที่ได้ทำการออกแบบ ลักษณะทางด้านมิติและทำการสร้างเสร็จดังในรูปที่ 5.1 นำมาทำการทดสอบทางไฟฟ้า ทางกล และทางความร้อน โดยจะอิงการทดสอบเฉพาะแบบ ของลูกถ้วยแขวน ลูกถ้วยแท่ง และลูกถ้วย คอตันยาวเป็นเกณฑ์พิจารณา เพื่อศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและลักษณะสมบัติทางกล ฯลฯ เพื่อจะได้้นำผลของลูกถ้วยแขวนคู่คอตันเปรียบเทียบกับผลของลูกถ้วยแขวนธรรมดา

5.1 การทดสอบเฉพาะแบบ (Type test หรือ Design test)

เนื่องจากในส่วนของการศึกษาวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบลักษณะมิติโดยใช้มาตรฐาน IEC Publ. No. 815(1986) [8] ร่วมกับ ANSI C29.2 (1992) [21] เมื่อออกแบบและสร้างเสร็จ จึงได้นำมาทำการทดสอบ ในขั้นต้นนี้การทดสอบทางไฟฟ้าและทางความร้อนจะอิงการทดสอบตามมาตรฐาน ANSI C29.1(1992) [10] เพราะมาตรฐานของANSIมีขั้นตอนวิธีการทดสอบที่ชัดเจนกว่า การทดสอบทางกลอิงกับมาตรฐาน IEC Publ. No. 383-1 (1993) [1] เนื่องจาก ลูกถ้วยแขวนคู่คอตันมีลักษณะคล้ายกับลูกถ้วยแขวนคอตันยาว

การทดสอบอันเป็นแก่นสำคัญของกรวิจัยนี้คือ การทดสอบเจาะทะลุด้วยแรงดันอิมพัลส์ หน้าคลื่นซึ่งจะอิงกับมาตรฐาน IEC 1211(1994) [4], AS 2947.1(1989) [5] และ CAN/CSA-C411.1-M89(1989) [6]



ก.



ข.



ค.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 5.1 ลูกถ้วยที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

ก. ลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 , ข. ลูกถ้วยแขวนคู่คอตันตันแบบ

ค. ลูกถ้วยแขวนคู่คอตันแบบสอง

การทดสอบเฉพาะแบบตามมาตรฐานข้างต้นสามารถจำแนกได้ดังนี้

5.1.1 มาตรฐานANSI C29.1(1988) การทดสอบเฉพาะแบบสำหรับลูกถ้วยแขวนประเภทB

- 1) การทดสอบวาบไฟตามผิวแห้งกระแสลับความถี่ต่ำ (Low-frequency dry flashover test)
- 2) การทดสอบวาบไฟตามผิวเปียกกระแสลับความถี่ต่ำ (Low-frequency wet flashover test)
- 3) การทดสอบวาบไฟอิมพัลส์วิกฤต 1.2/50 μ s (Critical impulse flashover tests 1.2/50 μ s)
- 4) การทดสอบวัฏจักรโหลดทางกล-ทางความร้อน (Thermal-mechanical load cycle test)
- 5) การทดสอบอุณหภูมิฉับพลัน (Thermal shock test)
- 6) การทดสอบส่วนเหลือ (Residual-strength test)
- 7) การทดสอบแรงกระทบ (Impact test)
- 8) การทดสอบสลักยึด (Cotter key test)
- 9) การทดสอบการขยายตัวของซีเมนต์ (Cement expansion)

5.1.2 มาตรฐานIEC 383-1993-04 การทดสอบเฉพาะแบบสำหรับลูกถ้วยแขวนประเภท A

- 1) การตรวจสอบลักษณะมิติ (Verification of dimensions)
- 2) การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์สภาวะแห้ง (Dry lightning impulse withstand voltage test)
- 3) การทดสอบความคงทนต่อแรงดันกระแสลับความถี่กำลังสภาวะเปียก (Wet power-frequency withstand voltage test)
- 4) การทดสอบโหลดทางกล (Mechanical failing load test)
- 5) การทดสอบทางความร้อนและทางกล (Thermal-mechanical performance test)

จากมาตรฐานที่กล่าวไว้ข้างต้นมีจำนวนรายการทดสอบค่อนข้างมาก ซึ่งประกอบด้วยการทดสอบลูกถ้วยประเภทB และลูกถ้วยประเภทA โดยจะนำมาพิจารณาเลือกรายการทดสอบตามความเหมาะสม และขีดความสามารถที่จะทำการทดสอบได้ ในการวิจัยนี้จึงได้ทำการทดสอบดังหัวข้อต่อไปนี้

5.2 การทดสอบรูปร่างและมิติ (Visual and Dimensional tests)

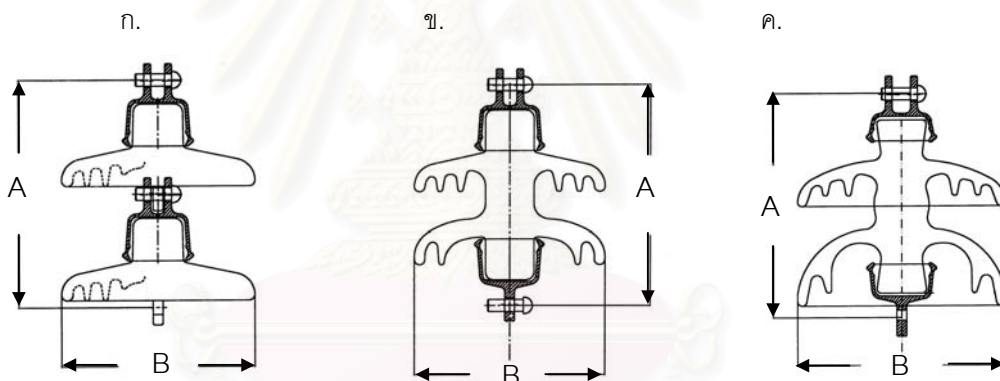
การทดสอบรูปร่างและมิติเป็นการทดสอบลักษณะทั่วไป ลูกถ้วยมาตรฐานแต่ละชนิดจะกำหนดรูปร่างลักษณะมิติไว้แน่นอน พร้อมกับค่าที่ยอมให้คลาดเคลื่อนได้ ทั้งนี้เพราะการเผ่าย่อมทำให้มิติลดลงจากลูกถ้วยที่ยังดิบอยู่ และตรวจดูสภาพเรียบร้อยทั่วไปของผิวเคลือบมัน อย่างไรก็ตาม

ดีทั้งมิติและสภาพเรียบร้อยของผิวมักจะควบคุมด้วยคุณสมบัติทางไฟฟ้า และทางกลโดยอัตโนมัติ เพราะขนาดเล็กเกินไปย่อมทนต่อแรงดันไฟฟ้าหรือทางกลไม่ได้

การทดสอบลักษณะรูปร่างและมิติของลูกถ้วยแขวนแขวนคู่คอตันได้ทำการตรวจสอบเทียบกับค่ามิติของลูกถ้วยแขวนธรรมดาจำนวนสองลูกต่อกัน จากมาตรฐาน ANSI C29.2 กำหนดค่ามิติและค่าคลาดเคลื่อนดังในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่ามิติของลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 ตามมาตรฐาน ANSI C29.2

สัญลักษณ์	ลักษณะทางด้านมิติ	ความยาว (หน่วย มิลลิเมตร)	ค่าคลาดเคลื่อน (หน่วยมิลลิเมตร)
$L_{leakage}$	ระยะรั้ว (Leakage Distance)	292	เป็นค่าต่ำสุด
A'	ความยาวตามแนวแกน (Vertical Length)	146	± 3
B'	ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางปีกลูกถ้วย (Shell Diameter Length)	273	เป็นค่าสูงสุด



รูปที่ 5.2 ลักษณะรูปร่างมิติของลูกถ้วย

ก. ลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4

ข. ลูกถ้วยแขวนคู่คอตันต้นแบบ

ค. ลูกถ้วยแขวนคู่คอตันแบบสอง

ตารางที่ 5.2 สรุปผลการตรวจสอบค่ามิติของลูกถ้วยต่างๆ

ลูกถ้วย	ความยาวเฉลี่ยที่ทำการวัดได้ (มิลลิเมตร)											
	A			B			LEAKAGE			ARCING		
	D	M	ϵ_d	D	M	ϵ_d	D	M	ϵ_d	D	M	ϵ_d
ANSI Cl. 52-4	292	292	0	254	241	13	650	591	59	375	371	4
คู่คอดตันต้นแบบ	292	292	0	254	251	3	630	584	46	290	285	5
คู่คอดตันแบบสอง	292	292	0	270	270	0	720	709	11	380	375	5

หมายเหตุ : D = ค่ามิติที่ทำการออกแบบ

M = ค่ามิติที่ทำการวัดจากลูกถ้วยที่ทำการสร้างเสร็จ

$$\epsilon_d = D - M$$

(ดูข้อมูลรายละเอียดของค่ามิติในแต่ละลูกถ้วยได้ในภาคผนวก ก)

จากผลการตรวจสอบลักษณะรูปร่างและมิติพบว่า ลูกถ้วยแขวนคู่คอดตันต้นแบบ และแบบสอง อยู่ในเกณฑ์ข้อกำหนดที่ได้กล่าวในหัวข้อ 4.4 คือเทียบอิงสมนัยกับลูกถ้วยแขวนธรรมดาสองลูกนำมาต่อกัน ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนหลังการเผาดังตารางที่ 5.2

5.3 การทดสอบวาวไฟตามผิว

เนื่องจากลูกถ้วยแขวนคู่คอดตันนี้ยังมีได้มีมาตรฐานกำหนดทดสอบจึงจัดอยู่ในการทดสอบเฉพาะแบบ โดยจะอิงข้อกำหนดของลูกถ้วยแบบแขวนที่สมนัยกันเป็นเกณฑ์เปรียบเทียบ ในขั้นต้นได้ทำการทดสอบดังต่อไปนี้

1) ทดสอบแรงดันวาวไฟตามผิวแห่ง 50 Hz กับพวงลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 ที่ต่อกันสองลูกจำนวน 20 คู่ ลูกถ้วยแขวนคู่คอดตันต้นแบบจำนวน 3 ลูก และลูกถ้วยแขวนคู่คอดตันแบบสองจำนวน 20 ลูก

2) ทดสอบแรงดันวาวไฟอิมพัลส์วิกฤต 1.2/50 μ s ชั่วบวกละลบกับพวงลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 ที่ต่อกันสองลูกจำนวน 20 คู่ ลูกถ้วยแขวนคู่คอดตันต้นแบบจำนวน 3 ลูก และลูกถ้วยแขวนคู่คอดตันแบบสองจำนวน 20 ลูก

5.3.1 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการวาวไฟตามผิว 50Hz ในสถานะแห้ง

ผลการทดสอบแรงดันวาวไฟตามผิว 50 Hz ในสถานะแห้งของลูกถ้วยแขวนธรรมดาและลูกถ้วยแขวนคู่คอดตันทั้งแบบแรกและแบบสองเป็นดังตารางที่ 5.3-5.8 โดยทำการทดลองป้อนแรงดันให้เกิดการวาวไฟอย่างต่ำ 5 ครั้งต่อลูก นำมาหาค่าเฉลี่ย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเพื่อความ

เชื่อมั่นในผลการทดสอบต่อความแปรเปลี่ยนของสภาวะบรรยากาศเช่น อุณหภูมิ ความชื้น และความดันบรรยากาศ จึงได้ทำการทดสอบซ้ำอีกครั้ง



รูปที่ 5.3 วงจรทดสอบแรงดันวาทไฟตามผิวความถี่ 50 Hz ในสภาวะแห้ง

ตารางที่ 5.3 สรุปผลทดสอบแรงดันวาทไฟตามผิว 50 Hz ในสภาวะแห้งของลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 สองลูกต่อกันครั้งที่ 1*

ค่าแรงดันวาทไฟตามหมายเลขลูกถ้วย kV (r.m.s.)				
No.	$U_{av,corrected}$	No.	$U_{av,corrected}$	$U_{av,corrected}(total)$
1	154	11	155	156 ($\sigma = 1.36$)
2	153	12	157	
3	155	13	154	
4	158	14	156	
5	157	15	156	
6	156	16	155	
7	157	17	155	
8	155	18	158	
9	157	19	157	
10	156	20	155	

*หมายเหตุ สามารถดูรายละเอียดข้อมูลการทดสอบได้ในภาคผนวก ข

ตารางที่ 5.4 สรุปผลทดสอบแรงดันวาทไฟตามผิว 50Hz ในสภาวะแห้งของลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 สองลูกต่อกันครั้งที่ 2 (Revision)*

ค่าแรงดันวาทไฟตามหมายเลขลูกถ้วย KV (r.m.s.)				
No.	$U_{av,corrected}$	No.	$U_{av,corrected}$	$U_{av,corrected(total)}$
1	156	11	161	157 ($\sigma = 1.60$)
2	154	12	158	
3	156	13	158	
4	156	14	159	
5	156	15	158	
6	157	16	155	
7	157	17	157	
8	157	18	156	
9	157	19	159	
10	159	20	157	

ตารางที่ 5.5 สรุปผลการทดสอบค่าวาทไฟตามผิว 50Hz ในสภาวะแห้งของลูกถ้วยแขวนคู่คอตันตันแบบครั้งที่ 1*

ค่าแรงดันวาทไฟตามหมายเลขลูกถ้วย KV (r.m.s.)		
No.	$U_{av,corrected}$	$U_{av,corrected(total)}$
1	129	127 ($\sigma = 2.08$)
2	128	
3	125	

ตารางที่ 5.6 สรุปผลการทดสอบค่าวาทไฟตามผิว 50Hz ในสภาวะแห้งของลูกถ้วยแขวนคู่คอตันตันแบบครั้งที่ 2 (Revision)*

ค่าแรงดันวาทไฟตามหมายเลขลูกถ้วย KV (r.m.s.)		
No.	$U_{av,corrected}$	$U_{av,corrected(total)}$
1	130	129 ($\sigma = 1.53$)
2	129	
3	127	

*หมายเหตุ สามารถดูรายละเอียดข้อมูลการทดสอบได้ในภาคผนวก ข

ตารางที่ 5.7 สรุปผลการทดสอบค่าความถี่ 50Hz ในสภาวะแห้งของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสอง*

ค่าแรงดันวาทไฟตามหมายเลขลูกถ้วย kV (r.m.s.)				
No.	$U_{av,corrected}$	No.	$U_{av,corrected}$	$U_{av,corrected(total)}$
1	146	11	144	142 ($\sigma = 4.30$)
2	142	12	143	
3	140	13	145	
4	137	14	145	
5	139	15	150	
6	137	16	138	
7	137	17	142	
8	143	18	153	
9	138	19	144	
10	140	20	143	

ตารางที่ 5.8 สรุปผลการทดสอบค่าความถี่ 50Hz ในสภาวะแห้งของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสอง (Revision)*

ค่าแรงดันวาทไฟตามหมายเลขลูกถ้วย kV (r.m.s.)				
No.	$U_{av,corrected}$	No.	$U_{av,corrected}$	$U_{av,corrected(total)}$
1	144	11	147	145 ($\sigma = 1.77$)
2	145	12	147	
3	144	13	146	
4	143	14	146	
5	144	15	146	
6	144	16	145	
7	146	17	146	
8	141	18	147	
9	146	19	144	
10	141	20	146	

*หมายเหตุ สามารถดูรายละเอียดข้อมูลการทดสอบได้ในภาคผนวก ข

ผลค่าวาทตามผิว 50 Hz เฉลี่ยทั้งหมดของลูกถ้วยแขวนธรรมดาครั้งที่ 1 มีค่า $156 \text{ kV}_{\text{r.m.s.}}$ ครั้งที่ 2 (Revision) มีค่า $157 \text{ kV}_{\text{r.m.s.}}$ ดังตารางที่ 5.3-5.4 ในลูกถ้วยแขวนคู่คอดันต้นแบบครั้งที่ 1 มีค่าวาทตามผิว $127 \text{ kV}_{\text{r.m.s.}}$ ครั้งที่ 2 (Revision) มีค่า $129 \text{ kV}_{\text{r.m.s.}}$ ดังตารางที่ 5.5-5.6 ส่วนในลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองครั้งที่ 1 มีค่าวาทตามผิว $142 \text{ kV}_{\text{r.m.s.}}$ ครั้งที่ 2 (Revision) มีค่า $145 \text{ kV}_{\text{r.m.s.}}$ ดังตารางที่ 5.7-5.8 จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า

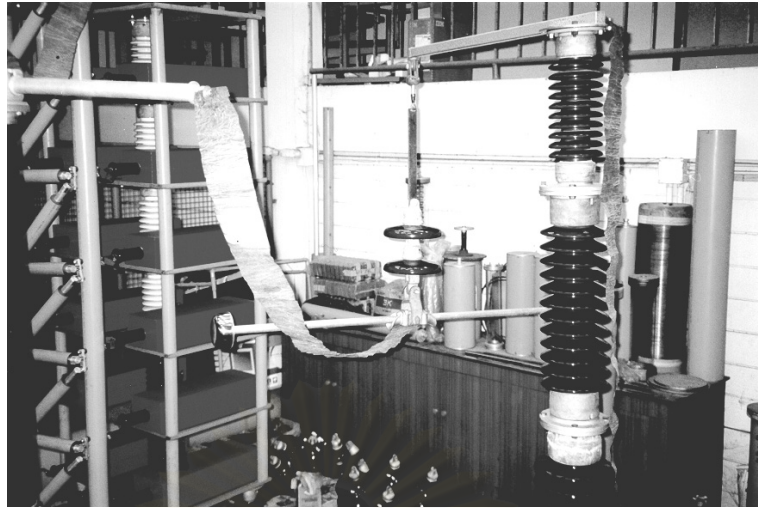
1) ค่าวาทตามผิวเฉลี่ยในการทดลองครั้งที่ 1-2 ของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันต้นแบบเมื่อเทียบกับค่าวาทตามผิวของลูกถ้วยแขวนธรรมดามีค่าต่ำกว่า $28 \text{ kV}_{\text{r.m.s.}}$ คิดเป็น 18% ทั้งนี้เนื่องจากระยะอาร์กของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันต้นแบบมีค่าต่ำกว่า 9 เซ็นติเมตร

2) ค่าวาทตามผิวเฉลี่ยในการทดลองครั้งที่ 1-2 ของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองเมื่อเทียบกับค่าวาทตามผิวของลูกถ้วยแขวนธรรมดามีค่าต่ำกว่า $12 \text{ kV}_{\text{r.m.s.}}$ คิดเป็น 8% แม้ระยะอาร์กของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองจะมีค่าใกล้เคียงกับลูกถ้วยแขวนธรรมดาก็ตาม ทั้งนี้เนื่องจากระยะอาร์กในส่วนตามผิวลูกถ้วยของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองมีค่ามากกว่า ระยะอาร์กในส่วนตามผิวของลูกถ้วยแขวนแบบธรรมดาเฉลี่ยอยู่ 4 เซ็นติเมตร

3) ค่าวาทตามผิวเฉลี่ยของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองเมื่อเทียบกับค่าวาทตามผิวของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบแรกมีค่าสูงกว่า $15 \text{ kV}_{\text{r.m.s.}}$ คิดเป็น 10% ของแบบสอง เนื่องจากระยะอาร์กของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองมีค่ามากกว่า 9 เซ็นติเมตร และผลของการจำลองแบบการกระจายสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองจะสม่ำเสมอมากกว่าของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบแรกดังที่กล่าวในหัวข้อ 4.4.4

5.3.2 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการวาทตามผิวอิมพัลส์วิกฤต

การทดสอบหาค่าวาทตามผิวอิมพัลส์วิกฤตใช้วิธี ลด-เพิ่มระดับแรงดัน จำนวนครั้งทดสอบ 20 ครั้ง ต่อ 1 ลูกถ้วย ต่อชั่วโมง ทำการทดสอบลูกถ้วยแขวนธรรมดา จำนวน 20 คู่ ลูกถ้วยแขวนคู่คอดันต้นแบบจำนวน 3 คู่ และลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองจำนวน 20 คู่ หาค่าวาทตามผิวทั้งชั่วพลและชั่วบวก ผลค่าวาทตามผิวอิมพัลส์วิกฤตเฉลี่ยของลูกถ้วยแขวนธรรมดาชั่วพลและชั่วบวกมีค่า -244 kV และ $+236 \text{ kV}$ ตามลำดับดังตารางที่ 5.9-5.10 ผลค่าวาทตามผิวอิมพัลส์วิกฤตเฉลี่ยของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองชั่วพลและชั่วบวกมีค่า -231 kV และ $+247 \text{ kV}$ ดังตารางที่ 5.11-5.12 ตามลำดับ และลูกถ้วยแขวนคู่คอดันต้นแบบผลค่าวาทตามผิวเฉลี่ยชั่วพลและชั่วบวกมีค่า -210 kV และ $+230 \text{ kV}$ ตามลำดับดังตารางที่ 5.13



ก.



ข.

- ① = เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 600 kV 30kJ
- ② = ดีไวเดอร์แบบความต้านทาน พิกัด 1000 kV อัตราส่วนลดทอน 1 : 1019
- ③ = ตัวเก็บประจุไหลด 2 nF พิกัดแรงดัน 800kV
- ④ = ชุดแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง พิกัดแรงดัน 100 kV
- ⑤ = ลูกถ้วยทดสอบ
- ⑥ = ฉนวนรองรับอุปกรณ์ทดสอบมีกราวด์ติดตั้งอยู่ด้านบน

รูปที่ 5.4 การทดสอบวาวไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต 1.2/50 μ s

ก. ขณะทดสอบลูกถ้วยแขวนธรรมดา, ข. ขณะทดสอบลูกถ้วยแขวนคู่คอดัน

ตารางที่ 5.9 สรุปผลทดสอบค่าความไว้มพัลส์วิกฤต 1.2/50 μ s ขั้วลบของลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 สองลูกต่อกัน*

ค่าแรงดันวาบไฟอิมพัลส์วิกฤตตามหมายเลขลูกถ้วย kV (ขั้วลบ)				
No.	$U_{av,corrected}$	No.	$U_{av,corrected}$	$U_{av,corrected(total)}$
1	-242	11	-244	-244 ($\sigma = 3.5$)
2	-248	12	-242	
3	-240	13	-238	
4	-242	14	-239	
5	-241	15	-250	
6	-245	16	-247	
7	-249	17	-245	
8	-242	18	-243	
9	-239	19	-244	
10	-245	20	-248	

ตารางที่ 5.10 สรุปผลทดสอบค่าความไว้มพัลส์วิกฤต 1.2/50 μ s ขั้วบวกของลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 สองลูกต่อกัน*

ค่าแรงดันวาบไฟอิมพัลส์วิกฤตตามหมายเลขลูกถ้วย kV (ขั้วบวก)				
No.	$U_{av,corrected}$	No.	$U_{av,corrected}$	$U_{av,corrected(total)}$
1	+235	11	+235	+236 ($\sigma = 1.8$)
2	+237	12	+236	
3	+235	13	+236	
4	+239	14	+235	
5	+237	15	+238	
6	+235	16	+237	
7	+235	17	+234	
8	+233	18	+235	
9	+239	19	+236	
10	+236	20	+240	

*หมายเหตุ สามารถดูรายละเอียดข้อมูลการทดสอบได้ในภาคผนวก ค

ตารางที่ 5.11 สรุปผลทดสอบค่าความไวโอมพัลส์วิกฤต $1.2/50\mu s$ ขั้วลบของลูกถ้วยแขวนคู่คอตันแบบสอง*

ค่าแรงดันวาบไฟโอมพัลส์วิกฤตตามหมายเลขลูกถ้วย kV (ขั้วลบ)				
No.	$U_{av,corrected}$	No.	$U_{av,corrected}$	$U_{av,corrected(total)}$
1	-235	11	-228	-231 kV ($\sigma = 5.2$)
2	-238	12	-228	
3	-236	13	-232	
4	-218	14	-236	
5	-232	15	-233	
6	-233	16	-235	
7	-231	17	-220	
8	-234	18	-224	
9	-231	19	-230	
10	-234	20	-231	

ตารางที่ 5.12 สรุปผลทดสอบค่าความไวโอมพัลส์วิกฤต $1.2/50\mu s$ ขั้วบวกของลูกถ้วยแขวนคู่คอตันแบบสอง

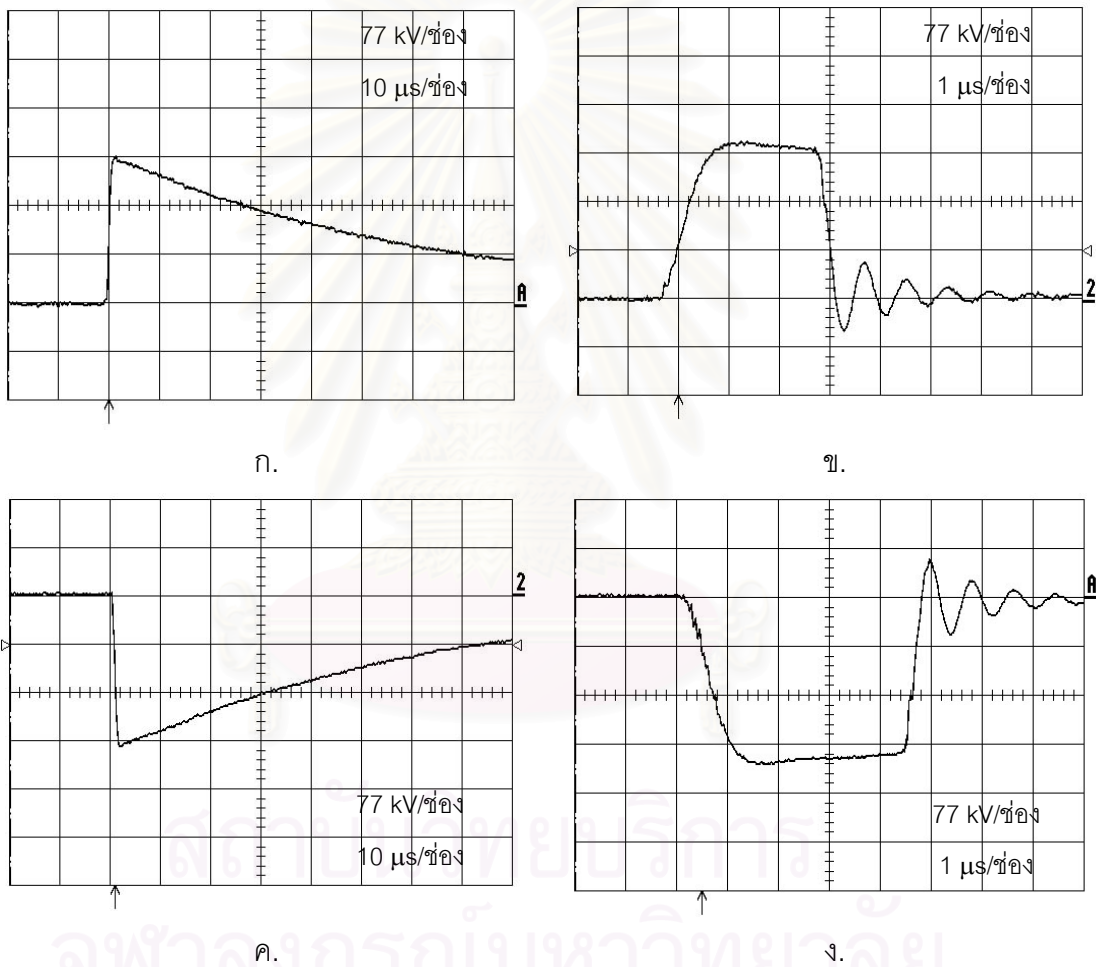
ค่าแรงดันวาบไฟโอมพัลส์วิกฤตตามหมายเลขลูกถ้วย kV (ขั้วบวก)				
No.	$U_{av,corrected}$	No.	$U_{av,corrected}$	$U_{av,corrected(total)}$
1	+246	11	+250	+247 kV ($\sigma = 4.4$)
2	+250	12	+251	
3	+247	13	+246	
4	+242	14	+255	
5	+244	15	+244	
6	+253	16	+238	
7	+244	17	+253	
8	+243	18	+246	
9	+245	19	+244	
10	+250	20	+252	

*หมายเหตุ สามารถดูรายละเอียดข้อมูลการทดสอบได้ในภาคผนวก ค

ตารางที่ 5.13 สรุปผลทดสอบค่าความไวไฟอิมพัลส์วิกฤต 1.2/50 μ s ของลูกถ้วยแขวนคู่คอตันต้นแบบ*

Number of insulator	ค่าแรงดันความไวไฟอิมพัลส์วิกฤต 1.2/50 μ s (kV)			
	$U_{b50\%} +$	$U_{b50\%} +$ (averg.)	$U_{b50\%} -$	$U_{b50\%} -$ (averg.)
1	230	+230 ($\sigma = 1.00$)	209	-210 ($\sigma = 1.53$)
2	231		212	
3	229		210	

*หมายเหตุ สามารถดูรายละเอียดข้อมูลการทดสอบได้ในภาคผนวก ค



รูปที่ 5.5 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน 1.2/50 μ s

(ก), (ค) รูปคลื่นเต็มขั้วบวก และลบ (1.1/45 μ s)

(ข), (ง) รูปคลื่นตัดขั้วบวก และลบ (1.1/45 μ s)

จากผลการทดสอบวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตรูปคลื่นมาตรฐาน พบว่า

1) ค่าแรงดันวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตชั่วพลในลูกถ้วยแขวนคู่คอดันต้นแบบ มีค่าต่ำกว่าชั่วววก 20kV คิดเป็น 8.7% และผลการทดสอบเป็นไปในทางเดียวกันสำหรับลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสอง ซึ่งมีค่าแรงดันวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตชั่วพลต่ำกว่าชั่วววก 16kV คิดเป็น 6.5% แต่ผลการทดสอบวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตในลูกถ้วยแขวนธรรมดา จะมีผลในทางตรงข้ามกับลูกถ้วยแขวนคู่คอดันทั้งสองแบบ กล่าวคือ ค่าแรงดันวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตชั่วพลในลูกถ้วยแขวนธรรมดาจะมีค่าสูงกว่าชั่วววก 8kV คิดเป็น 3.3% ทั้งนี้เนื่องจากผลของลักษณะอิเล็กโตรดของลูกถ้วยทั้งสองมีลักษณะต่างกัน ลูกถ้วยแขวนธรรมดามีอิเล็กโตรดเป็นหัวครอบโลหะกับก้านโลหะจึงมีลักษณะแบบ plane-rod ส่วนลูกถ้วยแขวนคู่คอดันมีหัวครอบโลหะทั้งสองด้านหัวและท้าย จึงมีลักษณะแบบ sphere gap คืออิเล็กโตรดสองด้านเหมือนกันแต่ด้านหนึ่งต่อลงดิน

2) เมื่อลองมาพิจารณาผลการทดสอบระหว่าง ลูกถ้วยแขวนคู่คอดันเทียบกับลูกถ้วยแขวนธรรมดา พบว่า ค่าแรงดันวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตในชั่วพลและชั่วววกของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันต้นแบบมีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตของลูกถ้วยแขวนธรรมดา ทั้งนี้เนื่องจากระยะอาร์กของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันต้นแบบ มีค่าต่ำกว่าระยะอาร์กของลูกถ้วยแขวนธรรมดา 9 เซนติเมตร ส่วนค่าแรงดันวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าแรงดันวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตของลูกถ้วยแขวนธรรมดาทั้งชั่วพลและชั่วววก สาเหตุเป็นเพราะระยะอาร์กมีค่าใกล้เคียงกันนั่นเอง

5.4 การทดสอบเจาะทะลุ

ทำการทดสอบเจาะทะลุลูกถ้วยด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันอิงตามมาตรฐาน IEC 1211(1994) [4], AS 2947.1(1989) [5] และ CAN/CSA-C411.1-M89(1989) [6] ที่ความชันเริ่มต้น 2,500 kV/ μ s แรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันสามารถสร้างได้โดยการตัดรูปคลื่น จากแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐานที่สร้างขึ้นโดยเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ปกติ 1.2/50 μ s ซึ่งมีค่ากำหนดคือ 1,000 kV 30 kJ ค่าเก็บประจุอิมพัลส์ของเครื่องกำเนิด 50 nF และค่าเก็บประจุคัปปลิ่ง 8 nF และมีวงจรเสริมที่ทำให้เกิดคลื่นตัดประกอบด้วยสปาร์กแกปตัดคลื่นแบบทรงกลมทองแดง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. ติดตั้งภายในท่อพีวีซีอัดความดันก๊าซ N_2 ดังรูปที่ 5.6 ซึ่งมีรายละเอียดอธิบายไว้ในบทความ [7]

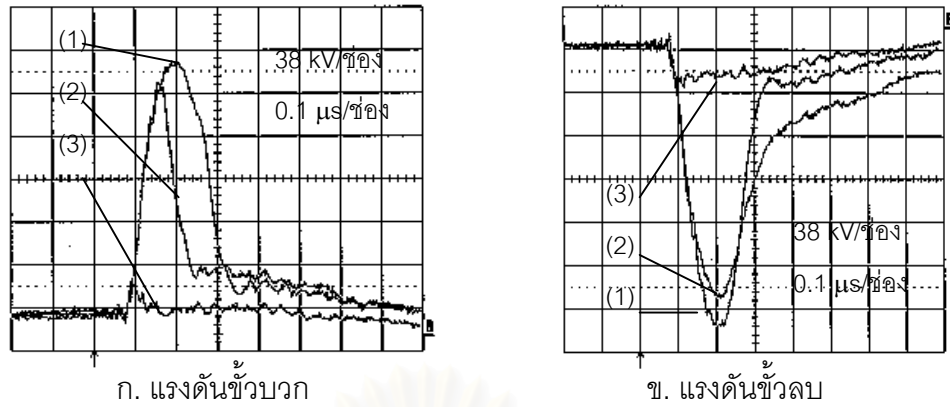


รูปที่ 5.6 วงจรทดสอบแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นขั้น

5.4.1 ผลทดสอบการเจาะทะลุลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4

เริ่มจากสุ่มตัวอย่างลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 30 ลูก มาทดสอบแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นขั้นที่ความชัน 2,500 kV/ μ s ชั่วบววก่อน และตามด้วยชั่วลบ เนื่องจากค่า $U_{b50\%}$ ชั่วบวกมีค่าต่ำกว่าค่า $U_{b50\%}$ ชั่วลบของลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 แต่ละชั่วทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นขั้น 16 ครั้ง ลักษณะรูปคลื่นแรงดันทดสอบและลักษณะลูกถ้วยเมื่อเกิดการเจาะทะลุเป็นดังรูปที่ 5.7 และรูปที่ 5.8 ตามลำดับ

จากผลการทดสอบดังตารางที่ 5.14 พบว่าที่ความชัน 2,500 kV/ μ s ลูกถ้วยเกิดการเจาะทะลุ 20 ลูก จากกลุ่มตัวอย่าง 30 ลูกคิดเป็น 67% ลักษณะการเจาะทะลุมีทั้งเจาะทะลุในหัวครอบโลหะซึ่งมองไม่เห็นได้ด้วยตาเปล่าจะต้องทดสอบการวาวไฟตามผิวด้วยแรงดันกระแสสลับอีกครั้งเพื่อเป็นการยืนยัน และพบว่าในส่วนปีกจะแตกกระจายในบางกรณี



รูปที่ 5.7 กราฟแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันของลูกถ้วยแขวน ANSI Cl. 52-4

ที่ความชัน 2,500 kV/μs

- (1) ขณะวาบไฟผ่านฉนวนอากาศ
- (2) ขณะเจาะทะลุผ่านเนื้อฉนวนพอร์ซเลน
- (3) ขณะป้อนแรงดันซ้ำอีกครั้ง



ก. +2,500 kV/μs



ข. -2,500 kV/μs

รูปที่ 5.8 ลักษณะลูกถ้วยแขวน ANSI Cl. 52-4 ที่เกิดการเจาะทะลุที่ความชัน 2,500 kV/μs

ตารางที่ 5.14 สรุปผลการทดสอบเจาะทะลุของลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 ด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นขึ้น (จำนวนลูกถ้วยทดสอบ 30 ลูก)

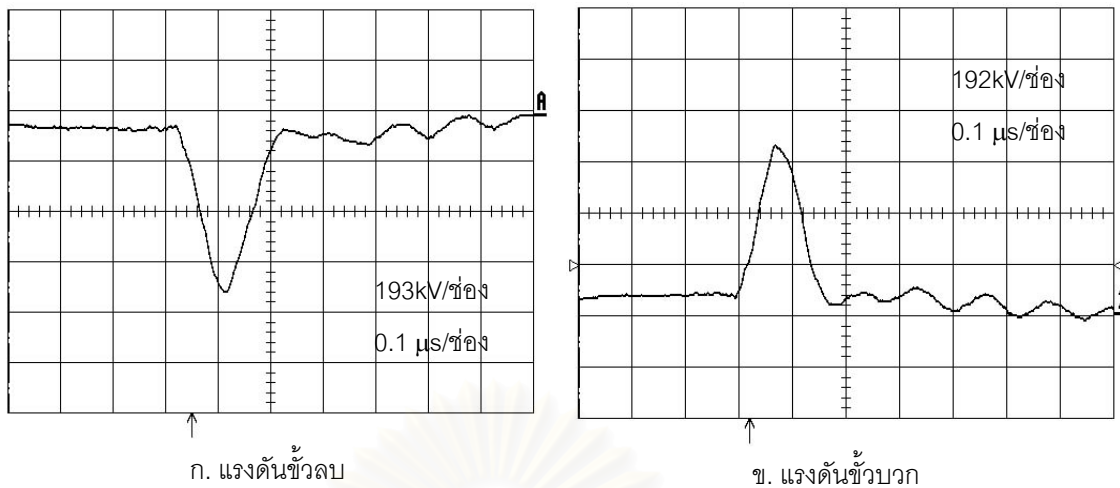
ผลการทดลอง	ความชัน 2,500 kV/ μ s	
	ชั่วบวก	ชั่วลบ
แรงดันวาบไฟ (kV)	246	265
เวลาวาบไฟ (ns)	126	134
แรงดันเจาะทะลุ (kV)	232	249
เวลาเจาะทะลุ (ns)	101	102
เมื่อป้อนแรงดันทำให้ลูกถ้วยเกิดการ เจาะทะลุเฉลี่ยครั้งที่	10	7
จำนวนลูกถ้วยเจาะทะลุ	8/30	12/22
อัตราการเจาะทะลุ	67%	

5.4.2 ผลการทดสอบเจาะทะลุของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันต้นแบบ

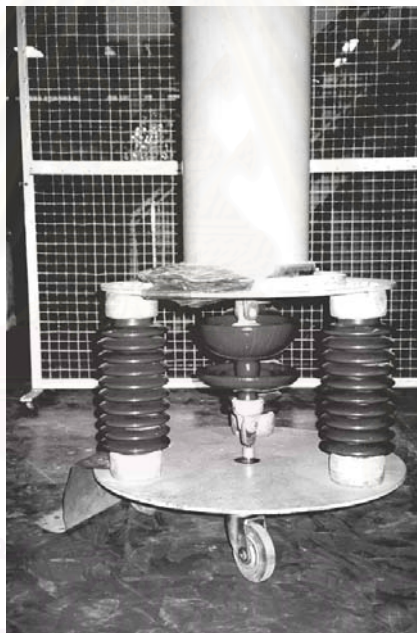
สุ่มตัวอย่างลูกถ้วยแขวนคู่คอดันต้นแบบมา 3 ลูก มาทดสอบแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นขึ้น ที่ความชันเริ่มต้น 2,500 kV/ μ s ชั่วลบก่อน และตามด้วยชั่วบวก เนื่องจากค่า $U_{b50\%}$ ชั่วลบ มีค่าต่ำกว่าค่า $U_{b50\%}$ ชั่วบวกของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันต้นแบบ แต่ละชั่วทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นขึ้น 16 ครั้ง พบว่าเมื่อทดสอบแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นขึ้นที่ความชัน 2,500 kV/ μ s ลูกถ้วยแขวนคู่คอดันต้นแบบไม่เกิดการเจาะทะลุหรือแตกร้าวแต่อย่างใด จึงได้ทำการทดสอบที่ความชันต่อไปที่ 7,500 kV/ μ s และ ที่ความชัน 10,000 kV/ μ s ลักษณะรูปคลื่นทดสอบเป็นดังรูปที่ 5.9 และผลการทดสอบเป็นดังตารางที่ 5.15

ตารางที่ 5.15 สรุปผลการทดสอบเจาะทะลุของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันต้นแบบ (จำนวนลูกถ้วย 3 ลูก)

ผลการทดลอง	ความชัน (kV/ μ s)			
	7,500		10,000	
	ชั่วบวก	ชั่วลบ	ชั่วบวก	ชั่วลบ
แรงดันวาบไฟ (kV)	409	425	514	500
เวลาวาบไฟ (ns)	61	63	44	45



รูปที่ 5.9 กราฟแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันของลูกถ้วยแขวนแขวนคู่คอตันต้นแบบ
ทดสอบที่ความชัน 10,000 kV/ μ s

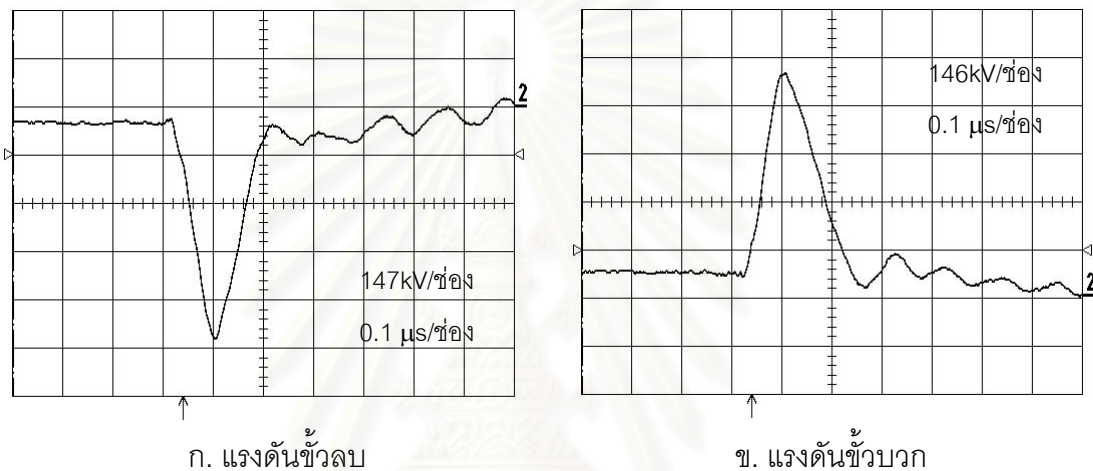


รูปที่ 5.10 ลักษณะการติดตั้งลูกถ้วยแขวนแขวนคู่คอตัน

จากผลการทดลองในตารางที่ 5.15 พบว่าลูกถ้วยแขวนแขวนคู่คอตันต้นแบบไม่เกิดการเจาะทะลุหรือส่วน
ปีกแตกร้าวแม้ความชันสูงถึง 10,000 kV/ μ s การที่ลูกถ้วยไม่เกิดการเจาะทะลุเนื่องจากลูกถ้วยแขวนแขวนคู่คอตันมี
ความสามารถทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าที่ลูกถ้วยได้รับ

5.4.3 ผลการทดสอบเจาะทะลุลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสอง

สุ่มตัวอย่างลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองมา 16 ลูก มาทดสอบแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันที่ความชันเริ่มต้น 2,500 kV/ μ s ชั่วลบก่อน และตามด้วยชั่วบวก เนื่องจากค่า $U_{b50\%}$ ชั่วลบ มีค่าต่ำกว่าค่า $U_{b50\%}$ ชั่วบวก แต่ละชั่วทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันที่ความชัน 10,000 kV/ μ s 16 ครั้ง พบว่าลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองไม่เกิดการเจาะทะลุหรือแตกร้าวแต่อย่างใด ลักษณะรูปคลื่นทดสอบเป็นดังรูปที่ 5.11 ลักษณะลูกถ้วยหลังการทดสอบเป็นดังรูปที่ 5.12 และผลการทดลองเป็นดังตารางที่ 5.16



รูปที่ 5.11 กราฟแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสอง
ทดสอบที่ความชัน 10,000 kV/ μ s



รูปที่ 5.12 ลักษณะผิวลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสอง
หลังการทดสอบเจาะทะลุ

ตารางที่ 5.16 สรุปผลการทดสอบเจาะทะลุของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสอง

ผลการทดลอง	ความชัน 10,000kV/ μ s	
	ขั้วบวก	ขั้วลบ
แรงดันวาบไฟ (kV)	+661	-718
เวลาวาบไฟ (ns)	82	85
ความชันเฉลี่ย (kV/ μ s)	+9,794	-10,054

*หมายเหตุ สามารถดูรายละเอียดข้อมูลและตัวอย่างรูปภาพแรงดันทดสอบได้ในภาคผนวก ง

จากผลการทดลองในตารางที่ 5.16 พบว่าลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองไม่เกิดการแตก ร้าวแต่อย่างใดแม้ความชันสูงถึง 10,000 kV/ μ s ดังนั้นจึงสามารถนำลูกถ้วยประเภทนี้ไปแก้ปัญหา เจาะทะลุได้

5.5 ผลการทดสอบแรงดึงทางกลลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสอง

ในส่วนการทดสอบแรงดึงทางกล ลูกถ้วยแขวนคู่คอดันจะมีลักษณะคล้ายกับลูกถ้วยแห้ง หรือลูกถ้วยคอดันยาว มาตรฐาน IEC Publ. No. 383-1993-04 [1] ให้คำแนะนำสำหรับการ ทดสอบเฉพาะแบบสำหรับลูกถ้วยคอดันยาว ให้มีการทดสอบแรงดึงทางกล (Mechanical failing load) ในส่วนขั้นตอนการทดลอง ได้ทำการประกอบที่ยึดโลหะสำหรับการทดลองตามมาตรฐาน IEC Publ. No. 471 ,1977 [24] เข้ากับลูกถ้วยทดสอบลักษณะที่ยึดเป็นดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 ส่วนประกอบโลหะยึดลูกถ้วย ตามมาตรฐาน IEC Publ. No. 471,1977

จำนวนลูกถ้วยสำหรับการทดสอบแบบ type test ของลูกถ้วยคอตันยาวมีจำนวน 5 ลูก สำหรับโครงการวิจัยนี้เลือกลูกถ้วยแขวนคู่คอตันแบบสองขนาดกลุ่มตัวอย่าง 10 ลูก แบ่งออกเป็น 2กลุ่มๆละ 5ลูก ตามมาตรฐาน IEC 383-1 ,1993-04 ให้ค่าส.ป.ส. $C_0 = 1.2$ สำหรับลูกถ้วยแขวน นำมาคำนวณหาค่าแรงดึงเฉลี่ยตามสมการที่ (5.1)

$$X_T \geq SFL + C_0 \sigma_T \quad (5.1)$$

X_T = ค่าแรงดึงเฉลี่ยจากการวัดสำหรับการทดสอบแบบ type test

SFL = Specified mechanical failing load

C_0 = ค่าคงที่การยอมรับ

σ_T = ค่าความแปรปรวนของข้อมูลทดสอบ

ถ้า X_T ที่ได้เป็นไปตามสมการถือว่าผ่านการทดสอบ ยอมรับได้

เนื่องจากลูกถ้วยแขวนคู่คอตันยังไม่ได้กำหนดค่า SFL ดังนั้นในขั้นตอนนี้จึงยังมิได้พิจารณาถึงค่าการตัดสินใจยอมรับ แต่ในส่วนการตั้งขั้นต้นได้พิจารณาค่ากำหนดของลูกถ้วยคอตันยาวในมาตรฐาน IEC 433,1998 [25] เพื่อนำไปกำหนดเลือกพิกัดเครื่องจักรสำหรับใช้ดึงที่ภาค วิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับค่าแรงดึงของลูกถ้วยคอตันยาว มีให้พิจารณาดังนี้

ตารางที่ 5.17 ค่ากำหนดแรงดึงทางกลของลูกถ้วยแขวนคอตันยาวตาม IEC 433,1998 [25]

ประเภท	ระยะความยาวตามแนวแกน (mm)	แรงดึง กำหนด (kN)
L40 B/C 170	380	40
L60 B/C 170	400	60
L100 B/C 170	450	100

นำลูกถ้วยแขวนคู่คอตันไปดึงกับเครื่องจักรที่มีแรงดึงพิกัด 40 ตันประกอบที่ยึดโลหะกับตัวเครื่องจักรและทำการประกอบยึดลูกถ้วย ลักษณะเป็นดังรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 ลูกถ้วยแขวนคู้คอตันประกอบที่ยึดโลหะเข้ากับ
เครื่องดึงแรงกลขนาดพิกัด 40 ตัน

ตารางที่ 5.18 สรุปผลการทดสอบแรงดึงทางกลของลูกถ้วยแขวนคู้คอตันแบบสองครั้งที่ 1

Insulator specimen No.	Mechanical Failing load, Ton(ตัน)	Fracture pattern
1	5.8	คอลูกถ้วยพอร์ซเลนใกล้หัวครอบโลหะด้านแรงสูงขาด
2	7.9	คอลูกถ้วยพอร์ซเลนใกล้หัวครอบโลหะด้านแรงสูงขาด
3	50kg (0.05)	คอลูกถ้วยพอร์ซเลนใกล้หัวครอบโลหะด้านแรงต่ำขาด
4	8.0	คอลูกถ้วยพอร์ซเลนใกล้หัวครอบโลหะด้านแรงสูงขาด
5	6.0	คอลูกถ้วยพอร์ซเลนใกล้หัวครอบโลหะด้านแรงสูงขาด
6	7.9	คอลูกถ้วยพอร์ซเลนใกล้หัวครอบโลหะด้านแรงสูงขาด
7	2.4	ขาดกลางลูกถ้วย (ส่วนปีกบนแยกออกจากคอตัน)
8	5.0	คอลูกถ้วยพอร์ซเลนใกล้หัวครอบโลหะด้านแรงสูงขาด
9	3.4	คอลูกถ้วยพอร์ซเลนใกล้หัวครอบโลหะด้านแรงสูงขาด
10	7.7	คอลูกถ้วยพอร์ซเลนใกล้หัวครอบโลหะด้านแรงสูงขาด
Average (X_T) = 5.4 Ton		
Standard Deviation (σ_T), = 2.725		

ผลการทดสอบแรงดึงทางกลเป็นดังตารางที่ 5.18 มีลักษณะการแตกร้าวคล้ายกันคือเกิดการหักในส่วนของเนื้อพอร์ซเลน เกิดขึ้น 3 บริเวณด้วยกันคือ บริเวณคอใกล้หัวครอบโลหะแรงต่ำ, บริเวณคอใกล้หัวครอบโลหะแรงสูง และ บริเวณคอตันกลางลูกถ้วย ดังภาพที่ 5.15 ก, ข, และ ค ตามลำดับ



ก. ขาดด้านแรงต่ำ



ข. ขาดด้านแรงสูง



ค. ขาดกลางคอตัน

รูปที่ 5.15 ลักษณะการแตกร้าวของลูกถ้วยแขวนคู่คอตันแบบสอง
หลังการทดสอบแรงดึงทางกลครั้งที่ 1

ในการดึงครั้งแรกนี้ ผลค่าแรงดึงที่ทำให้ลูกถ้วยแตกร้าวค่อนข้างไม่เกาะกลุ่มกันอันจะเห็นได้จากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มีค่า 2.725 ส่วนค่าแรงดึงเฉลี่ยของลูกถ้วยแขวนคู่คอตันมีค่า 5.4 ตัน ซึ่งมากกว่าในลูกถ้วยแบบคอตันยาว ประเภท L40 B/C 170

แต่ถึงอย่างไรก็ดีผลการทดสอบแรงดึงทางกลในครั้งแรกนี้มีผลการทดลองที่มีค่าแปรปรวนสูงและมีค่าแรงดึงที่น้อยกว่าค่าพิสัยของลูกถ้วยแขวนธรรมดาในบางลูก ซึ่งสันนิษฐานว่าเป็นผลมาจากการประกอบยึดลูกถ้วยที่หัวครอบโลหะไม่อยู่ในแนวตั้ง ฉะนั้นจึงได้มีการทดสอบเพิ่มจำนวนลูกถ้วยขึ้นอีก 10 ลูก

ตารางที่ 5.19 สรุปผลการทดสอบแรงดึงทางกลของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองครั้งที่ 2

Insulator specimen No.	Mechanical Failing load, Ton(ตัน)	Fracture pattern
11	8.8	คอลูกถ้วยพอร์ซเลนใกล้หัวครอบโลหะด้านแรงสูงขาด
12	9.8	คอลูกถ้วยพอร์ซเลนใกล้หัวครอบโลหะด้านแรงสูงขาด
13	9.7	หัวครอบโลหะด้านแรงสูงหลุดออกจากตัวลูกถ้วย
14	9.7	คอลูกถ้วยพอร์ซเลนใกล้หัวครอบโลหะด้านแรงสูงขาด
15	8.1	หัวครอบโลหะด้านแรงสูงหลุดออกจากตัวลูกถ้วย
16	9.3	หัวครอบโลหะด้านแรงสูงหลุดออกจากตัวลูกถ้วย
17	8.6	หัวครอบโลหะด้านแรงสูงหลุดออกจากตัวลูกถ้วย
18	7.0	หัวครอบโลหะด้านต่ำหลุดออกจากตัวลูกถ้วย
19	9.6	หัวครอบโลหะด้านต่ำหลุดออกจากตัวลูกถ้วย
20	8.6	หัวครอบโลหะด้านแรงสูงหลุดออกจากตัวลูกถ้วย
Average (X_T) = 8.9 Ton		
Standard Deviation (σ_T), = 0.89		

ในการทดสอบครั้งที่สองพบว่าลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองมีค่าแรงดึงทางกลทุกลูกสูงกว่าค่าแรงดึงโหลดทางกล-ไฟฟ้าของลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 ที่มีค่า 6.8ตัน ลักษณะลูกถ้วยที่ผ่านการทดสอบจะมีลักษณะที่หัวครอบโลหะด้านแรงต่ำและแรงสูงหลุดออกจากตัวลูกถ้วย และส่วนคอเกิดการแตกหักดังรูปที่ 5.16 และลักษณะหัวครอบโลหะที่หลุดออกมาเป็นดังรูปที่ 5.17

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.16 ลักษณะลูกถ้วยหลังการทดสอบแรงดึงทางกลครั้งที่ 2



รูปที่ 5.17 ลักษณะหัวครอบโลหะลูกถ้วยหลังการทดสอบแรงดึงทางกล
(ซ้าย : เกิดการหลุดออกจากตัวลูกถ้วย, ขวา : เกิดการหักบริเวณคอใกล้หัวครอบโลหะ)

5.6 ลักษณะทางด้านน้ำหนัก

ทำการชั่งน้ำหนักลูกถ้วยแขวนธรรมดาสองลูกต่อกัน เปรียบเทียบกับ ลูกถ้วยแขวนคู่คอดันต้นแบบ และลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองได้ผลดังตารางที่ 5.20

ตารางที่ 5.20 เปรียบเทียบน้ำหนักระหว่างลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 ลูกถ้วยแขวนคู่คอดันต้นแบบ และลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสอง

Number of insulator	น้ำหนักที่วัดได้ตามหมายเลขลูกถ้วย (กิโลกรัม)		
	ANSI Class 52-4 2 Units	Solid core 1 st design 1 unit	Solid core 2 nd design 1 unit
1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20	9.8, 10, 9.8, 9.7, 9.9, 9.6, 9.7, 9.9, 9.9, 9.7, 9.9, 9.8, 9.5, 10, 10.1, 9.8, 9.5, 9.7, 9.7, 10.0	10.2, 10.5, 10.6,	11.5, 12.3, 12.0, 11.5, 11.9, 11.4, 11.2, 11.4, 11.5, 11.7, 11.6, 12.0, 11.5, 11.8, 11.8, 11.3, 11.8, 11.5, 11.7, 11.7,
ค่าน้ำหนักเฉลี่ย	9.80	10.43	11.59
ผลต่างน้ำหนักเฉลี่ยเมื่อเทียบกับ ลูกถ้วยแบบ ANSI Cl. 52-4		0.63	1.79

จากตารางที่ 5.20 พบว่าค่าผลต่างน้ำหนักของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันต้นแบบมีค่าน้ำหนักมากกว่า ลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 สองลูกต่อกันอยู่ 0.63 กิโลกรัม และลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองมีค่าน้ำหนักมากกว่า ลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 สองลูกต่อกันอยู่ 1.79 กิโลกรัมเมื่อเทียบต่อ 1 ลูกถ้วยแขวนคู่คอดัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.7 ผลการทดสอบอุณหภูมิฉับพลันลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสอง

การทดสอบอุณหภูมิฉับพลันเป็นการทดสอบเพื่อการออกแบบอีกอย่างหนึ่งที่ต้องจัดให้มีขึ้นเพื่อคุณลักษณะความสม่ำเสมอของเนื้อพอร์ซเลน การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากร้อนไปเย็นหรือจากเย็นไปร้อนโดยทันทีจะมีผล หากเนื้อไม่สม่ำเสมอก็จะทำให้เกิดรอยร้าวภายในได้ การทดสอบใช้มาตรฐาน ANSI C29.1-1992 [10] และ ANSI C29.2-1992 [21] เนื่องจากลูกถ้วยแขวนคู่คอดันกล้ากึ่งระหว่างลูกถ้วยแขวนธรรมดา และลูกถ้วยแท่ง คุณภูมิของน้ำที่ใช้ในการทดสอบจึงพิจารณาได้ดังตารางที่ 5.21

ตารางที่ 5.21 ค่าพิกัดอุณหภูมิของการทดสอบอุณหภูมิฉับพลันตามมาตรฐานANSI

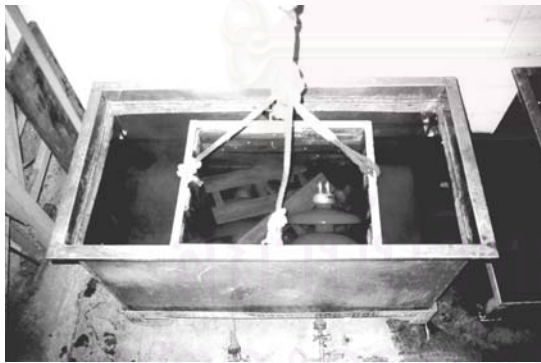
มาตรฐาน	อุณหภูมิทดสอบ (°C)	
	อุณหภูมิร้อน	อุณหภูมิต่ำ
ANSI C29.1-1988 “American National Standard for Electrical Power Insulators- Test Method”	96 ± 2	4 ± 2
ANSI C29.7-1983(Revision) [26] “ American National Standard for Wet-process Porcelain Insulators High-voltage Line-post type”	66 ± 2	4 ± 2

การทดสอบทำโดยนำลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองจำนวน 5 ลูก มาทำการจุ่มน้ำร้อนสลับน้ำเย็นจำนวน 10 cycles และทำการตรวจสอบการแตกร้าวด้วยการทดสอบการวาบไฟตามผิว ดังรายละเอียดดูได้จาก มาตรฐาน ANSI C29.1-1988 Clause 5.5 ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 5.22

ผลการทดลองพบว่าลูกถ้วยไม่เกิดการแตกร้าวแต่อย่างใด และผลค่าแรงดันวาบไฟตามผิว 50 Hz มีค่าเฉลี่ย 144 kV เกือบเคียงกับค่าแรงดันวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยตอนที่ยังไม่ได้ทำการทดสอบอุณหภูมิฉับพลัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าลูกถ้วยแขวนคู่คอดันมีคุณสมบัติทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันได้

ตารางที่ 5.22 สรุปผลการทดสอบอุณหภูมิฉับพลันของลูกถ้วยแขวนคู้คอตันแบบสอง

Cycle No.	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)		Insulator No.	Flashover 50 Hz (kV)		Visual damage
	HOT ($96 \pm 2^{\circ}\text{C}$)	COLD ($4 \pm 2^{\circ}\text{C}$)		U_{average}	$U_{\text{corrected}}$	
1	94.5	4.12	1	144	146	No
2	94.2	5.0				
3	95.0	5.0	2	143	143	No
4	94.1	3.0				
5	94.0	4.0	3	143	144	No
6	94.1	5.0				
7	94.0	5.0	4	142	143	No
8	94.0	4.5				
9	94.0	5.0	5	143	144	No
10	94.0	5.0				
$U_{\text{corrected, Total}} = 144 \text{ kV}, \sigma = 0.71$						



ก. จุ่มน้ำร้อน



ข. จุ่มน้ำเย็น

รูปที่ 5.18 การทดสอบอุณหภูมิฉับพลัน

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างลูกถ้วยแขวนคู่คอตันสองแบบด้วยกันคือ ลูกถ้วยแขวนคู่คอตันต้นแบบ และลูกถ้วยแขวนคู่คอตันแบบสอง

การออกแบบทำให้ลูกถ้วยมีความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าได้มากขึ้น ทำเป็นลักษณะคอตันที่มีข้อกำหนดทางด้านมิติอิงสมนัยกับลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 สองลูกต่อกัน การออกแบบคำนึงถึงสิ่งเปราะบางเป็นเวลานาน ทำการจำลองแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหารูปแบบ และมิติที่เหมาะสม

การทดสอบเพื่อหาคุณลักษณะสมบัติของลูกถ้วยทั้งทางไฟฟ้า ทางกล และทางความร้อน ได้ทำโดยอิงกับมาตรฐานการทดสอบเฉพาะแบบ IEC Publ. No. 383-1-1993-04 ของลูกถ้วยประเภท A และมาตรฐาน ANSI C29.1-1992 ของลูกถ้วยประเภท B

จากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปโดยย่อได้ดังต่อไปนี้

- 1) มิติของลูกถ้วยแขวนคู่คอตันแบบสองอิงสมนัยกับลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 ความยาวแนวตั้งเท่ากัน ระยะอาร์กใกล้เคียงกันแต่ระยะรั้วยาวกว่า
- 2) จากผลการจำลองแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์พบว่าลูกถ้วยแขวนคู่คอตันแบบสองมีการกระจายสนามไฟฟ้าตามแนวอาร์กดี้อยกว่าลูกถ้วยแบบธรรมดา แต่ถ้าทำให้ลูกถ้วยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากขึ้น มีความหนาตามแนวก้านมากขึ้น และระยะรั้วมากขึ้นจะสามารถทำให้ลูกถ้วยมีความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าได้ดีขึ้น
- 3) ค่าแรงดันวาบไฟตามผิวกระแสสลับความถี่ 50 Hz ของลูกถ้วยแขวนคู่คอตันแบบสองมีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันวาบไฟของลูกถ้วย ANSI Class 52-4 สองลูกต่อกัน $13 \text{ kV}_{\text{r.m.s.}}$ คิดเป็น 8% ของค่าแรงดันวาบไฟลูกถ้วยแขวนธรรมดา
- 4) ค่าแรงดันวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต $1.2/50 \mu\text{s}$ ขั้วบวกของลูกถ้วยแขวนคู่คอตันแบบสองมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันวาบไฟของลูกถ้วยแขวนธรรมดา $11 \text{ kV}_{\text{peak}}$ คิดเป็น 4.45% ส่วนในขั้วลบ ลูกถ้วยแขวนคู่คอตันแบบสองมีค่าแรงดันวาบไฟต่ำกว่าลูกถ้วยแขวนธรรมดา 13 kV คิดเป็น 5% เมื่อเทียบกับค่าแรงดันวาบไฟของลูกถ้วยธรรมดา
- 5) ลูกถ้วยแขวนธรรมดาเจาะทะลุได้ที่ความชัน $2,500 \text{ kV}/\mu\text{s}$ แต่ลูกถ้วยแขวนคู่คอตันแบบสองไม่เจาะทะลุแม้ความชันสูงถึง $10,000 \text{ kV}/\mu\text{s}$

6) ลูกถ้วยแขวนคู่คอตันแบบสองมีน้ำหนักมากกว่าลูกถ้วยแขวนธรรมดา 1.79 kg คิดเป็น 18%ของน้ำหนักลูกถ้วยแขวนธรรมดา

7) ลูกถ้วยแขวนคู่คอตันแบบสองมีค่าแรงดึงทางกลสูงกว่าค่าแรงดึงทางกล-ไฟฟ้าของลูกถ้วยธรรมดาจากค่ามาตรฐานที่มีค่า 6.8ตันทุกลูก

8) ในการทดสอบอุณหภูมิฉับพลัน ลูกถ้วยแขวนคู่คอตันแบบสองมีความคงทนต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิร้อน-เย็นได้ และมีค่าแรงดันวาบไฟตามผิว 50 Hz เฉลี่ย 144 kV ใกล้เคียงกับค่าแรงดันวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยแขวนคู่คอตันแบบสองตอนที่ยังไม่ได้ทำการทดสอบการเปลี่ยนอุณหภูมิฉับพลัน

6.2 ประโยชน์ที่ได้รับ

1) ลูกถ้วยแขวนคู่คอตันนี้สามารถนำไปใช้แก้ปัญหาการเกิดเจาะทะลุเนื่องจากแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันได้

2) การวิจัยนี้ได้ทำให้เกิดแนวทางในการพัฒนาออกแบบและสร้างลูกถ้วยฉนวนเพื่อการแก้ปัญหาเจาะทะลุชันใช้ได้เองภายในประเทศอย่างมีหลักการและเหตุผล

3) ผลการวิจัยนี้จะช่วยให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการพัฒนาออกแบบลูกถ้วยที่มีคุณภาพยิ่งขึ้นในอนาคต และเกิดการพัฒนานบุคลากรที่ปฏิบัติงานเกี่ยวกับการใช้ลูกถ้วยฉนวน

6.3 ข้อเสนอแนะ

1) ควรจะมีการศึกษาการออกแบบลูกถ้วยฉนวนในลักษณะพอเหมาะ (Optimum Design) เพราะลูกถ้วยฉนวนที่มีน้ำหนักเบา มีความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าได้สูง ทนต่อสภาวะบรรยากาศที่แปรเปลี่ยน และความเปราะเป็อนได้ดี จะเป็นการประหยัดวัสดุในการผลิต และสะดวกต่อการปฏิบัติงานของผู้นำลูกถ้วยไปใช้

2) จึงควรมีการศึกษาวิจัยลูกถ้วยแขวนคอตันชั้นเดียว เพื่อง่ายต่อการผลิต และลดต้นทุน

3) ควรจะได้มีการพัฒนาออกแบบลูกถ้วยแขวนธรรมดาที่มีเนื้อสารทนต่อแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันได้

4) ควรจะได้มีการพัฒนาการทดสอบแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันนี้ให้ดียิ่งๆขึ้นไป

รายการอ้างอิง

1. IEC Publ. 383-1. Insulator for overhead lines with a nominal voltage above 1000V
Part 1 : Ceramic or glass insulator units for a.c. system definition, test methods
and acceptance criteria. Forth edition, pp. 25, 1993.
2. สำรวัย สังข์สะอาด. การพัฒนาออกแบบและสร้างชุดกำเนิดแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักลิ้นชั้น.
รายงานทุนวิจัยรัชดาภิเษกสมโภช, กรกฎาคม, 2541.
3. สำรวัย สังข์สะอาด และ วีระพันธ์ รั้งสีวิจิตรประภา. เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1000kV
30 kJ. รายงานผลการประดิษฐ์ ทุนอุดหนุนโครงการสิ่งประดิษฐ์, ฝ่ายวิจัยจุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย, 2538.
4. IEC 1211. Insulators of ceramic material or glass for overhead lines with a nominal
voltage greater than 1000 V–Puncture testing. Technical report, First edition,
1994-06.
5. AS 2947.1. Insulators Porcelain and Glass for Overhead Power Lines Voltage
Greater than 1000V-a.c. Part 1 : Test methods. 1989.
6. CAN/CSA-C411.1-M89. AC Suspension insulators. A National standard of Canada,
1989.
7. ณรงค์ชัย ลิ่มเศรษฐกานต์. ผลกระทบแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักลิ้นชั้นต่อลูกถ้วยฉนวนพอร์ซ
เลน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
8. IEC Publ. 815. Guide for the selection of insulators in respect of polluted conditions.
1986.
9. Ansoft. Maxwell 2D Field Simulator. Ansoft Corporation, January, 1995.
10. ANSI C29.1. American National Standard for electrical power insulators –test
methods. 1988.
11. สำรวัย สังข์สะอาด. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย, 2528.
12. Naito K., Suzuki Y. Insulators Selection Criteria for Transmission Line Reliability.
NGK Review, Overseas Edition, 14 (December 1990): 8-9.

13. Morita K., Suzuki Y., Nozaki H. Study on electrical strength of suspension insulators in steep impulse voltage range. Power Delivery, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Volume: 12 Issue: 2, April 1997 : 850 –856.
14. CIGRE. Puncture testing of ceramic and glass insulators. Final report of CIGRE, Task Force 33.07.01, CIGRE 33-89(TF 07.01)85, June 6, 1990.
15. Kuffel E., Zaengl W. High voltage engineering fundamental. Pergamon Press, Great Britain, 1984.
16. S. Sangkasaad. Research and Experience with New Insulator Technologies in Thailand. World Congress & Exhibition, Shanghai, China, November 18-21 2001 : 1-3.
17. สำรวัย สังข์สะอาด. เทคโนโลยีการฉนวนในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงสูง. การอบรมทางวิชาการ, ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง, คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
18. NGK Insulator Ltd. Electrical Insulating Materials for Insulator (Confidential document for EGAT). Tokyo, Japan : 1996.
19. Looms J.S.T. Insulators for high voltages. England : Peter Peregrinus, 1990.
20. A.S. Farag, F.M. Zedan, T.C. Cheng, C.Y. Wu. H. Nour, M. Fazelian, M. Akbar, K. Al-Soufi. New dc Insulator Design for use in the Desert Environment. IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 25 No.2, April 1990: 435-448.
21. ANSI C29.2. American National Standard for electrical power insulators –Wet Process Porcelain and Toughened Glass Suspension type. 1992.
22. IEC Publ. 575. Thermal-mechanical performance test and mechanical performance test on string insulator units. First edition, 1977.
23. บุญชัย เตชะอำนาจ. การคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าบนฉนวนลูกถ้วยพอร์ซเลนด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
24. IEC Publ. 471. Dimensions of clevis and tongue couplings of string insulator units. 1977.
25. IEC Publ. 433. Characteristics of string insulator units of the long rod type. 1980.
26. ANSI C29.7. American National Standard for Wet-process Porcelain Insulators High-voltage Line-post type. 1983.

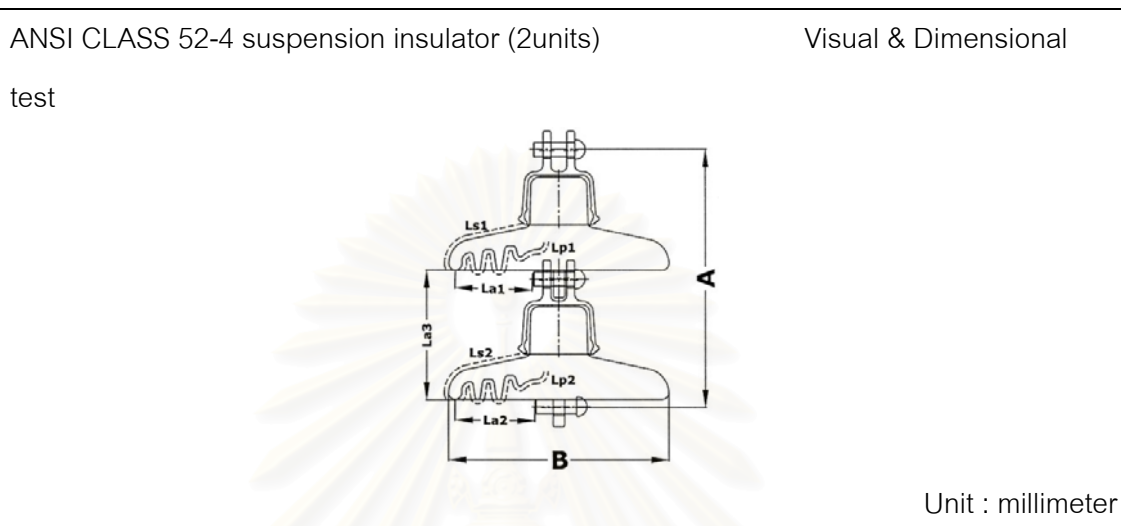


ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

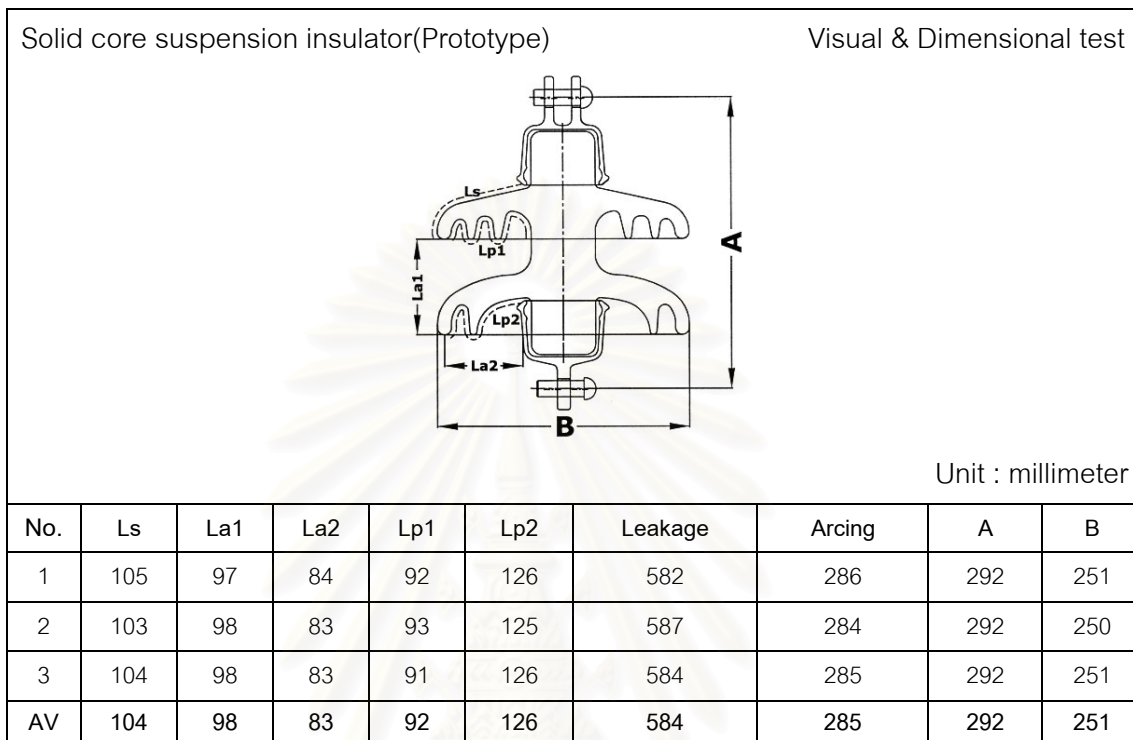
ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบวัดค่ามิติของลูกถ้วยในโครงการวิจัย
ของลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 สองลูกต่อกัน



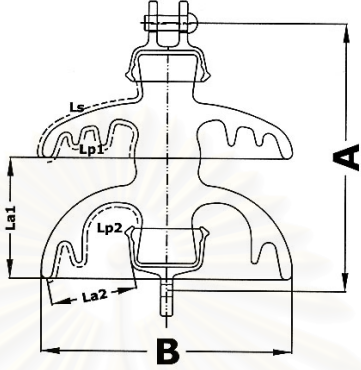
No.	Ls1	Ls2	La1	La2	La3	Lp1	Lp2	Leakage	Arcing	A	B
1	95	96	88	87	130	201	200	592	366	290	241
2	96	97	91	86	130	202	202	597	370	292	242
3	95	98	85	91	127	199	197	589	369	291	240
4	95	98	90	90	129	200	202	595	373	292	240
5	98	96	87	87	131	202	202	598	368	290	240
6	95	96	92	92	128	201	197	589	375	292	240
7	96	98	90	90	130	199	201	594	374	292	240
8	95	99	90	90	130	198	200	592	374	292	240
9	96	97	90	90	130	197	200	590	373	292	242
10	97	98	90	90	130	199	195	589	375	292	240
11	96	98	90	90	130	200	197	591	374	292	240
12	96	97	90	90	130	197	198	588	373	292	240
13	95	97	87	87	126	200	199	591	366	292	242
14	97	96	90	90	130	198	198	589	373	292	241
15	95	95	90	90	130	200	197	587	370	292	240
16	96	95	90	90	132	201	202	594	371	292	242
17	94	94	90	90	130	200	202	590	368	292	240
18	96	94	90	90	130	201	203	594	370	292	242
19	94	95	90	90	130	200	198	587	369	292	241
20	94	95	90	89	130	199	201	589	368	292	240
AV	96	96	90	89	130	200	200	591	371	292	241

ผลการทดสอบวัดค่ามิติของลูกถ้วยในโครงการวิจัย
ของลูกถ้วยแขวนคู่คอตันต้นแบบ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ผลการทดสอบวัดค่ามิติของลูกถ้วยในโครงการวิจัย
ของลูกถ้วยแขวนคู้คอดันแบบสอง**

Solid core suspension insulator(2 nd Design)						Visual & Dimensional test			
									
Unit : millimeter									
No.	Ls	La1	La2	Lp1	Lp2	Leakage	Arcing	A	B
1	152	130	92	188	195	708	374	292	270
2	153	129	94	182	192	701	376	292	270
3	155	128	93	192	205	714	376	292	270
4	154	127	93	189	196	708	374	292	270
5	152	128	93	190	197	711	373	292	270
6	155	129	94	191	199	714	378	292	270
7	153	131	92	190	201	711	376	292	270
8	152	127	95	190	195	700	374	292	270
9	154	130	93	189	196	702	377	292	270
10	156	127	92	191	194	700	375	292	270
11	153	129	93	190	200	716	375	292	270
12	151	129	93	188	196	715	373	292	270
13	152	129	92	187	194	716	373	292	270
14	156	127	92	190	195	710	375	292	270
15	155	126	93	191	197	708	374	292	270
16	152	128	94	192	193	706	374	292	270
17	153	131	92	191	196	708	376	292	270
18	155	130	93	190	195	710	378	292	270
19	155	127	93	190	198	710	375	292	270
20	156	128	92	190	200	712	376	292	270
AV	154	129	93	190	197	709	375	292	270

ภาคผนวก ข

ผลทดสอบแรงดันวาทไฟตามผิว50Hzในสภาวะแห้ง
ของลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 สองลูกต่อกันครั้งที่ 1 และ 2

No.	ค่าแรงดันวาทไฟ , $kV_{r.m.s}$ (ทำการปรับแก้สภาวะบรรยากาศแล้ว)											
	1		2		3		4		5		ค่าเฉลี่ย	
	1st	2nd	1st	2nd	1st	2nd	1st	2nd	1st	2nd	1st	2nd
1	154	158	153	156	153	156	155	156	155	155	154	156
2	151	154	155	150	154	154	151	154	154	159	153	154
3	155	156	156	157	154	157	156	150	155	158	155	156
4	157	159	160	155	157	156	160	156	158	153	158	156
5	158	156	159	154	159	152	153	159	157	160	157	156
6	155	159	153	152	158	156	157	159	156	156	156	157
7	157	160	156	156	159	155	159	156	156	160	157	157
8	154	158	154	164	156	158	154	155	155	156	155	157
9	159	160	155	159	157	155	158	157	158	156	157	157
10	157	161	157	161	154	155	158	156	156	161	156	159
11	155	161	154	162	155	164	154	161	157	160	155	161
12	158	153	157	162	153	156	156	153	160	158	157	158
13	155	158	155	160	153	155	153	155	154	155	154	158
14	153	159	155	161	158	158	158	160	158	155	156	159
15	157	152	155	159	160	155	155	155	153	160	156	158
16	154	156	154	155	155	154	156	158	155	156	155	155
17	153	155	156	158	154	155	153	157	157	158	155	157
18	159	154	158	156	157	155	157	161	157	156	158	156
19	156	159	158	161	159	161	155	156	156	158	157	159
20	157	158	155	157	153	157	155	156	155	156	155	157

ผลทดสอบแรงดันวาทไฟตามผิว50Hzในสภาวะแห้ง
ของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันต้นแบบ ครั้งที่ 1 และ 2

No.	ค่าแรงดันวาทไฟ , $kV_{r.m.s}$ (ทำการปรับแก้สภาวะบรรยากาศแล้ว)											
	1		2		3		4		5		ค่าเฉลี่ย	
	1 st	2 nd	1st	2nd	1st	2nd	1st	2nd	1st	2 nd	1st	2nd
1	129	129	130	132	127	129	131	132	130	130	129	130
2	129	128	127	130	126	127	126	126	130	132	128	129
3	126	126	125	128	124	127	127	129	125	125	125	127



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ผลทดสอบแรงดันวาทไฟตามผิว50Hzในสภาวะแห้ง
ของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสองครั้งที่ 1 และ 2**

No.	ค่าแรงดันวาทไฟ , $kV_{r.m.s}$ (ทำการปรับแก้สภาวะบรรยากาศแล้ว)											
	1		2		3		4		5		ค่าเฉลี่ย	
	1st	2nd	1st	2nd	1st	2nd	1st	2nd	1st	2 nd	1st	2nd
1	147	144	145	144	142	144	146	147	149	146	146	144
2	149	146	140	145	142	147	142	144	140	141	142	145
3	140	144	142	146	139	144	140	144	139	145	140	144
4	139	147	136	142	134	142	136	142	138	144	137	143
5	138	141	137	144	141	144	138	144	141	145	139	144
6	136	145	136	143	137	145	137	143	138	142	137	144
7	137	148	137	147	138	145	137	146	136	146	137	146
8	139	148	144	143	143	137	142	137	147	139	143	141
9	138	145	134	148	135	146	139	145	143	147	138	146
10	135	140	136	140	139	142	146	144	141	140	140	141
11	143	149	143	150	146	144	143	142	145	148	144	147
12	142	147	142	142	142	149	145	149	145	149	143	147
13	143	144	145	145	146	145	145	149	144	149	145	146
14	142	149	146	141	147	144	148	146	141	149	145	146
15	149	144	149	144	152	148	148	146	152	149	150	146
16	138	144	135	147	139	146	138	141	140	149	138	145
17	140	147	141	145	142	146	146	144	141	148	142	146
18	149	144	152	145	154	150	154	147	155	150	153	147
19	147	144	139	144	146	139	146	148	145	147	144	144
20	145	148	144	145	146	145	141	150	141	141	143	146

ภาคผนวก ค

ตัวอย่างผลทดสอบค่าแรงดันวาบไฟอิมพัลส์วิกฤต 1.2/50 μ s
ของลูกถ้วยแขวน ANSI Class 52-4 สองลูกต่อกัน

ตัวอย่างทดสอบ	ANSI Cl. 52-4 (2units)																								
วันทำการทดสอบ	24 พฤษภาคม 2544, 19 มิถุนายน 2544																								
สถานที่ทดสอบ	ห้องปฏิบัติการวิจัยไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย																								
สภาวะบรรยากาศ																									
ความดันบรรยากาศ	: 756 mmHg, 758 mmHg																								
อุณหภูมิห้อง	: 32 °C, 31 °C																								
ความชื้น	: 60 %, 57 %																								
ตัวปรับแก้																									
ตัวปรับแก้ความดันไอ (K_d)	: ชั่วบวก 0.9716					, ชั่วลบ 0.9774																			
ตัวปรับแก้ความชื้น (K_h)	: ชั่วบวก 0.9530					, ชั่วลบ 0.9600																			
รูปคลื่นทดสอบ																									
ชั่วบวก	: 1.08 X 46 μ s					, ชั่วลบ : 1.1 X 45 μ s																			
No.	ชั่ว	U_i	o = วาบไฟ x = ไม่wabไฟ											N_i	U_{50}^*	U_a	U_s								
1	+	6.51																	o	1	6.25	240	235		
		6.31	o	o			o	o	o	o	o	o	x	o										9	
		6.16	x	o		x	x	x	x	x	x	x								x				9	
		6.04				x																		1	
	-																					3	6.38	246	242
		6.47	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o							8				
		6.30	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x							7				
																						2			

U_i : ค่าแรงดันวัดจาก Digital recorder, U_{50} : ค่าแรงดันอิมพัลส์วิกฤตเฉลี่ย, U_a : ค่าแรงดันอิมพัลส์วิกฤตที่สภาวะห้อง, U_s : ค่าแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน

**ตัวอย่างผลทดสอบค่าแรงดันวาทไฟอิมพัลส์วิกฤต 1.2/50 μ s
ของลูกถ้วยแขวนคู่คอตันตันแบบ**

ตัวอย่างทดสอบ	Solid core suspension insulator																		
วันทำการทดสอบ	19 มิถุนายน 2544, 29 มิถุนายน 2544																		
สถานที่ทดสอบ	ห้องปฏิบัติการวิจัยไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย																		
<u>สภาวะบรรยากาศ</u>																			
ความดันบรรยากาศ	: 758 mmHg, 758 mmHg																		
อุณหภูมิห้อง	: 30 °C, 30 °C																		
ความชื้น	: 60 %, 60 %																		
<u>ตัวปรับแก้</u>																			
ตัวปรับแก้ความดันไอ (K_d)	: ชั่วบวก 0.9794						, ชั่วลบ 0.9794												
ตัวปรับแก้ความชื้น (K_h)	: ชั่วบวก 0.9700						, ชั่วลบ 0.9700												
<u>รูปคลื่นทดสอบ</u>																			
ชั่วบวก	: 1.12 X 47 μ s						, ชั่วลบ : 1.15 X 47 μ s												
No.	ชั่ว	U_i	o = วาทไฟ x = ไม่วาทไฟ											N_i	U_{50}^*	U_a	U_s		
3	+	6.21																4	
		6.06	o	x	x	o	x	o	x	o	o	o	o					10	
		5.81		x				x		x			x	x	x				6
	-	5.61																	3
		5.44	o	x	o	x	o	x	o	o	o	o	o					10	
		5.31		x		x		x		x		x	x	x	x				7

U_i : ค่าแรงดันวัดจาก Digital recorder, U_{50} : ค่าแรงดันอิมพัลส์วิกฤตเฉลี่ย, U_a : ค่าแรงดันอิมพัลส์วิกฤตที่สภาวะห้อง, U_s : ค่าแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน

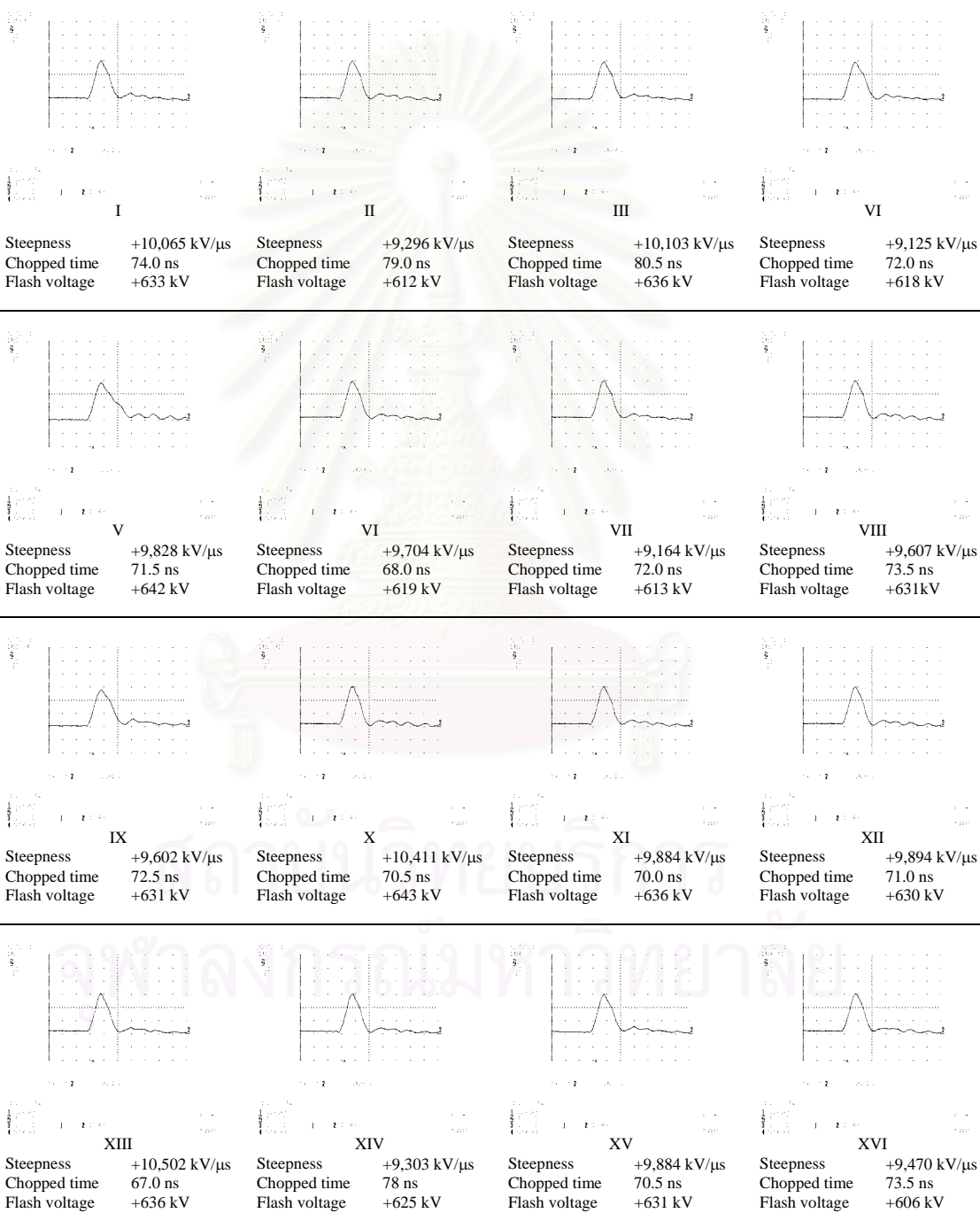
**ตัวอย่างผลทดสอบค่าแรงดันวาบไฟอิมพัลส์วิกฤต 1.2/50 μ s
ของลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสอง**

ตัวอย่างทดสอบ	Solid core suspension insulator																			
วันทำการทดสอบ	5 กรกฎาคม 2544, 26 กรกฎาคม 2544																			
สถานที่ทดสอบ	ห้องปฏิบัติการวิจัยไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย																			
<u>สภาวะบรรยากาศ</u>																				
ความดันบรรยากาศ	: 757 mmHg, 758 mmHg																			
อุณหภูมิห้อง	: 30 °C, 31 °C																			
ความชื้น	: 60 %, 65 %																			
<u>ตัวปรับแก้</u>																				
ตัวปรับแก้ความดันไอ (K_d)	: ชั่วบวก 0.9794						, ชั่วลบ 0.9774													
ตัวปรับแก้ความชื้น (K_h)	: ชั่วบวก 0.9700						, ชั่วลบ 0.9650													
<u>รูปคลื่นทดสอบ</u>																				
ชั่วบวก	: 1.10 X 47 μ s						, ชั่วลบ : 1.12 X 46 μ s													
No.	ชั่ว	U_i	o = วาบไฟ x = ไม่wabไฟ												N_i	U_{50}^*	U_a	U_s		
5	+	6.58																	1	
		6.46	o	o	o	o	o	x	o	o									9	
		6.29		x	x	x	x	x			x	o	x	x					9	
		6.24												x					1	
	-	6.32				o													1	
		6.15	o	x	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o					10	
		5.98		x		x	x	x	x	x	x	x	x	x					9	

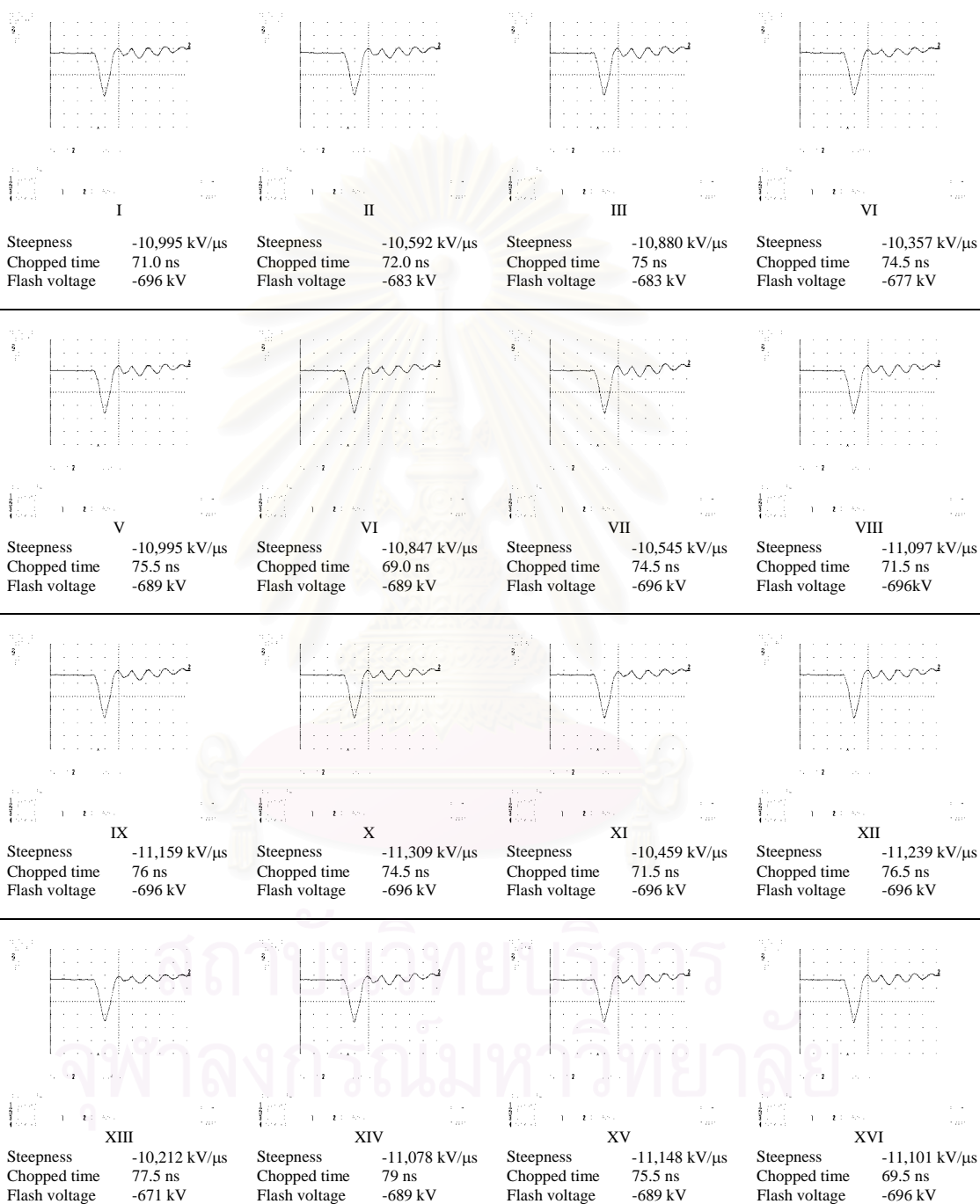
U_i : ค่าแรงดันวัดจาก Digital recorder, U_{50} : ค่าแรงดันอิมพัลส์วิกฤตเฉลี่ย, U_a : ค่าแรงดันอิมพัลส์วิกฤตที่สภาวะห้อง, U_s : ค่าแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน

ภาคผนวก ง

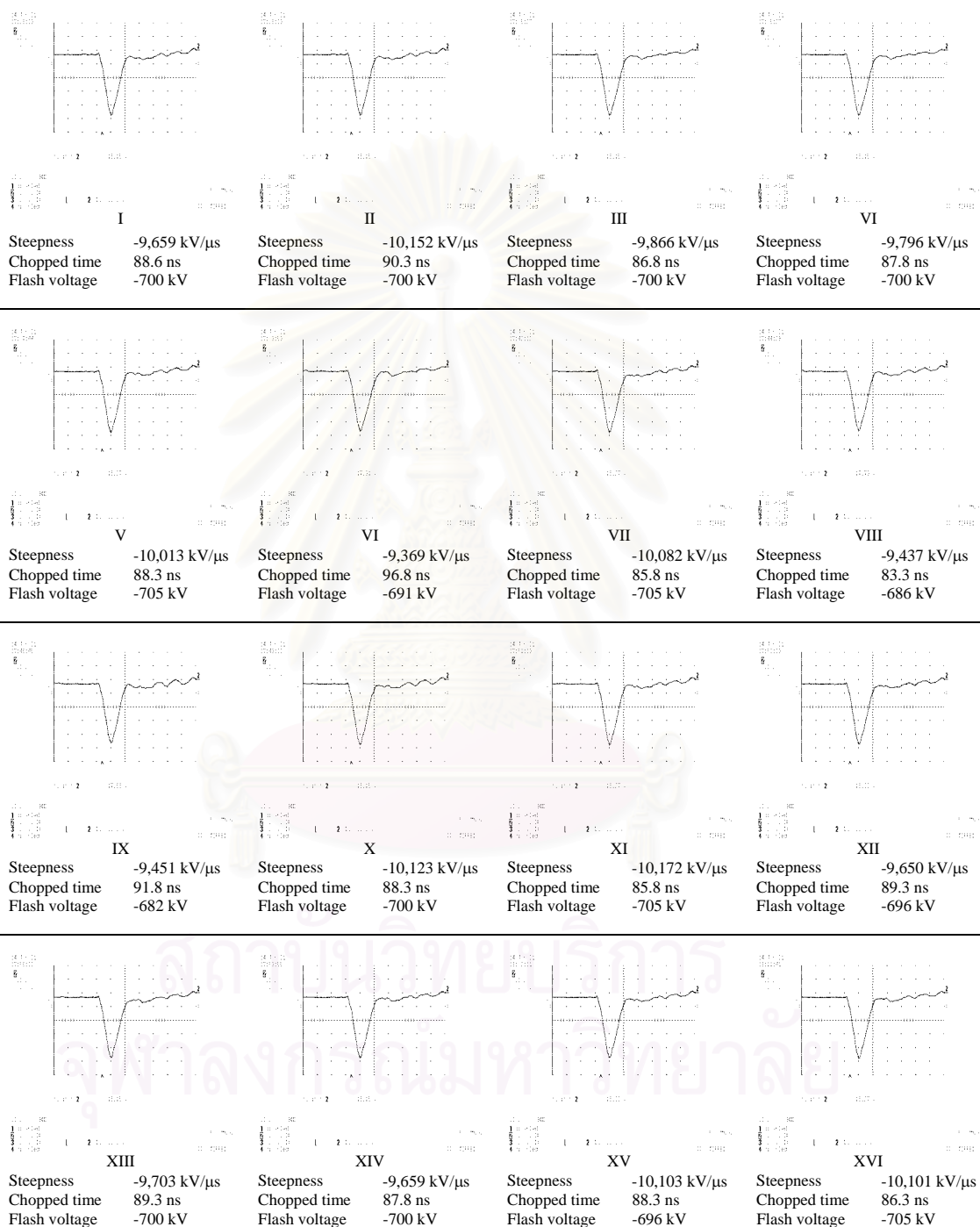
ตัวอย่างรูปคลื่นทดสอบแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน
บนลูกถ้วยแขวนคอคอดตันต้นแบบ ลูกที่ 1 (ชั่วคราว) ที่ความชัน +10,000 kV/ μ s



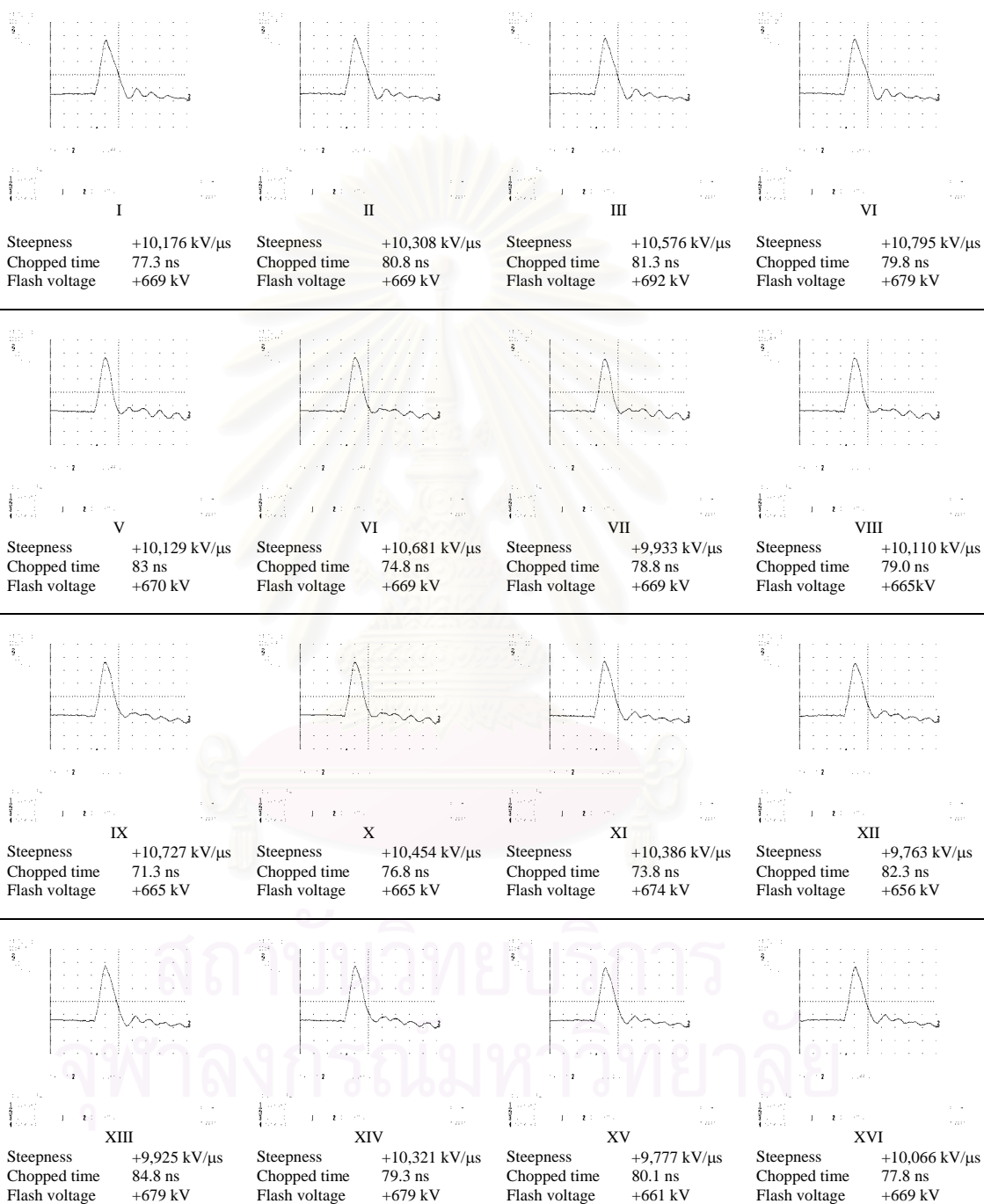
ตัวอย่างรูปคลื่นทดสอบแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักคลื่นชั้น
บนลูกถ้วยแขวนคู่คอดันต้นแบบ ลูกที่ 1 (ข้าวลบ) ที่ความชัน $-10,000 \text{ kV}/\mu\text{s}$



ตัวอย่างรูปคลื่นทดสอบแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น
บนลูกถ้วยแขวนคู่คอดันแบบสอง ลูกที่ 11 (ซ้าย) ที่ความชัน $-10,000 \text{ kV}/\mu\text{s}$



ตัวอย่างรูปคลื่นทดสอบแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น
บนลูกถ้วยแขวนคู่คอตันแบบสอง ลูกที่ 11 (ชั่วคราว) ที่ความชื้น +10,000 kV/ μ s



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายโตมร สุนทรนภา เกิดวันที่ 30 พฤษภาคม พ.ศ. 2518 จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ในปีการศึกษา 2541 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2541 โดยวิจัยทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย