



การคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าบนผิวฉนวนวงลวดด้วยพอร์ชเลนด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์



นายบุญชัย เตชะอำนาจ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า


บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2538

ISBN 974-631-927-2

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CALCULATION OF ELECTRIC FIELD STRESS ON A PORCELAIN
INSULATOR SURFACE BY THE FINITE ELEMENT METHOD



Mr. Boonchai Techaumnat

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Electrical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1995

ISBN 974-631-927-2



หัวข้อวิทยานิพนธ์

การคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าบนผิวฉนวนลูก
ด้วยพอร์ชเลนด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์

โดย

นาย บุญชัย เตชะอำนาจ

ภาควิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.สำรวย สังข์สะอาด

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

อาจารย์ ดร. ทับทิม อ่างแก้ว

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. สันติ อุงสุวรรณ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.มงคล เดชนครินทร์)

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

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว



บุญชัย เตชะอำนาจ : การคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าบนผิวฉนวนลูกถ้วยพอร์ซเลนด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ (CALCULATION OF ELECTRIC FIELD STRESS ON A PORCELAIN INSULATOR SURFACE BY THE FINITE ELEMENT METHOD) อ.ที่ปรึกษา : รศ. ดร. สำรวย สังข์สะอาด อ.ที่ปรึกษาร่วม : อ.ดร. ทับทิม อ่างแก้ว, 95 หน้า. ISBN 974-631-927-2

ลูกถ้วยก้านตรงชนิดพอร์ซเลนเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า จำเป็นต้องมีสารเคลือบกึ่งตัวนำช่วยลดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด เพื่อป้องกันมิให้เกิดโคโรนาที่แรงดันใช้งาน วิทยานิพนธ์นี้เสนอผลการคำนวณหาแรงดันกระจายบนผิวลูกถ้วยด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ และได้ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดบนผิวลูกถ้วยที่ไม่มีสารเคลือบกึ่งตัวนำและที่มีความกว้างของสารเคลือบกึ่งตัวนำ 25, 50, 75 และ 100% ของความกว้างปีกบน โดยใช้ลูกถ้วยก้านตรงแบบ 56-2 เป็นตัวอย่าง ทำการทดลองหาค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด แรงดันวาบไฟตามผิวแห้งความถี่ต่ำ 50 Hz แรงดันวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตรูปคลื่น 1.2/50 μ S จากผลการทดลองทำให้สามารถหาความกว้างของการเคลือบสารกึ่งตัวนำบนผิวลูกถ้วยที่พอเหมาะได้ พบว่าความกว้างของการเคลือบสารกึ่งตัวนำกำหนดด้วยเงื่อนไขแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด และแรงดันวาบไฟตามผิวสูงกว่าหรือเท่ากับค่าที่กำหนดตามมาตรฐาน นอกจากนี้พบว่าแรงดันเริ่มต้นจากการคำนวณมีค่าต่ำกว่าค่าจากการทดลอง เนื่องจากผลของพื้นผิวตามแนวการดีสชาร์จ

ศูนย์วิทยพัชร์พยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง

ปีการศึกษา 2537

ลายมือชื่อนิสิต *[Signature]*

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา *[Signature]*

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม *[Signature]*

##C515433: MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: ELECTRICAL FIELD STRESS/FINITE ELEMENT METHOD/

BOONCHAI TECHAUMNAT : CALCULATION OF ELECTRIC FIELD STRESS ON A PORCELAIN INSULATOR SURFACE BY THE FINITE ELEMENTMETHOD. THESIS ADVISOR : ASSO. PROF. SAMRUAY SANGKASAAD, Dr.Sc.Techn. THESIS CO-ADVISOR : TAPTIM ANGKAEW, Dr.Eng. 95 pp. ISBN 974-631-927-2

Pin type porcelain insulators are used in electrical distribution systems. They have semiconducting glaze to reduce maximum electrical field stress for preventing corona at the working voltage. This thesis presents voltage distribution on the insulator surface calculated by finite element method. Maximum field stresses for insulators without and with semiconducting glaze at 25, 50, 75 and 100% of upper shed are obtained. Pin insulators Cl.56-2 are used as investigated samples for carrying out 50 Hz corona inception voltages, low frequency flashover voltage and critical impulse flashover 1.2/50 μ S voltages. The optimum width of semiconducting glaze was determined from the experimental results of corona incepton, low frequency flashover and impulse flashover voltages by using the limited values specified in the standards. It is also found that the calculated inception voltage is lower than the experimental one due to the surface effect of insulators along the discharge path.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง.....

ปีการศึกษา..... 2527.....

ลายมือชื่อนิสิต..... *Boonchai Techaumnat*.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... *Samruay Sangkasaad*.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... *Taptim Angkaew*.....



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สำรวย สังข์สะอาด อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำความรู้ทั้งทางภาคทฤษฎีและทางภาคปฏิบัติ ให้แนวความคิดอันเป็นประโยชน์ต่อการวิจัย ด้วยดีมาตลอด และได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อย ขอขอบคุณ บริษัทอาเซียนอินซูเลเตอร์ จำกัด ที่ได้กรุณาให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัย ขอขอบคุณอาจารย์วีรพันธ์ รังสีวิจิตรประภา และคุณदार เอื้อดี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ แนะนำการใช้อุปกรณ์เครื่องมือต่าง ๆ ในการทดสอบด้วยดี ตลอดจนเจ้าหน้าที่ตึกวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงทุกท่านที่ได้ให้ความสะดวกในการวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณเพื่อน ๆ อีกหลายท่านที่ช่วยให้การวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงิน และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญภาพ.....	ฅ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 บทนำทั่วไป.....	1
1.2 ที่มาของปัญหา.....	2
1.3 ผลงานการศึกษาในอดีต.....	3
1.4 ขอบข่ายงานวิจัย.....	4
2. การคำนวณสายไฟฟ้าแรงสูงด้วยลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน.....	5
2.1 ชนิดของลูกถ้วยฉนวนในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า.....	5
2.2 ลักษณะทางกายภาพของลูกถ้วยฉนวน.....	7
2.3 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวน.....	8
2.4 ตัวอย่างลูกถ้วยฉนวนในการศึกษา.....	8
2.5 ลักษณะสนามไฟฟ้าบนผิวลูกถ้วยฉนวน.....	10
3. การคำนวณสนามไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์.....	12
3.1 สมการพื้นฐานของสนามไฟฟ้า.....	12
3.2 วิธีการไฟไนต์อีลีเมนต์.....	14
การประมาณฟังก์ชันของศักย์ไฟฟ้าในแต่ละอีลีเมนต์และฟังก์ชัน รูปร่าง(Shape function).....	14
3.3 การสร้างสมการอินทิกรัลของปัญหาที่วิเคราะห์.....	16

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 หลักการแปรผัน.....	18
3.5 การหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้า.....	20
3.6 การคำนวณหาสนามไฟฟ้าบนบริเวณที่มีลักษณะสมมาตรรอบแกนหมุน.....	21
3.7 การใช้วิธีการไฟไนต์อีลีเมนต์กับปัญหาที่มีขอบเขตเปิด.....	22
3.7.1 แนวความคิดในการใช้การแปลงทางคณิตศาสตร์.....	23
3.7.2 สมการพลังงานในบริเวณหลังการแปลง.....	24
3.7.3 รูปแบบของการแปลงที่ใช้.....	25
3.7.4 การแปลงแบบภายนอกสู่ภายใน.....	26
3.7.5 การแปลงแบบภายนอกสู่ภายนอก.....	28
3.7.6 ความแม่นยำของผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้การแปลงทางคณิตศาสตร์.....	30
3.8 การคำนวณหาสนามไฟฟ้าบริเวณที่มีด้วยสารกึ่งตัวนำด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์.....	31
3.8.1 สมการพลังงานไฟฟ้าในบริเวณที่ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำและ เมตริกซ์ที่ได้.....	31
3.8.2 สมการพลังงานไฟฟ้าในบริเวณที่ประกอบด้วยสารเคลือบกึ่งตัวนำและ เมตริกซ์ที่ได้.....	32
4. วิธีการคำนวณแรงดันเริ่มต้นของฉนวนอากาศในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ.....	34
4.1 เงื่อนไขการเกิดเบรกดาวน์ของทาว์นเซนด์.....	34
4.2 เงื่อนไขการเกิดเบรกดาวน์ของสตรีมเมอร์.....	36
5. ผลการคำนวณความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ของอิเล็กโตรด ไฟฟ้าแรงสูงแบบต่าง ๆ.....	39
5.1 อิเล็กโตรดแบบทรงกลมเดี่ยวในอากาศ.....	39
5.2 อิเล็กโตรดแท่งกลมปลายมนกับระนาบ.....	43
5.3 อิเล็กโตรดแท่งทรงกลม.....	45
5.4 การคำนวณหาแรงดันกระจายบนผิวฉนวนพอร์ซเลนที่มีการเคลือบสารกึ่ง ตัวนำ.....	48
6. การหาความกว้างในการเคลือบสารกึ่งตัวนำที่พอเหมาะ.....	52
6.1 ภาคการคำนวณลักษณะทางไฟฟ้าของลูกถ้วยพอร์ซเลน.....	52

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.1.1	การคำนวณหาสนามไฟฟ้าบนผิวลูกถ้วยพอร์ซเลน.....	52
6.1.2	ผลการคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าบนผิวลูกถ้วยพอร์ซเลน.....	54
6.1.3	การคำนวณแรงดันเริ่มต้นของลูกถ้วยพอร์ซเลน.....	58
6.2	ภาคการทดลองหาค่าทางไฟฟ้าของลูกถ้วยพอร์ซเลน.....	59
6.2.1	การทดลองหาแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด.....	59
6.2.2	การทดลองหาค่าแรงดันวาบไฟตามผิวแห้งความถี่ 50 Hz.....	61
6.2.3	การทดลองหาค่าแรงดันวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต.....	63
6.3	วิเคราะห์ผลการคำนวณและผลการทดลอง.....	64
6.3.1	วิเคราะห์ผลการคำนวณค่าแรงดันเริ่มต้น.....	65
6.3.2	วิเคราะห์ผลการทดลองหาแรงดันวาบไฟแห้งตามผิวความถี่ 50 Hz.....	65
6.3.3	วิเคราะห์ผลการทดลองหาแรงดันวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต.....	65
6.3.4	วิเคราะห์ผลการทดลองหาแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด.....	66
6.4	การหาความกว้างของสารเคลือบกึ่งตัวนำที่พอเหมาะ.....	66
6.5	ผลของพื้นผิวต่อแรงดันเริ่มต้นในอากาศ.....	68
6.5.1	ผลของพื้นผิวฉนวนแข็งต่อแรงดันเริ่มต้นในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ.....	69
6.5.2	ผลของพื้นผิวต่อแรงดันเริ่มต้นในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ.....	71
6.5.3	วิเคราะห์ผลของพื้นผิวต่อแรงดันเริ่มต้นในอากาศ.....	72
7.	สรุปและข้อเสนอแนะ.....	73
7.1	สรุป.....	73
7.2	ประโยชน์ที่ได้รับ.....	73
7.3	ข้อเสนอแนะ.....	74
	รายการอ้างอิง.....	75
	ภาคผนวก ก. ขั้นตอนการคำนวณหาสนามไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	78

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ข. การหาค่าตัวประกอบแปลงผันความหนาแน่นอากาศ (Kd) และตัวประกอบแปลงผันความชื้น (Kh).....	88
ภาคผนวก ค. หลักการแปรผันในกรณีสนามไฟฟ้าสถิต.....	
ประวัติผู้เขียน.....	95



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่

5.1	ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการแปลงทั้งสองเทียบกับวิธีคณิตศาสตร์เชิงวิเคราะห์ที่ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางต่าง ๆ.....	40
5.2	ค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการแปลงทั้งสองเทียบกับวิธีคณิตศาสตร์เชิงวิเคราะห์ที่ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางต่าง ๆ.....	41
5.3	ผลการคำนวณแรงดันเริ่มต้นของอิเล็กโทรคแบบแท่งกลมปลายมนกับระนาบเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง.....	44
5.4	ผลการคำนวณแรงดันเบรคควาน์ของอิเล็กโทรคแบบแท่งทรงกลมเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากตารางมาตรฐาน.....	47
5.5	เปรียบเทียบแรงดันกระจายจากการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เทียบกับวิธีเชิงวิเคราะห์.....	50
6.1	ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดบนผิวลูกถ้วยฉนวน.....	55
6.2	แรงดันเริ่มต้นของลูกถ้วยฉนวนจากการคำนวณ.....	58
6.3	ผลการทดลองหาแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดที่ความกว้างต่าง ๆ ของสารเคลือบกึ่งตัวนำ.....	60
6.4	แรงดันวาวไฟตามผิวแห้งความถี่ 50 Hz ที่ความกว้างต่าง ๆ ของสารกึ่งตัวนำ.....	62
6.5	แรงดันวาวไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตที่ค่าความกว้างต่าง ๆ ของสารเคลือบกึ่งตัวนำ.....	64
6.6	การเปรียบเทียบแรงดันเริ่มต้นเมื่อมีพื้นผิวฉนวนแข็ง.....	69
6.7	แรงดันเริ่มต้นที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง.....	71
ก.1	รูปแบบของแฟ้มข้อมูลด้านเข้า.....	80

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่

2.1	รูปลักษณะของลูกถ้วยฉนวนแบบต่าง ๆ	
a)	ลูกถ้วยแขวน.....	6
b)	ลูกถ้วยแท่ง.....	6
2.2	ลักษณะของลูกถ้วยก้านตรง.....	7
2.3	ลูกถ้วยตัวอย่างในการทดลอง.....	9
2.4	แสดงเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าของลูกถ้วยก้านตรง.....	10
2.5	แสดงเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าของลูกถ้วยแขวน.....	11
3.1	แสดงการแบ่งบริเวณ 2 มิติเป็นอีลีเมนต์ย่อยรูปสามเหลี่ยม.....	15
3.2	แสดงอีลีเมนต์ของระบบที่สมมาตรรอบแกนหมุน.....	21
3.3	แสดงบริเวณของปัญหาที่ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน.....	23
3.4	บริเวณของปัญหาหลังจากใช้การแปลงทางคณิตศาสตร์.....	24
3.5	ลักษณะของการแปลงที่ใช้.....	26
3.6	แสดงบริเวณก่อนและหลังการแปลงแบบภายนอกสู่ภายใน.....	27
3.7	แสดงบริเวณก่อนและหลังการแปลงแบบภายนอกสู่ภายนอก.....	28
3.8	การแทนสารเคลือบกึ่งตัวนำด้วยอีลีเมนต์เส้นตรง.....	32
4.1	ประจุค้างและสนามไฟฟ้าที่เกิดจากอะวาลานซ์ของอิเล็กตรอน.....	36
4.2	อะวาลานซ์ใหม่ที่เกิดขึ้นตามทฤษฎีของสตริมเมอร์.....	37
4.3	ระยะวิกฤติของอะวาลานซ์อิเล็กตรอน.....	38
5.1	กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าที่ระยะ r จากจุดศูนย์กลางของทรงกลม เดี่ยวในอากาศที่ได้จากวิธีเชิงวิเคราะห์กับวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์โดยใช้การแปลง ทางคณิตศาสตร์.....	42
5.2	กราฟแสดงการเปรียบเทียบสนามไฟฟ้าที่ระยะ r จากจุดศูนย์กลางของทรงกลม เดี่ยวในอากาศที่ได้จากวิธีเชิงวิเคราะห์กับวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์โดยใช้การแปลง ทางคณิตศาสตร์.....	42
5.3	ลักษณะของอิเล็กโทรดแบบแท่งกลมปลายมนกับระนาบ.....	44

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.4 การแบ่งอัสิเมนต์ในการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์อัสิเมนต์และเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าที่ได้จากการคำนวณของอิเล็กโทรคแบบแท่งกลมปลายมนกับระนาบ.....	45
5.5 ลักษณะอิเล็กโทรคแบบแท่งทรงกลมและการแบ่งอัสิเมนต์ในการคำนวณ.....	46
5.6 เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าและแรงดันกระจายของอิเล็กโทรคแบบแท่งทรงกลม.....	48
5.7 จนวนพอร์ชเลนที่มีการเคลือบสารกึ่งตัวนำ.....	49
5.8 การแบ่งอัสิเมนต์ในบริเวณ Ω_{in}	49
5.9 เปรียบเทียบแรงดันกระจายจากการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์อัสิเมนต์เทียบกับวิธีเชิงวิเคราะห์.....	51
6.1 ปัญหาลูกถ้วยฉนวนและเงื่อนไขขอบเขต.....	53
6.2 การแบ่งอัสิเมนต์ในบริเวณ Ω_{in}	53
6.3 ลักษณะแรงดันกระจายบนผิวลูกถ้วยฉนวนตามแนวอาร์ก.....	54
6.4 ความเครียดสนามไฟฟ้าบนผิวลูกถ้วยฉนวนตามแนวอาร์ก.....	55
6.5 เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าของลูกถ้วยที่มีการเคลือบสารกึ่งตัวนำแบบ A.....	56
6.6 เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าของลูกถ้วยที่มีการเคลือบสารกึ่งตัวนำแบบ B.....	56
6.7 เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าของลูกถ้วยที่มีการเคลือบสารกึ่งตัวนำแบบ C.....	57
6.8 เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าของลูกถ้วยที่มีการเคลือบสารกึ่งตัวนำแบบ D.....	57
6.9 เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าของลูกถ้วยที่มีการเคลือบสารกึ่งตัวนำแบบ E.....	58
6.10 วงจรทดลองสำหรับการวัด RIV.....	59
6.11 การติดตั้งลูกถ้วยฉนวนในการทดสอบ.....	60
6.12 กราฟแสดงแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดที่ความกว้างต่าง ๆ ของสารกึ่งตัวนำ.....	61
6.13 วงจรทดลองสำหรับการหาแรงดันวาบไฟตามผิวความถี่ 50 Hz.....	62
6.14 กราฟแรงดันวาบไฟตามผิวแห่งความถี่ 50 Hz กับ ความกว้างสารกึ่งตัวนำ.....	63
6.15 กราฟแสดงค่าแรงดันวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตในเทอมของความกว้างของสารกึ่งตัวนำ.....	64

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่

6.16	แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดและแรงดันวาบไฟตามผิวแห้งความถี่ 50 Hz ของลูกถ้วย ฉนวนในหน่วย per unit ที่ความกว้างต่าง ๆ ของสารเคลือบกึ่งตัวนำ.....	67
6.17	แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดและแรงดันวาบไฟตามผิวความถี่ 50 Hz เมื่อพิจารณาค่า ความคลาดเคลื่อน 5 เปอร์เซ็นต์ ที่ค่าความกว้างต่าง ๆ ของสารเคลือบกึ่งตัวนำ..	67
6.18	อิเล็กโทรดแบบระนาบกับระนาบที่ใช้ในการทดลอง	
ก)	ไม่มีแผ่นไมลาร์กั้น.....	69
ข)	มีแผ่นไมลาร์มีวนเป็นทรงกระบอกกั้น.....	69
ค)	มีแท่งพอร์ซเลนกั้น.....	69
6.19	ภาพถ่ายแสดงการเกิดดีสชาร์จตามแนวผิวของไมลาร์.....	70
6.20	อิเล็กโทรดแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอที่ใช้ในการทดลอง	
ก)	ไม่มีแผ่นไมลาร์กั้น.....	71
ข)	มีแผ่นไมลาร์กั้น.....	71
6.21	สนามไฟฟ้าตามแนวอาร์กที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์.....	72
ก.1	แผนภาพแสดง Class ต่าง ๆ ตามลำดับชั้น.....	79
ก.2	ขั้นตอนการสร้างสมการเมตริกซ์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์.....	82
ก.3	ขั้นตอนการแก้สมการเชิงเส้นด้วยวิธีทำซ้ำของ Gauss-Siedal.....	84
ก.4	การแบ่งอีลีเมนต์สามเหลี่ยม.....	84
ก.5	ขั้นตอนการแบ่งอีลีเมนต์ย่อย.....	85
ก.6	ขั้นตอนการคำนวณหาจำนวนอิเล็กตรอนตามเงื่อนไขสตรีมเมอร์.....	87
ข.1	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอของอากาศกับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์...	90
ข.2	ตัวประกอบแปลงผันความชื้นสำหรับแรงดันทดสอบกระแสสลับความถี่ต่ำ.....	91
ข.3	ตัวประกอบแปลงผันความชื้นสำหรับแรงดันอิมพัลส์.....	92