

การศึกษาและการจำลองสนามไฟฟ้าเพื่อหามิติช่องว่างทรงกลมมาตรฐานที่ชัดเจนยิ่งขึ้น



นายคงศักดิ์ หล่อรุ่งโรจน์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

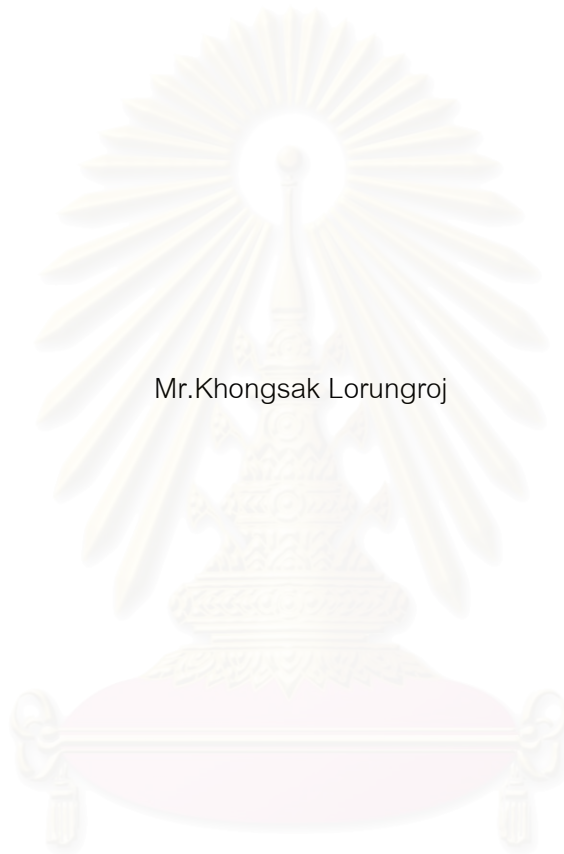
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1551-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

STUDY AND SIMULATION OF ELECTRIC FIELD TO FIND A MORE  
ACCURATE DIMENSION OF STANDARD SPHERE GAPS



Mr.Khongsak Lorungroj

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 974-03-1551-8



คงศักดิ์ หล่อรุ่งโรจน์ : การศึกษาและการจำลองสนามไฟฟ้าเพื่อหามิติช่องว่างทรงกลมมาตรฐานที่ชัดเจนยิ่งขึ้น. (Study and Simulation of Electric Field to Find a More Accurate Dimension of Standard Sphere Gaps) อ. ที่ปรึกษา อ. ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์, 78 หน้า. ISBN 974-03-1551-8.

ช่องว่างทรงกลมถูกใช้สำหรับวัดค่ายอดแรงดัน แรงดันเบรกดาวน์ของช่องว่างทรงกลมจะเกิดการคลาดเคลื่อนเมื่อรูปทรงและขนาดของช่องว่างทรงกลมไม่ได้มาตรฐาน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รายงานผลการศึกษาและวิจัยหามิติช่องว่างทรงกลมมาตรฐานที่แน่นอนยิ่งขึ้นด้วยวิธีไฟไนต์อีเลิเมนต์ โดยยึดแนวทางตามข้อกำหนด IEC 52: 1960 คือ หาขอบเขตการคลาดเคลื่อนของพื้นผิวทรงกลมและขนาดก้านยึดทรงกลม โดยทำการเปรียบเทียบแรงดันเบรกดาวน์จากการคำนวณในกรณีที่ทรงกลมไม่ได้มาตรฐานกับกรณีทรงกลมมาตรฐาน แล้วมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 3% ผลการวิจัยพบว่า เมื่อเกิดรอยบุบขึ้นที่จุดเกิดประกายไฟทำให้แรงดันเบรกดาวน์ลดลง, ทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคลาดเคลื่อนจะทำให้แรงดันเบรกดาวน์เปลี่ยนไป และก้านยึดทรงกลมขนาดเล็กกว่ามาตรฐานจะทำให้เกิดโคโรนาและก้านยึดทรงกลมขนาดใหญ่กว่ามาตรฐานทำให้แรงดันเบรกดาวน์สูงขึ้น

## สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า  
สาขาวิชา .....วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง  
ปีการศึกษาวิชา ..... 2544

ลายมือชื่อนิสิต.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

## 4270234321 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORDS : Finite Element Method / Sphere gaps / Breakdown voltage

KHONGSAK LORUNGROJ : STUDY AND SIMULATION OF ELECTRIC FIELD TO FIND  
A MORE ACCURATE DIMENSION OF STANDARD SPHERE GAPS.

THESIS ADVISOR : KOMSON PETCHARAKS, Dr. Sc. Techn, 78 pp.

ISBN 974-03-1551-8

Sphere gaps are used for peak voltage measurement. The breakdown voltage of sphere gaps shall give the error when the shape and dimension of sphere gap is not standardized. This thesis is intended to find a more accurate dimension of standard sphere gaps by Finite Element Method based on IEC 52: 1960. The error limits of sphere surface and those of the size of shank were rechecked by the error of less than 3 percent which is evaluated by comparing the breakdown voltages between the ones obtained from the calculation of the non-standard sphere gaps and the standard value. The results show that the breakdown voltage will decrease when the sphere have the dent on the sparking point, whereas the ones of the sphere which have the distortion of the sphere shape will give the error, the corona will occur around the shank smaller than the standard value and the larger one will give the higher breakdown voltage of sphere gap.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department .....Electrical Engineering.....

Student's signature

Field of study ...Electrical Power Engineering..

Advisor's signature .....

Academic year .....2001.....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูงที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำความรู้และตำราที่ใช้ประกอบการวิจัย ให้แนวความคิด อันเป็นประโยชน์ต่อการวิจัยมาโดยตลอด และได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อย และขอขอบคุณเพื่อนๆ นิสิตปริญญาโทอีกหลายท่านที่ช่วยอำนวยความสะดวกและให้ความช่วยเหลือจนการวิจัยสำเร็จได้ด้วยดี

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ซึ่งสนับสนุนด้านการเงิน และเป็นกำลังใจอันมีค่ายิ่ง



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	2
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ข้อจำกัดการวิจัย.....	3
1.5 ลำดับขั้นตอนในการวิจัย.....	3
2. กลไกการเกิดเบรกดาวนีในก๊าซและการคำนวณค่าแรงดันเบรกดาวนี.....	4
2.1 กลไกการเกิดเบรกดาวนีในก๊าซและการคำนวณค่าแรงดันเบรกดาวนี.....	4
2.2 การคำนวณค่าแรงดันเบรกดาวนีหรือแรงดันเริ่มเกิดในช่องว่างทรงกลม.....	5
3. แบบจำลองช่องว่างทรงกลมที่จะทำการตรวจสอบ.....	12
3.1 แบบจำลองกลุ่มที่ 1 วิเคราะห์ทรงกลม.....	15
3.1.1 วิเคราะห์การเกิดรอยบอบบนทรงกลม.....	15
3.1.1.1 วัตถุประสงค์.....	15
3.1.1.2 การเลือกกลุ่มตัวอย่าง.....	16
3.1.2 วิเคราะห์การผิดเพี้ยนจากทรงกลมไปเป็นทรงรี.....	17
3.1.2.1 วัตถุประสงค์.....	17
3.1.2.2 การเลือกกลุ่มตัวอย่าง.....	18
3.2 แบบจำลองกลุ่มที่ 2 วิเคราะห์ก้านยึดทรงกลม.....	18
3.2.1 วัตถุประสงค์.....	18

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.2 การเลือกกลุ่มตัวอย่าง.....	19
4. การวิเคราะห์ผลการจำลองช่องว่างทรงกลม.....	20
4.1 แบบจำลองกลุ่มที่ 1 วิเคราะห์ทรงกลม.....	20
4.1.1 วิเคราะห์การเกิดรอยบุบบนทรงกลม.....	20
4.1.1.1 ผลการจำลอง.....	20
4.1.1.2 วิเคราะห์ผลการจำลอง.....	30
4.1.1.3 สรุปผลการจำลอง.....	35
4.1.2 วิเคราะห์การผิดเพี้ยนจากทรงกลมไปเป็นทรงรี.....	36
4.1.2.1 ผลการจำลอง.....	36
4.1.2.2 วิเคราะห์ผลการจำลอง.....	50
4.1.2.3 สรุปผลการจำลอง.....	55
4.2 แบบจำลองกลุ่มที่ 2 วิเคราะห์ก้านยึดทรงกลม.....	56
4.2.1 ผลการจำลอง.....	56
4.2.2 วิเคราะห์ผลการจำลอง.....	62
4.2.3 สรุปผลการจำลอง.....	64
5. สรุปและข้อเสนอแนะ.....	65
5.1 สรุป.....	65
5.2 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	65
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	66
รายการอ้างอิง.....	67
ภาคผนวก.....	68
ภาคผนวก ก. การวิเคราะห์ปัญหาสนามไฟฟ้าสถิตด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	69
ภาคผนวก ข. แรงดันเบรคดาวน์ซ์ของช่องว่างทรงกลม.....	71
ภาคผนวก ค. การใช้โปรแกรม Maxwell 2D Field Simulator แก้ปัญหาช่องว่างทรงกลม...	75
ภาคผนวก ง. โปรแกรมคำนวณแรงดันเริ่มเกิด.....	77
ประวัติผู้เขียน.....	78



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
4.1	แรงดันเบรกดาว์นตามแนวที่แสดงในรูปที่3.6ของทรงกลม 150 เซนติเมตร ที่ระยะห่าง 5, 40 และ 75 เซนติเมตร เมื่อเกิดรอยบุบขนาด0.2%บนทรงกลมทั้ง3กรณี....	20
4.2	สรุปขอบเขตการผิดเพี้ยนเป็นทรงรีที่เทียบกับการคำนวณและเทียบกับมาตรฐาน IEC 52 ของทรงกลมแต่ละขนาด.....	54
4.3	ค่าแรงดันเริ่มเกิดที่บริเวณก้านยึดทรงกลมที่แนวเส้นตรงต่างๆตามรูปที่ 4.46.....	57
4.4	ค่าแรงดันเบรกดาว์นจากการคำนวณ, %Ubและแรงดันเริ่มเกิดระหว่างก้านยึดทรงกลมกับภาชนะบรรจุตามLine3 ที่ขนาดก้านยึดทรงกลมต่างๆ, D = 50 cm และ S = 15 cm.....	58
4.5	ค่าแรงดันเริ่มเกิดระหว่างก้านยึดทรงกลมกับภาชนะบรรจุตามLine3 ที่ขนาดก้านยึดทรงกลมต่างๆของทรงกลม 10, 50 และ150 cm ที่ระยะห่างมากที่สุด.....	58
4.6	ค่าแรงดันเบรกดาว์นและ%Ubโดยเทียบกับการคำนวณเมื่อก้านยึดทรงกลมมีขนาด 180%ของ0.2Dที่ทรงกลมขนาด 10, 50 และ 150 cm.....	59
4.7	ค่าแรงดันเบรกดาว์นและ%Ubโดยเทียบกับการคำนวณเมื่อก้านยึดทรงกลมมีขนาด 120 ถึง 200%ของ0.2Dที่ระยะห่างมากที่สุดของทรงกลมแต่ละขนาด.....	59
ข.1	แรงดันเบรกดาว์นของช่องว่างทรงกลมจากตารางที่1 ของ IEC-52: 1960.....	71
ข.2	แรงดันเบรกดาว์นของช่องว่างทรงกลมจากการคำนวณ.....	73
ค.1	ระยะห่างต่างจากทรงกลมในรูปที่ ค.1 (จากตารางในหัวข้อ 2.5 ของ IEC52).....	75

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบ		หน้า
2.1	แสดงแนวแกนสมมาตรของE(x).....	5
2.2	ตัวอย่างของE(x)ตามแนวแกนสมมาตรในรูปที่ 2.1, D=100 เซนติเมตร. (ข้อมูลได้มาจากการจำลองโดยโปรแกรมMaxwell 2D).....	6
2.3	ค่าE(x)ตามแนวแกนสมมาตรสำหรับ สภาวะที่1 ค่าS/Dมีค่าน้อย.....	7
2.4	ค่าE(x)ตามแนวแกนสมมาตรสำหรับ สภาวะที่2 ค่าS/Dมีค่าปานกลาง.....	8
2.5	การเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณทั้งสองแบบ คือ ทั้งคิดและ ไม่คิดผลของประจุบริเวณที่ว่างด้านต่อลงดิน, D=50 เซนติเมตร.....	8
2.6	ค่าE(x)ตามแนวแกนสมมาตรสำหรับ สภาวะที่3 ค่าS/Dมีค่ามาก.....	9
2.7	อีลิตโรแกรมของความเครียดสนามไฟฟ้า.....	9
3.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ %Ub จากMaxwell2D สำหรับขนาดทรงกลมต่างๆ เมื่อไม่คิดผลของความชื้น.....	12
3.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ %Ub จากHSSSM สำหรับทรงกลมขนาดต่างๆเมื่อ ไม่คิดผลของความชื้น.....	13
3.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ %Ub จากMaxwell2D สำหรับขนาดทรงกลมต่างๆ เมื่อคิดผลของความชื้น.....	13
3.4	แสดงรอยบัพขนาด a% บนทรงกลมลูกใดลูกหนึ่ง.....	15
3.5	แสดงรอยบัพขนาด a% บนทรงกลมทั้งสองลูก.....	15
3.6	แสดงแนวเส้นตรงที่จะเก็บข้อมูลความเครียดสนามไฟฟ้า.....	16
3.7	แสดงการผิดเพี้ยนไปเป็นทรงรีขนาด a% แบบต่างๆทั้งในแนวนอนและแนวตั้ง.....	18
4.1	รูปแสดงเส้นสนามไฟฟ้าเท่าในกรณีที่เกิดรอยบัพขนาด 0.6% กับทรงกลมลูกแรง สูง, ลูกต่อลงดิน และทั้งสองลูก, D = 150 เซนติเมตร และ S = 40 เซนติเมตร.....	21
4.2	กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน%Ubที่เทียบกับการคำนวณของทรงกลมที่มีรอยบัพ ขนาด0.6%บนทรงกลมลูกแรงสูง.....	22
4.3	กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน%Ubที่เทียบกับการคำนวณของทรงกลมที่มีรอยบัพ ขนาด0.6%บนทรงกลมลูกต่อลงดิน.....	22
4.4	กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน%Ubที่เทียบกับการคำนวณของทรงกลมที่มีรอยบัพ ขนาด0.6%บนทรงกลมทั้งสองลูก.....	23

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.5 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน%Ubที่เทียบกับการคำนวณของทรงกลม150 cm มีรอยบุบขนาด0.6%บนทรงกลมทั้งสองลูก.....	23
4.6 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน%Ubที่เทียบกับการคำนวณของทรงกลม 15 และ 25 cm ที่มีรอยบุบขนาดต่างๆบนทรงกลมลูกต่อลงดิน.....	24
4.7 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน%Ubที่เทียบกับการเทียบ IEC52 ของทรงกลม 15 และ 25 cm ที่มีรอยบุบขนาดต่างๆบนทรงกลมลูกต่อลงดิน.....	24
4.8 กราฟแสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวต่างๆในรูปที่3.6ก.ของ ทรงกลมที่มีรอยบุบขนาด 0.2%บนลูกต่อลงดิน, D = 150 เซนติเมตร และ S = 40 เซนติเมตร.....	25
4.9 กราฟแสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวต่างๆในรูปที่3.6ก.ของ ทรงกลมที่มีรอยบุบขนาด 0.2%บนลูกต่อลงดิน, D = 150 เซนติเมตร และ S = 75 เซนติเมตร.....	25
4.10 กราฟแสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวต่างๆในรูปที่3.6ข.ของ ทรงกลมที่มีรอยบุบขนาด 0.2%บนทั้งสองลูก, D = 150 เซนติเมตร และ S = 40 เซนติเมตร.....	26
4.11 กราฟแสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวต่างๆในรูปที่3.6ก.ของ ทรงกลมที่มีรอยบุบขนาด 0.2%บนลูกต่อลงดิน, D = 150 เซนติเมตร และ S = 75 เซนติเมตร.....	26
4.12 กราฟแสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวต่างๆในรูปที่3.6ข.ของ ทรงกลมที่มีรอยบุบขนาด 0.2%บนทั้งสองลูก, D = 150 เซนติเมตร และ S = 40 เซนติเมตร.....	27
4.13 กราฟแสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าของทรงกลมที่มีรอยบุบขนาด 0.6% บนทรงกลมลูกต่างๆ, D = 15 เซนติเมตร และ S = 0.5 เซนติเมตร.....	27
4.14 กราฟแสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าของทรงกลมที่มีรอยบุบขนาด 0.6% บนทรงกลมลูกต่างๆ, D = 150 เซนติเมตร และ S = 5 เซนติเมตร.....	28
4.15 กราฟแสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าของทรงกลมที่มีรอยบุบขนาด 0.6% บนทรงกลมลูกต่างๆ, D = 15 เซนติเมตร และ S = 7.5 เซนติเมตร.....	28

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า	
4.16	กราฟแสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าของทรงกลมที่มีรอยบุบขนาด 0.6% บนทรงกลมลูกต่างๆ, $D = 150$ เซนติเมตร และ $S = 75$ เซนติเมตร.....	29
4.17	กราฟแสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าของทรงกลมขนาด 10 และ 15 เซนติเมตรที่มีรอยบุบขนาด 0.6% บนทรงกลมลูกแรงสูง, $S = 5$ เซนติเมตร.....	29
4.18	กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน% $U_b$ ที่เทียบกับการคำนวณของทรงกลมที่รูปทรงผิดเพี้ยนเป็นทรงรีขนาด 3% ทั้ง 4 ลักษณะดังรูปที่ 3.7 บนทรงกลมลูกแรงสูง, $D = 50$ เซนติเมตร.....	36
4.19	กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน% $U_b$ ที่เทียบกับ IEC52 ของทรงกลมที่รูปทรงผิดเพี้ยนเป็นทรงรีขนาด 3% ทั้ง 4 ลักษณะดังรูปที่ 3.7 บนทรงกลมลูกแรงสูง, $D = 50$ เซนติเมตร.....	36
4.20	กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน% $U_b$ ที่เทียบกับการคำนวณของทรงกลมที่รูปทรงผิดเพี้ยนเป็นทรงรีแนวนอนขนาด 3% บนทรงกลมลูกต่างๆ, $D = 50$ เซนติเมตร.....	37
4.21	กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน% $U_b$ ที่เทียบกับ IEC52 ของทรงกลมที่รูปทรงผิดเพี้ยนเป็นทรงรีแนวนอนขนาด 3% บนทรงกลมลูกต่างๆ, $D = 50$ เซนติเมตร.....	37
4.22	กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน% $U_b$ ที่เทียบกับการคำนวณของทรงกลมที่รูปทรงผิดเพี้ยนเป็นทรงรีแนวตั้งขนาด 3% บนทรงกลมลูกต่างๆ, $D = 50$ เซนติเมตร.....	38
4.23	กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน% $U_b$ ที่เทียบกับ IEC52 ของทรงกลมที่รูปทรงผิดเพี้ยนเป็นทรงรีแนวตั้งขนาด 3% บนทรงกลมลูกต่างๆ, $D = 50$ เซนติเมตร.....	38
4.24	กราฟการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าของทรงกลมที่รูปทรงผิดเพี้ยนเป็นทรงรีแนวนอนขนาด 3% บนทรงกลมลูกต่างๆ, $D = 50$ เซนติเมตร และ $S = 2.8$ เซนติเมตร.....	39
4.25	กราฟการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าของทรงกลมที่รูปทรงผิดเพี้ยนเป็นทรงรีแนวตั้งขนาด 3% บนทรงกลมลูกต่างๆ, $D = 50$ เซนติเมตร และ $S = 2.8$ เซนติเมตร.....	39
4.26	กราฟการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าของทรงกลมที่รูปทรงผิดเพี้ยนเป็นทรงรีแนวนอนขนาด 3% บนทรงกลมลูกต่างๆ, $D = 50$ เซนติเมตร และ $S = 10$ เซนติเมตร.....	40

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า	
4.27	กราฟการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าของทรงกลมที่รูปทรงผิเด็ย่นเป็นทรงรีแนวตั้งขนาด 3%บนทรงกลมลูกต่างๆ, D = 50 เซนติเมตร และ S = 10 เซนติเมตร.....	40
4.28	กราฟการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าของทรงกลมที่รูปทรงผิเด็ย่นเป็นทรงรีแนวอนขนาด 3%บนทรงกลมลูกต่างๆ, D = 50 เซนติเมตร และ S = 24 เซนติเมตร.....	41
4.29	กราฟการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าของทรงกลมที่รูปทรงผิเด็ย่นเป็นทรงรีแนวตั้งขนาด 3%บนทรงกลมลูกต่างๆ, D = 50 เซนติเมตร และ S = 24 เซนติเมตร.....	41
4.30	กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน%Ubที่เทียบกับการคำนวณของทรงกลมที่รูปทรงผิเด็ย่นเป็นทรงรีขนาดต่างๆบนทรงกลมลูกแรงสูง, D = 10 เซนติเมตร.....	42
4.31	กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน%Ubที่เทียบกับ IEC52 ของทรงกลมที่รูปทรงผิเด็ย่นเป็นทรงรีขนาดต่างๆบนทรงกลมลูกแรงสูง, D = 10 เซนติเมตร.....	42
4.32	กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน%Ubที่เทียบกับการคำนวณของทรงกลมที่รูปทรงผิเด็ย่นเป็นทรงรีขนาดต่างๆบนทรงกลมลูกแรงสูง, D = 15 เซนติเมตร.....	43
4.33	กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน%Ubที่เทียบกับ IEC52 ของทรงกลมที่รูปทรงผิเด็ย่นเป็นทรงรีขนาดต่างๆบนทรงกลมลูกแรงสูง, D = 15 เซนติเมตร.....	43
4.34	กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน%Ubที่เทียบกับการคำนวณของทรงกลมที่รูปทรงผิเด็ย่นเป็นทรงรีขนาดต่างๆบนทรงกลมลูกแรงสูง, D = 25 เซนติเมตร.....	44
4.35	กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน%Ubที่เทียบกับ IEC52 ของทรงกลมที่รูปทรงผิเด็ย่นเป็นทรงรีขนาดต่างๆบนทรงกลมลูกแรงสูง, D = 25 เซนติเมตร.....	44
4.36	กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน%Ubที่เทียบกับการคำนวณของทรงกลมที่รูปทรงผิเด็ย่นเป็นทรงรีขนาดต่างๆบนทรงกลมลูกแรงสูง, D = 50 เซนติเมตร.....	45
4.37	กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน%Ubที่เทียบกับ IEC52 ของทรงกลมที่รูปทรงผิเด็ย่นเป็นทรงรีขนาดต่างๆบนทรงกลมลูกแรงสูง, D = 50 เซนติเมตร.....	45
4.38	กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน%Ubที่เทียบกับการคำนวณของทรงกลมที่รูปทรงผิเด็ย่นเป็นทรงรีขนาดต่างๆบนทรงกลมลูกแรงสูง, D = 75 เซนติเมตร.....	46

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า	
4.39	กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน%Ubที่เทียบกับ IEC52 ของทรงกลมที่รูปทรงผิดเพี้ยนเป็นทรงรีขนาดต่างๆบนทรงกลมลูกแรงสูง, D = 75 เซนติเมตร.....	46
4.40	กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน%Ubที่เทียบกับการคำนวณของทรงกลมที่รูปทรงผิดเพี้ยนเป็นทรงรีขนาดต่างๆบนทรงกลมลูกแรงสูง, D = 100 เซนติเมตร.....	47
4.41	กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน%Ubที่เทียบกับ IEC52 ของทรงกลมที่รูปทรงผิดเพี้ยนเป็นทรงรีขนาดต่างๆบนทรงกลมลูกแรงสูง, D = 100 เซนติเมตร.....	47
4.42	กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน%Ubที่เทียบกับการคำนวณของทรงกลมที่รูปทรงผิดเพี้ยนเป็นทรงรีขนาดต่างๆบนทรงกลมลูกแรงสูง, D = 150 เซนติเมตร.....	48
4.43	กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน%Ubที่เทียบกับ IEC52 ของทรงกลมที่รูปทรงผิดเพี้ยนเป็นทรงรีขนาดต่างๆบนทรงกลมลูกแรงสูง, D = 150 เซนติเมตร.....	48
4.44	กราฟการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าของทรงกลมที่รูปทรงผิดเพี้ยนเป็นทรงรีแนวอนขนาดต่างๆบนทรงกลมลูกแรงสูง, D = 150 เซนติเมตร และ S = 75 เซนติเมตร.....	49
4.45	กราฟการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าของทรงกลมที่รูปทรงผิดเพี้ยนเป็นทรงรีแนวตั้งขนาดต่างๆบนทรงกลมลูกแรงสูง, D = 150 เซนติเมตร และ S = 75 เซนติเมตร.....	49
4.46	แสดงเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าและแนวเส้นตรงที่ใช้พิจารณาค่าแรงดันเริ่มเกิดบนก้านยึดทรงกลม, D = 50 เซนติเมตร และ S = 15 เซนติเมตร.....	56
4.47	กราฟแสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวเส้นตรงในรูปที่ 4.46.....	56
4.48	กราฟแสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างก้านยึดทรงกลมกับภาชนะ ที่บรรจุตามLine4, ขนาดก้านยึดทรงกลม 40, 60, 80 และ100%ของ0.2D	57
4.49	กราฟแสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างก้านยึดทรงกลมกับภาชนะบรรจุตามLine4, ขนาดก้านยึดทรงกลม 120, 140, 160, 180 และ 200%ของ0.2D.....	57
4.50	กราฟการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าของทรงกลมที่ก้านยึดทรงกลมขนาดปกติและ180%ของ0.2D, D = 50 เซนติเมตร และ S = 2 เซนติเมตร.....	61
4.51	กราฟการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าของทรงกลมที่ก้านยึดทรงกลมขนาดปกติและ180%ของ0.2D, D = 50 เซนติเมตร และ S = 24 เซนติเมตร.....	61

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
ก.1 แสดงการแบ่งสนามไฟฟ้าออกเป็นสามเหลี่ยมย่อยๆของแบบจำลองช่องว่างทรงกลม.....	69
ค.1 แบบจำลองที่แทนช่องว่างทรงกลมตามมาตรฐานIEC.....	75
ง.1 ขั้นตอนการคำนวณหาแรงดันเริ่มเกิด.....	77



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

ความต้องการพลังงานไฟฟ้ามีมากขึ้นตลอดเวลา ระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่ดีและมีเสถียรภาพจึงเป็นสิ่งสำคัญ ระบบดังกล่าวต้องใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีคุณภาพและได้มาตรฐาน เช่น สวิตช์ตัดตอน เบรกเกอร์ กัปดักฟ้าผ่า และเครื่องมือวัด (หม้อแปลงกระแส และ หม้อแปลงแรงดัน) ดังนั้นการทดสอบอุปกรณ์เหล่านี้เพื่อให้ได้มาตรฐานจึงมีความสำคัญมาก เช่น การทดสอบระดับการฉนวนของอุปกรณ์ (BIL) เป็นต้น

ช่องว่างทรงกลมเป็นส่วนประกอบหนึ่งของอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ เช่น เครื่องกำเนิดอิมพัลส์ โดยมีคุณสมบัติในการวัดค่ายอดของแรงดันโดยวัดได้ทั้งกระแสตรง กระแสสลับและอิมพัลส์ เนื่องจากความไม่แน่นอนของแรงดันเบรกดาว์นของช่องว่างทรงกลมจะเกิดขึ้นเมื่อทรงกลมไม่ได้มาตรฐาน เช่น ผิวทรงกลมไม่สม่ำเสมออาจเกิดรอยบุบหรือเส้นผ่านศูนย์กลางคลาดเคลื่อนไป ขนาดของก้านยึดทรงกลมไม่ถูกต้อง ซึ่งการวัดความไม่สม่ำเสมอของผิวทรงกลมทำได้จากการตัดกระดาษเป็นรูวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับทรงกลมที่จะวัดแล้วนำทรงกลมสอดเข้าไปไปครั้งลูกแล้วหมุนทรงกลมเพื่อดูช่องว่างบริเวณที่ผิวทรงกลมไม่สม่ำเสมอแล้วจึงวัดขนาดช่องว่างนั้น มาตรฐาน IEC52(1960)[1]ได้กำหนดค่าของส่วนประกอบต่างๆของทรงกลมมาตรฐานขึ้นมา เช่น ความไม่สม่ำเสมอของผิวทรงกลมและขนาดของก้านยึดทรงกลม เพื่อเป็นการตรวจสอบขอบเขตเหล่านี้จึงทำการจำลองเพื่อแก้ปัญหาเกี่ยวกับสนามไฟฟ้า

วิธีการแก้ปัญหาเกี่ยวกับสนามไฟฟ้ามีหลายวิธีสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ การทดลอง(Experimental) วิธีคณิตศาสตร์วิเคราะห์(Analytical) และ วิธีเชิงเลข(Numerical) โดยวิธีการทดลองจะใช้ค่าใช้จ่ายมากและค่อนข้างอันตราย ส่วนวิธีทางคณิตศาสตร์วิเคราะห์ใช้ได้สำหรับสนามไฟฟ้าที่มีรูปร่างง่ายเท่านั้น ดังนั้นวิธีเชิงเลขจึงเหมาะที่สุดสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาช่องว่างทรงกลม (ดูภาคผนวก ก. สำหรับหลักการวิเคราะห์ปัญหา) โดยตั้งแต่ปี 1968 ได้มีการนำเอา(Finite Element Method, FEM)มาแก้ปัญหาด้านสนามไฟฟ้า[2]ซึ่งเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป ดังนั้นจึงใช้วิธีการนี้เก็บข้อมูลเกี่ยวกับการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าเพื่อใช้ในการตรวจสอบค่าของส่วนประกอบต่างๆของทรงกลมที่ระบุไว้ใน IEC52 ว่าเหมาะสมแล้วหรือไม่ โดยดูจากค่าแรงดันเบรกดาว์นที่คำนวณได้ และยังใช้หาองค์ประกอบอื่นๆที่มีผลกระทบต่อแรงดันเบรกดาว์น ข้อมูลจากการทดลองนี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากในการปรับปรุงมาตรฐานให้ดียิ่งขึ้น



## 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การใช้งานช่องว่างทรงกลมในปัจจุบันจะยึดตามมาตรฐานIEC52(1960)ที่ได้กำหนดข้อกำหนดด้านรูปทรงของทรงกลมไว้ซึ่งมีหลายจุดควรได้รับการตรวจสอบแก้ไขดังนี้

- ในการปฏิบัติงานช่องว่างทรงกลมต้องมีการเทียบวัดที่ระยะห่างเป็นศูนย์โดยการนำทรงกลมมาชิดกันซึ่งอาจเกิดการผิดพลาดทำให้ทรงกลมกระทบกันจนเกิดรอยบุบได้ ทำให้ต้องเปลี่ยนใหม่เป็นการสิ้นเปลือง ดังนั้นจึงควรมหาขนาดรอยบุบที่ใหญ่ที่สุดที่ยังสามารถใช้ค่าในมาตรฐานได้
- ทรงกลมขนาดใหญ่ๆ เช่น ขนาด 150 เซนติเมตร การก่อสร้างจะทำได้ยากและมีโอกาสเกิดความคลาดเคลื่อนของเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลมสูง จากการหาขอบเขตความคลาดเคลื่อนของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ถูกต้องยิ่งขึ้น ถ้าได้ขอบเขตที่มากขึ้นจะทำให้การสร้างทรงกลมขนาดใหญ่ทำได้ง่ายขึ้น
- มาตรฐานกล่าวว่าก้านยึดทรงกลมต้องมีขนาดไม่เกิน 20%ของเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลม ซึ่งขนาดก้านยึดทรงกลมเล็กไปจะมีโอกาสเกิดโคโรนาได้

ในปัจจุบันได้มีวิธีการแก้ปัญหาสนามไฟฟ้าซึ่งใช้ในการตรวจสอบเหตุการณ์จำลองเพื่อหาแรงดันเบรกดาวนจ์ จะสามารถยืนยันหรือเพิ่มความแน่นอนเกี่ยวกับข้อกำหนดด้านรูปทรงของทรงกลมที่ยังสามารถใช้ค่าแรงดันเบรกดาวนจ์ใน IEC52 ได้ พร้อมทั้งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน

## 1.2 วัตถุประสงค์

ทำการใช้โปรแกรม Maxwell 2D ตรวจสอบขอบเขตทางรูปทรงของส่วนประกอบต่างๆในช่องว่างทรงกลม เช่น ความไม่สม่ำเสมอของผิวทรงกลมและขนาดของก้านยึดทรงกลมที่ได้ระบุไว้ในมาตรฐาน IEC52 เพื่อรองรับการใช้ช่องว่างทรงกลมให้ค่าความผิดพลาดของแรงดันเบรกดาวนจ์จากตารางที่ ข.1 (ดูภาคผนวก ข.) ไม่เกิน  $\pm 3\%$

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1) ใช้โปรแกรมMaxwell 2D จำลองหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในบริเวณที่ต้องการของแบบจำลองช่องว่างทรงกลมตามเงื่อนไขที่กำหนด
- 2) คำนวณหาค่าแรงดันเบรกดาวนจ์ของช่องว่างทรงกลมที่จำลองมาโดยคิดผลกระทบของความชื้นด้วย

3) ศึกษาและวิเคราะห์ผลการจำลองและผลการคำนวณค่าแรงดันเบรกดาวนีย์ โดยไม่ได้ทำการทดลองจริงและกำหนดขอบเขตของโครงสร้างช่องว่างทรงกลมที่ยังสามารถใช้ค่าในตารางที่ 1 ของ IEC52 ได้ในช่วงความผิดพลาด  $\pm 3\%$

#### 1.4 ข้อจำกัดในการวิจัย

1) เนื่องจากโปรแกรมที่ใช้จำลองหาค่าสนามไฟฟ้าเป็นโปรแกรมที่ใช้จำลองแบบ 2 มิติ ดังนั้นแบบจำลองที่ใช้ต้องมีลักษณะสมมาตรตามแกนหมุนบนระนาบ r-z หรือใช้แกนพิกัดระนาบ x-y ในการวิจัยนี้จะใช้เพียงแบบสมมาตรตามแกนหมุนบนระนาบ r-z จึงทำให้ไม่สามารถจำลองแบบจำลอง 3 มิติที่ไม่สมมาตรได้

2) แหล่งกำเนิดที่ใช้ป้อนในโปรแกรมมีเพียงแหล่งกำเนิดไฟฟ้าสถิตย์ดังนั้นจึงทำการตรวจสอบได้เฉพาะกระแสตรงและกระแสสลับเท่านั้น ส่วนอิมพัลส์ไม่สามารถตรวจสอบได้

#### 1.5 ลำดับขั้นตอนในการวิจัย

1) ออกแบบแบบจำลองที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างช่องว่างทรงกลมที่ระบุในมาตรฐาน IEC52

2) ศึกษาวิธีการคำนวณหาค่าแรงดันเบรกดาวนีย์จากการกระจายสนามไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองพร้อมทั้งเขียนโปรแกรมที่ช่วยในการคำนวณ

3) ทำการแก้ปัญหาแบบจำลองที่ออกแบบไว้เพื่อดูการกระจายสนามไฟฟ้าพร้อมหาค่าแรงดันเบรกดาวนีย์

4) ทำการวิเคราะห์ผลการจำลองและค่าแรงดันเบรกดาวนีย์ที่คำนวณได้ และกำหนดขอบเขตของโครงสร้างช่องว่างทรงกลมที่ยังสามารถใช้ค่าในตารางที่ 1 ของ IEC52 ได้

5) สรุปและนำเสนอผลงาน

## บทที่ 2

### กลไกการเกิดเบรกดาวนในก๊าซและการคำนวณค่าแรงดันเบรกดาวน

การตรวจสอบค่าส่วนประกอบต่างๆของช่องว่างทรงกลม เช่น ความสม่ำเสมอของผิวทรงกลม, ขนาดก้านยึดทรงกลม จะทำให้การเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวนที่คำนวณได้กับในตารางที่ 1 ของ IEC52 ดังนั้นวิธีการคำนวณแรงดันเบรกดาวนให้ได้ค่าที่ถูกต้องที่สุดจึงเป็นสิ่งสำคัญ โดยในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีกลไกการเกิดเบรกดาวนในก๊าซและวิธีการคำนวณค่าแรงดันเบรกดาวนตามเงื่อนไขในทฤษฎี

#### 2.1 กลไกการเกิดเบรกดาวนในก๊าซ [3],[4]

ก๊าซเป็นฉนวนชนิดหนึ่ง สภาพการเป็นฉนวนของก๊าซจะเสียไปเมื่อมีการดิสชาร์จเกิดขึ้น ซึ่งก็คือการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านก๊าซโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุ (อิเล็กตรอน, ไอออน) ที่เกิดจากการไอออไนเซชัน โดยการไอออไนเซชันจะเกิดขึ้นได้ต้องมีสนามไฟฟ้าที่กระตุ้นให้อนุภาคประจุมีพลังงานมากพอทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาเป็นประจุอิสระ และเมื่ออิเล็กตรอนอิสระมีพลังงานจลน์มากพอที่จะชนกับโมเลกุลจนเกิดกระบวนการแตกตัวของอิเล็กตรอนออกจากโมเลกุลของก๊าซ รวมกับอิเล็กตรอนที่ปล่อยออกจากผิวอิเล็กโทรดเมื่อได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าสูง จนกระทั่งอิเล็กตรอนอิสระมีจำนวนมากพอที่จะทำให้ก๊าซมีสภาพนำไฟฟ้าและเกิดเบรกดาวน การดิสชาร์จเบรกดาวนในช่องว่างแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ

ก. เบรกดาวนสมบูรณ์ (Complete Breakdown) คือ การเกิดเบรกดาวนตลอดแถบเชื่อมโยงระหว่างอิเล็กโทรด เรียกแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวนสมบูรณ์ว่าแรงดันเบรกดาวน  $U_b$  (Breakdown Voltage)

ข. เบรกดาวนเพียงบางส่วน (Partial Breakdown) คือ การเกิดเบรกดาวนไม่สมบูรณ์ จะเกิดขึ้นในกรณีที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง จะเกิดก่อนเบรกดาวนแบบสมบูรณ์ เรียกแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวนเพียงบางส่วนว่า แรงดันเริ่มเกิด  $U_i$  (Inception Voltage)

ค่าที่บอกถึงการเกิดไอออไนเซชันคือสัมประสิทธิ์ไอออไนเซชันยังผล (Effective Ionization Coefficients,  $\bar{\alpha}$ ) ซึ่งขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้ากับและความหนาแน่นของก๊าซดังสมการที่ (2.1.1)

$$\bar{\alpha} = f\left(\frac{E}{P}\right) \quad (2.1.1)$$

$$\bar{\alpha} = \alpha - \eta \quad (2.1.2)$$

โดยที่ E คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า

P คือ ความดันของก๊าซ

$\bar{\alpha}$  คือ ค่าเฉลี่ยการชนไอออนในเซชันของอิเล็กตรอน 1 ตัวเคลื่อนที่เป็นระยะ 1 เซนติเมตร

$\eta$  คือ สัมประสิทธิ์การเกาะตัวของอิเล็กตรอน (Attachment Coefficient) เป็นความสัมพันธ์ของการลดจำนวนอิเล็กตรอนต่อหน่วยระยะทางเคลื่อนที่ในปริมาตรของก๊าซ

กลไกการเกิดเบรกดาวนตามทฤษฎีสตรีมเมอร์ของ Meek และ Loeb และเงื่อนไขการเกิดสตรีมเมอร์ของ Rather ได้กล่าวไว้ว่า เบรกดาวนจะเริ่มเกิดตามเงื่อนไขในสมการที่ (2.1.3)

$$\int_0^{x_c} \bar{\alpha}(x) dx = K \quad (2.1.3)$$

โดยที่  $x_c$  = Critical avalanche length

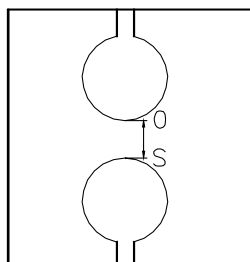
$\alpha(x)$  = Effective ionization coefficient

K = Streamer constant

## 2.2 การคำนวณค่าแรงดันเบรกดาวน $U_0$ หรือแรงดันเริ่มเกิด $U_i$ ในช่องว่างทรงกลม

จากเงื่อนไขการเกิดเบรกดาวนสตรีมเมอร์ในสมการที่ (2.1.3) จะใช้สำหรับการคำนวณแรงดันเริ่มเกิดในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย โดยการหาค่าแรงดันเริ่มเกิดจะต้องทราบข้อมูลต่อไปนี้

1. ข้อมูลของความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดทรงกลม,  $E(x)$  ตามแนวที่มีค่า  $\int \bar{\alpha} dx$  มากที่สุดสำหรับกรณีช่องว่างทรงกลมคือแนวเส้นตรงที่สั้นที่สุดระหว่างผิวทรงกลมทั้งสองโดยปกติ คือ ระหว่างจุดเกิดประกายไฟในรูปที่ 2.1 ซึ่งข้อมูลนี้จะได้มาจากการจำลองโดยใช้โปรแกรม Maxwell2D ของบริษัท Ansoft (ดูภาคผนวก ค. สำหรับวิธีการใช้โปรแกรม) โดยความละเอียดของข้อมูลความเครียดสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม HSSSM เป็น 1,414 จุด ดังนั้นการจำลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเลือกใช้ที่ 1,500 จุด



รูปที่ 2.1 แสดงแนวแกนสมมาตรของ  $E(x)$

2. ค่าความสัมพันธ์ของสมการที่ (2.1.1) ของก๊าซที่พิจารณาซึ่งก็คืออากาศ G.Friedrich (1992) ได้ทำการวัดข้อมูลสำหรับอากาศสังเคราะห์(20% O<sub>2</sub>, 80% N<sub>2</sub>) และได้ความสัมพันธ์(E/P)ดังนี้ [4] จากสมการที่ (2.2.4) จะได้  $(E/P)_{cr} = 2.588 \text{ kV/mm.bar}$ ,  $(E/P)_{cr}$  หมายถึง ค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของก๊าซ ที่ทำให้  $\bar{\alpha}$  เป็นศูนย์

$$\frac{\bar{\alpha}}{P} = C \left[ \frac{E}{P} - \left( \frac{E}{P} \right)_M \right]^2 - A \quad (2.2.4)$$

โดยที่  $C = 1.6053 \text{ mm.bar/kV}^2$

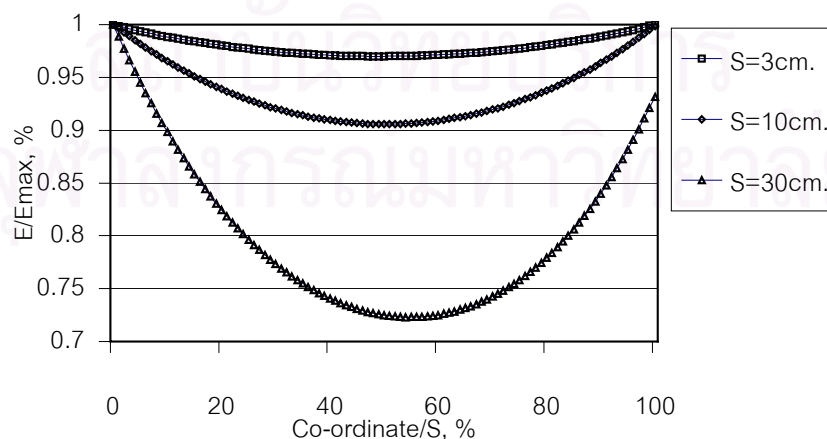
$(E/P)_M = 2.165 \text{ kV/mm.bar}$

$A = 0.2873 \text{ 1/mm.bar}$

$P = 1.013 \text{ bar}$  (ความดันที่สภาวะมาตรฐานที่ใช้ในตารางที่1 ของ IEC52)

3. ค่าK(Streamer constant) เป็นค่าที่ไม่สามารถหาได้อย่างถูกต้องแน่นอน ค่าK ของอากาศที่เป็นที่ยอมรับในปัจจุบันซึ่งได้จากทดลองของ Zaengl(1991) ที่สนามไฟฟ้าค่อนข้างสม่ำเสมอมีค่าเท่ากับ 9.15

การกระจายของสนามไฟฟ้าตามแนวแกนสมมาตรจากรูปที่ 2.2 (ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากการจำลองโดยใช้โปรแกรมMaxwell 2Dที่เส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลม 100 เซนติเมตร มีระยะห่าง 3, 10 และ 30 เซนติเมตร) จะกระจายอย่างค่อนข้างสม่ำเสมอสำหรับที่ช่องว่างเล็กๆ และกระจายอย่างไม่สม่ำเสมอสำหรับที่ช่องว่างใหญ่ๆดังแสดงในรูปที่ 2.2 ดังนั้นการคำนวณหา ค่าแรงดันเบรกดาวน U<sub>0</sub> หรือแรงดันเริ่มเกิด U<sub>i</sub> จึงแบ่งได้ 3 สภาวะตามขนาดของช่องว่างต่อความยาวของเส้นผ่านศูนย์กลาง(S/D) ดังต่อไปนี้[5]



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างของE(x)ตามแนวแกนสมมาตรในรูปที่ 2.1, D=100 เซนติเมตร.

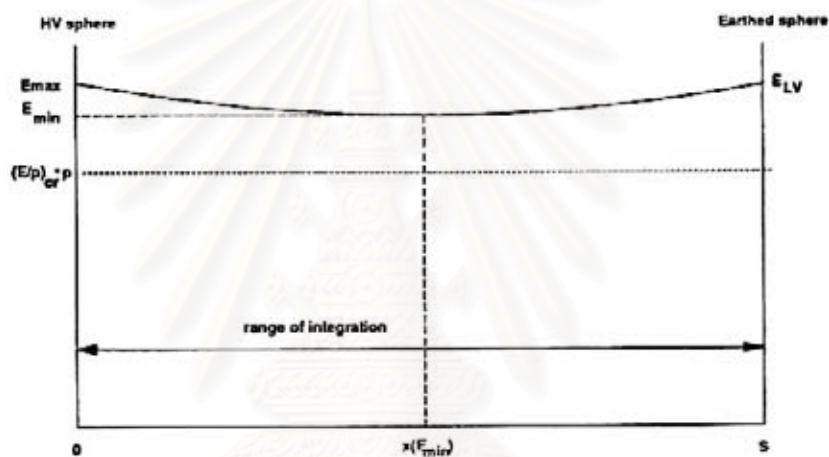
(ข้อมูลได้มาจากการจำลองโดยใช้โปรแกรมMaxwell 2D)

### สภาวะที่ 1 ค่า S/D มีค่าน้อย

ในรูปที่ 2.3 แสดงการกระจายของสนามไฟฟ้าตามแกนสมมาตรที่ค่า S/D น้อยๆ การกระจายค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะค่อนข้างคงที่และสมมาตร ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าที่ทรงกลมด้านต่อลงดิน  $E_{lv}$  มีค่าเกือบเท่ากับขนาดของ  $E_{max}$  ที่ทรงกลมด้านแรงสูง

ค่า  $(E/P)_{cr,P}$  มีค่าน้อยกว่า  $E_{min}$  ดังนั้นช่วงการอินทิเกรตของสมการที่ (2.1.3) จะเป็นค่า 0 ถึง S ดังแสดงในสมการที่ (2.2.5)

$$\int_0^S \bar{\alpha}(x) dx = K \quad (2.2.5)$$

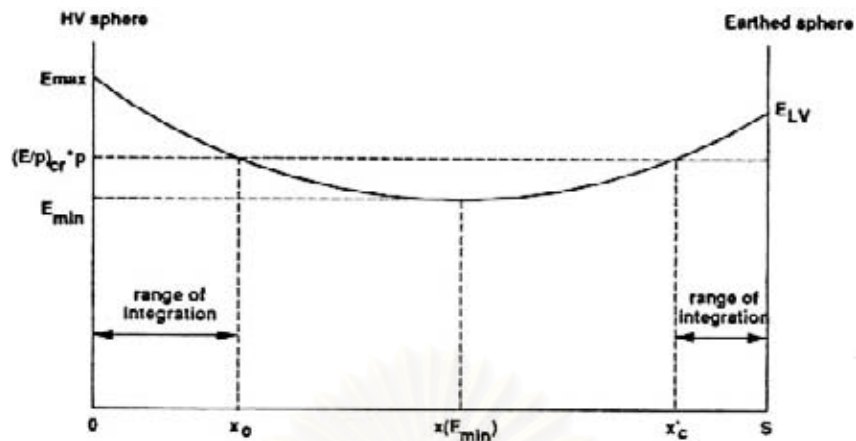


รูปที่ 2.3 ค่า  $E(x)$  ตามแนวแกนสมมาตรสำหรับ สภาวะที่ 1 ค่า S/D มีค่าน้อย [4]

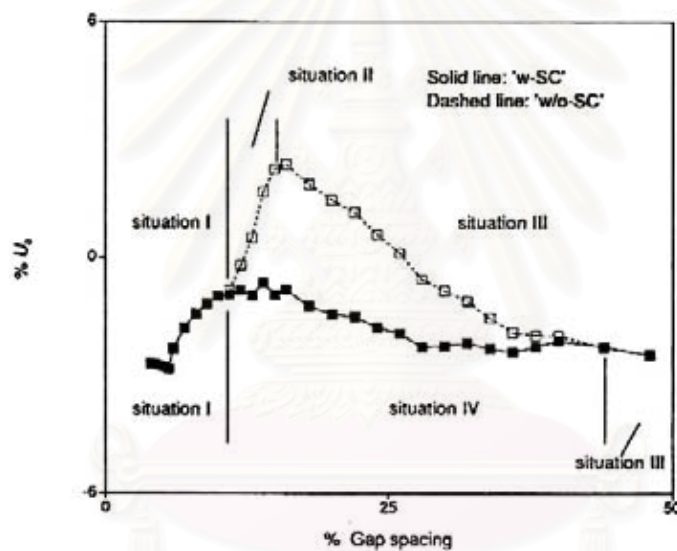
### สภาวะที่ 2 ค่า S/D มีค่าปานกลาง

ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าที่ทรงกลมด้านต่อลงดิน  $E_{lv}$  มีค่าน้อยกว่า  $E_{max}$  บนทรงกลมด้านแรงสูง จากรูปที่ 2.4 ค่า  $E_{min}$  จะน้อยกว่า  $(E/P)_{cr,P}$  การคำนวณค่าแรงดันเริ่มเกิดสำหรับกรณีนี้ จะใช้แบบคิดผลของประจุในบริเวณที่ว่างใกล้ทรงกลมลูกที่ต่อลงดินด้วยเพราะค่าความคลาดเคลื่อนของการคำนวณค่าแรงดันเบรกดาวน์เมื่อเทียบกับตารางที่ข.1 ค่า  $\%U_b$  ตามสมการที่ (2.2.6) มีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่คิดผลของประจุบริเวณด้านแรงต่ำตลอดช่วงระยะแกปดังแสดงในรูปที่ 2.5

$$\%U_b = \frac{(U_b, Calculation - U_b, IEC Table)}{U_b, IEC Table} \times 100 \quad (2.2.6)$$



รูปที่ 2.4 ค่า  $E(x)$  ตามแนวแกนสมมาตรสำหรับ สภาวะที่ 2 ค่า  $S/D$  มีค่าปานกลาง [4]



รูปที่ 2.5 การเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณทั้งสองแบบ คือ ทั้งคิดและไม่คิดผลของประจุบริเวณที่ว่างด้านต่อลงดิน,  $D=50$  เซนติเมตร. [4]

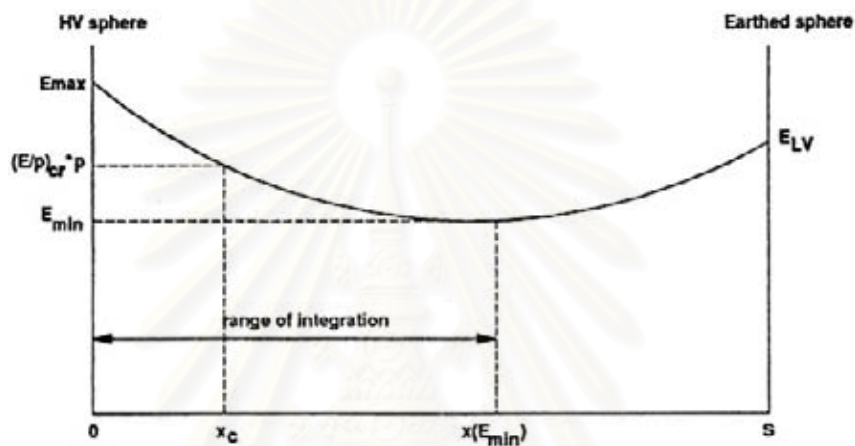
จากรูปที่ 2.4 จะได้ช่วงอินทิเกรตของสมการที่ (2.1.3) เป็นค่าตั้งแต่ 0 ถึง  $x_c$  และตั้งแต่  $x_c'$  ถึง  $S$  ดังแสดงในสมการที่ (2.2.7)

$$\int_0^{x_c} \bar{\alpha}(x) dx + \int_{x_c'}^S \bar{\alpha}(x) dx = K \quad (2.2.7)$$

### สภาวะที่3 ค่าS/Dมีค่ามาก

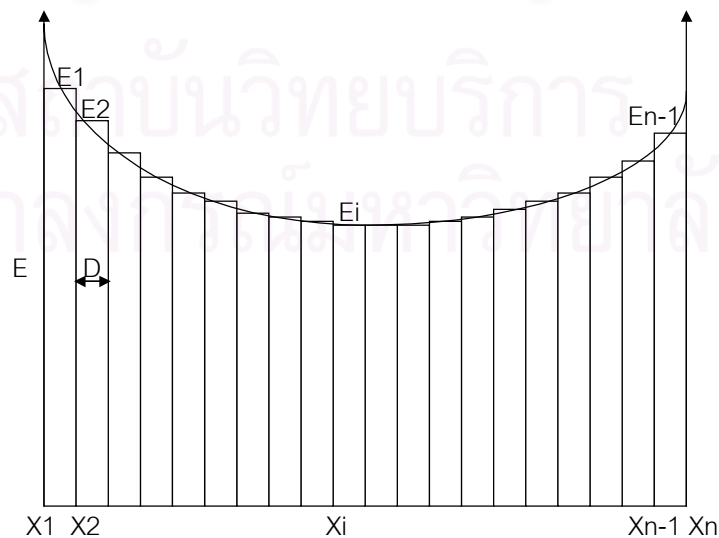
จากรูปที่ 2.6 การกระจายของสนามไฟฟ้าจะไม่สม่ำเสมออย่างมากและไม่ค่อยคงที่มีค่า  $E_v$  ต่ำกว่า  $(E/P)_{cr} \cdot xP$  ดังนั้นการอินทิเกรตของสมการที่ (2.1.3) จะอยู่ในช่วง 0 ถึง  $X_c$  ดังสมการที่ (2.2.8)

$$\int_0^{x_c} \bar{\alpha}(x) dx = K \quad (2.2.8)$$



รูปที่ 2.6 ค่า  $E(x)$  ตามแนวแกนสมมาตรสำหรับ สภาวะที่3 ค่าS/Dมีค่ามาก[4]

ข้อมูลของความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างทรงกลมโดยการจำลองจากโปรแกรม Maxwell จะเป็นค่าพิกัดตั้งแต่ 0 ถึง S ตามแนวเส้นตรงที่ใกล้ที่สุดระหว่างทรงกลมและมีฮิสโตแกรมดังตัวอย่างในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ฮิสโตแกรมของความเครียดสนามไฟฟ้า



เมื่อเรานำข้อมูลที่ได้จากการจำลองมาพล็อตกราฟโดยความเครียดสนามไฟฟ้ากับแรงดันจะมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.2.9)[6]

$$E = \frac{U_1 - U_2}{D} = \frac{U_{12}}{D} \quad (2.2.9)$$

จากนั้นแทนค่า  $\bar{\alpha}$  ในสมการที่ (2.2.4) ลงในสมการที่ (2.2.5), (2.2.7) หรือ(2.2.8) ขึ้นอยู่กับค่า %S/D ตามที่กล่าวมาโดยแต่ละสี่เหลี่ยมย่อยในรูปที่ 2.7 หาพื้นที่จากค่า  $E_n$  ที่คงที่ในแต่ละช่วงคูณกับค่าคงที่ T ที่กำหนดขึ้นแล้วแทนค่าผลคูณนี้ลงในค่า E ในสมการที่ (2.2.4) ได้เป็นสมการที่ (2.2.10) และเมื่อแทนการอินทิเกรตด้วยผลรวมของพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าเล็กๆที่มีความกว้าง  $B_n$  จะได้เป็นสมการที่ (2.2.11) ดังในรูปที่ 2.7 แล้วหาค่า T ที่ทำให้สมการเป็นจริง สุดท้ายนำค่า T ที่หาได้นี้ไปคูณกับแรงดันที่ป้อนให้กับทรงกลมด้านแรงสูงจะได้ค่าแรงดันเริ่มเกิด  $U_i$  ดังแสดงในสมการที่ (2.2.12) การหาค่าแรงดันเริ่มเกิดนี้จะทำโดยใช้โปรแกรม Excel (ดูภาคผนวก ง. สำหรับโปรแกรมการคำนวณ)

$$\int_0^S \left[ PC \times \left[ \frac{TE_n}{P} - \left( \frac{E}{P} \right)_M \right]^2 - AP \right] dx = K \quad (2.2.10)$$

$$PC \sum_{n=1}^{1499} B_n \left[ \frac{TE_n}{P} - \left( \frac{E}{P} \right)_M \right]^2 - AP \sum_{n=1}^{1499} B_n = K \quad (2.2.11)$$

$$U_i = 100 \times T \quad (2.2.12)$$

$$\text{โดยที่ } E_n = \begin{cases} E_n, TE_n \geq 2.588 \times 1.013 \\ 0, TE_n < 2.588 \times 1.013 \end{cases}$$

$$B_n = \begin{cases} \frac{S}{1499}, TE_n \geq 2.588 \times 1.013 \\ 0, TE_n < 2.588 \times 1.013 \end{cases}$$

$$E_n = \text{ความเครียดสนามไฟฟ้า (kV/mm)}$$

$$T = \text{ค่าคงที่}$$

- C = 1.6053 mm.bar/kV<sup>2</sup>  
(E/P)<sub>M</sub> = 2.165 kV/mm.bar  
A = 0.2873 1/mm.bar  
P = ความดันชั้นบรรยากาศ (1.013 mm.bar)  
S = ระยะห่างระหว่างทรงกลม (mm.)  
K = 9.15  
U<sub>i</sub> = แรงดันเริ่มเกิด (V)



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

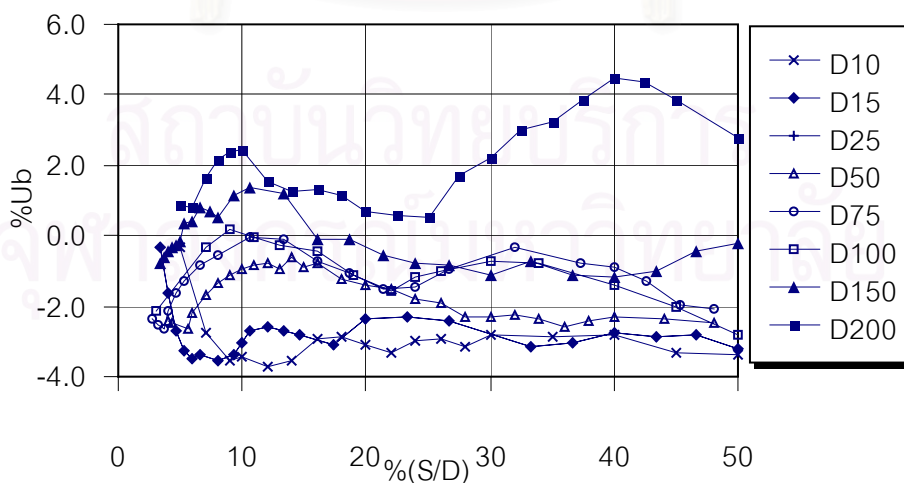
### บทที่ 3

#### แบบจำลองช่องว่างทรงกลมที่จะทำการตรวจสอบ

การกำหนดแบบจำลองเพื่อตรวจสอบเงื่อนไขทางโครงสร้างของทรงกลมจะต้องครอบคลุมทุกกรณีที่จะเกิดขึ้นได้ จนสามารถยืนยันได้อย่างแน่ชัดว่าแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ขั้นสุดท้ายเป็นกรณีที่ทำให้ค่าแรงดันเบรกดาวนัคลาดเคลื่อนจากตารางแสดงค่าแรงดันเบรกดาวนัของช่องว่างทรงกลมในIEC52 (ตารางที่ ข.1 คู่มือผนวก ข.) มากที่สุด

เพื่อให้การจำลองมีประสิทธิภาพจะต้องมีการตรวจสอบทั้งโปรแกรมMaxwell2D และโปรแกรมที่ใช้คำนวณแรงดันเบรกดาวนั การตรวจสอบทำได้โดยใช้ทรงกลมมาตรฐานในการเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวนัที่คำนวณได้แสดงในตารางที่ ข.2 (คู่มือผนวก ข.) กับตารางที่ ข.1 โดยจะทำการตรวจสอบเฉพาะขนาดทรงกลมที่มีการใช้งานอยู่ในปัจจุบันเท่านั้น คือ ทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10, 15, 25, 50, 75, 100 และ 150 เซนติเมตร ได้ผลการเปรียบเทียบดังแสดงในรูปที่ 3.1 และเมื่อเทียบกับรูปที่ 3.2 ซึ่งมาจากโปรแกรมHSSSM จะใกล้เคียงกันมาก

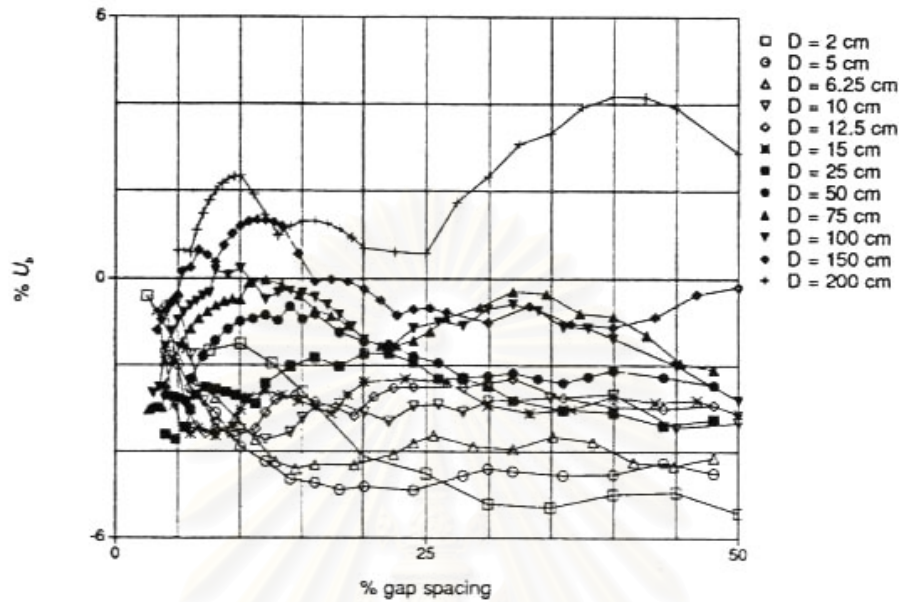
จากที่กล่าวในมาตรฐาน IEC 60052, Ed3.[7] เกี่ยวกับผลกระทบของความชื้นจะทำให้แรงดันเบรกดาวนัเพิ่มขึ้นในอัตรา  $0.2\%/gm^{-3}$  และค่าในตารางที่ ข.1 จะอยู่ภายในเงื่อนไขที่ความชื้นระหว่าง  $5 gm^{-3}$  ถึง  $12 gm^{-3}$  มีค่าเฉลี่ยเป็น  $8.5 gm^{-3}$  ดังนั้นแรงดันเบรกดาวนัที่ได้จากการจำลองจะเพิ่มขึ้น1.7% และใช้สมการที่ (3.1) ในการคำนวณ%Ubที่คิดผลของความชื้นด้วย โดยมีรูปที่3.3แสดงค่า%Ubที่คิดผลของความชื้น  $8.5 gm^{-3}$  และจะใช้อ้างอิงถึง%Ubกรณีทรงกลมมาตรฐานเพื่อใช้ในการตรวจสอบเงื่อนไขทางโครงสร้างต่อไป



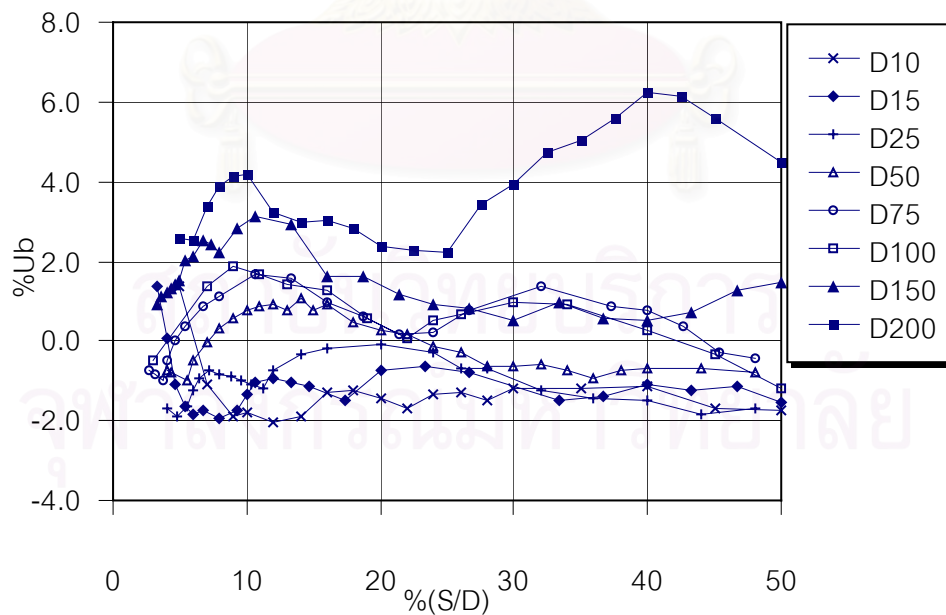
รูปที่ 3.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ %Ub จากMaxwell2D

สำหรับขนาดทรงกลมต่างๆ เมื่อไม่คิดผลของความชื้น

$$\%U_b = \frac{(1.017 \times U_{b, \text{Calculation}} - U_{b, \text{IEC Table}})}{U_{b, \text{IEC Table}}} \times 100 \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ %Ub จากHSSSM สำหรับทรงกลม  
ขนาดต่างๆเมื่อไม่คิดผลของความชื้น [4]



รูปที่ 3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ %Ub จากMaxwell2D สำหรับ  
ขนาดทรงกลมต่างๆเมื่อคิดผลของความชื้น

ค่าแรงดันเบรกดาวนที่<sup>1</sup>ได้จากการคำนวณ เป็นค่าแรงดันที่ทำให้อิเล็กทรอนิกส์เริ่มต้นมีจำนวนมากพอที่จะเกิดวาลานซ์ จึงเป็นค่าแรงดันเบรกดาวนที่ต่ำที่สุด ดังนั้นค่า %Ub ควรจะเป็นค่าลบเท่านั้น แต่จากรูปที่ 3.3 ค่า%Ubมีทั้งค่าบวกและค่าลบอาจมาจากการเกิดจุดบกพร่องบนทรงกลม, การจัดช่องว่างทรงกลมผิดพลาดไปและฝุ่นละออง ความบกพร่องเหล่านี้จะมากขึ้นเมื่อทรงกลมมีขนาดใหญ่ขึ้นดังในรูปที่ 3.3 โดยเฉพาะที่ทรงกลมขนาด 200 เซนติเมตร ในบริเวณ %S/D ระหว่าง 5 ถึง 15% และมากกว่า25% และที่ทรงกลมขนาด 150 เซนติเมตรในบริเวณ%S/D ระหว่าง 7 ถึง 14% ค่า%Ubจะสูงกว่าขอบเขตที่ระบุไว้ในมาตรฐานIEC52 (3%) ซึ่งควรมีการแก้ไขข้อมูลในมาตรฐานสำหรับค่าแรงดันเบรกดาวนเหล่านี้ ดังนั้นแบบจำลองที่ใช้ตรวจสอบเหตุการณ์ที่ใช้พิจารณาเงื่อนไขต่างๆไม่นำทรงกลมขนาด 200 เซนติเมตร มาพิจารณา รวมทั้งทรงกลมขนาด 150 เซนติเมตรในบริเวณ%S/Dดังกล่าวด้วย

การกำหนดแบบจำลองที่ใช้ในการตรวจสอบเงื่อนไขทางโครงสร้างของทรงกลมจะต้องครอบคลุมทุกกรณีที่จะเกิดขึ้นได้ จนสามารถยืนยันได้อย่างแน่ชัดว่าแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ขั้นสุดท้ายเป็นกรณีที่ให้ค่าแรงดันเบรกดาวนคลาดเคลื่อนจากตารางที่ ข.1มากที่สุดและยังยอมรับได้ และจะจำลองต่อไปเพื่อหาขอบเขตทางโครงสร้างที่พิจารณาจากตารางที่ ข.2ด้วยเพื่อใช้เปรียบเทียบระหว่างขอบเขตทางโครงสร้างที่มาจากการตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของแรงดันเบรกดาวนจากมาตรฐานและการคำนวณ

เงื่อนไขในการสร้างและการใช้ช่องว่างทรงกลมที่ระบุในมาตรฐาน IEC52 ที่จะทำให้การวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

1. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมคลาดเคลื่อนไม่เกิน 2%ของค่าที่ระบุ
2. บริเวณจุดเกิดประกายไฟ(Sparking point) จะต้องเรียบไม่มีรอยทั้งทรงกลมที่วางในแนวตั้งและแนวนอน
3. ก้านยึดทรงกลม(Shank)ต้องไม่มีขอบคมๆ เส้นผ่านศูนย์กลางของก้านยึดทรงกลมต้องมีขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ0.2เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลม
4. สำหรับแรงดันกระแสตรงค่าแรงดันเบรกดาวนจะมีความผิดพลาดมากกว่ากระแสสลับ โดยค่าความผิดพลาดเกิดจากฝุ่นในอากาศ และค่าแรงดันเบรกดาวนกระแสตรงจะมีค่าน้อยลงถ้าจ่ายแรงดันเป็นเวลานาน การใช้ตารางในIECมีเงื่อนไขสำหรับกระแสสลับ คือ ขนาดช่องว่างอยู่ในช่วง0.05D-0.5Dจะมีค่าความถูกต้องอยู่ในช่วง  $\pm 3\%$  และสำหรับกระแสตรง คือ ขนาดช่องว่างในช่วง0.05D-0.4Dจะมีค่าความถูกต้องอยู่ในช่วง  $\pm 5\%$

เหตุการณ์ที่จะจำลองเพื่อหาขอบเขตทางโครงสร้างของทรงกลมและความสัมพันธ์กันระหว่างความผิดปกติของทรงกลมในลักษณะต่างๆกับค่าแรงดันเบรกดาวนบริเวณช่อง

ว่างทรงกลม โดยพิจารณาจากผลกระทบต่อแรงดันเบรกดาวนเมื่อเทียบกับกรณีทรงกลมมาตรฐาน เหตุการณ์ทั้งหมดแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มดังนี้

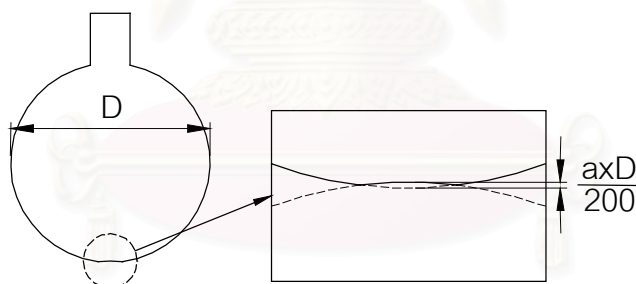
### 3.1 แบบจำลองกลุ่มที่1 วิเคราะห์ทรงกลม

ใช้วิเคราะห์เงื่อนไขที่1และ2โดยให้ผิวทรงกลมไม่สัมผัสในลักษณะต่างๆเพื่อที่จะหาขอบเขตทางโครงสร้างที่ยังให้ค่าแรงดันเบรกดาวนสามารถใช้ค่าในตารางที่ ข.1ได้ พร้อมทั้งนั้นก็ทำจำลองเพื่อหาขอบเขตที่เทียบกับการคำนวณด้วย มีหัวข้อวิเคราะห์ ดังนี้

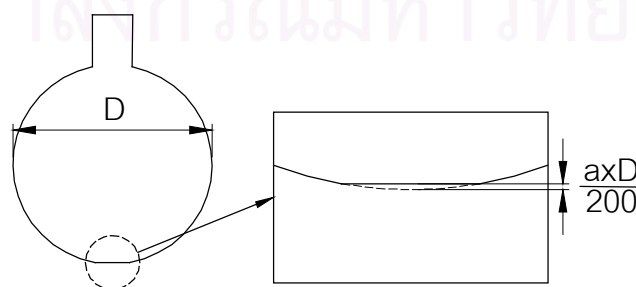
#### 3.1.1 วิเคราะห์การเกิดรอยบุบบนทรงกลม

##### 3.1.1.1 วัดดูประสงค์

เนื่องจากทรงกลมมีโอกาสที่จะเกิดรอยบุบจากการโดนกระแทก เช่น เวลาปรับระยะห่างของทรงกลมเพื่อเทียบตำแหน่งศูนย์ต้องปรับให้ทรงกลมชิดกัน ถ้าเกิดการผิดพลาดทรงกลมอาจกระแทกจนบุบบริเวณจุดเกิดประกายไฟได้ โดยรอยบุบอาจเกิดบนทรงกลมลูกใดลูกหนึ่ง ดังรูปที่3.4หรืออาจเกิดรอยบุบบนทรงกลมทั้งสองลูกดังรูปที่3.5 ดังนั้นจึงต้องทำการศึกษาผลกระทบของรอยบุบดังนี้



รูปที่ 3.4 แสดงรอยบุบขนาด  $a\%$  บนทรงกลมลูกใดลูกหนึ่ง

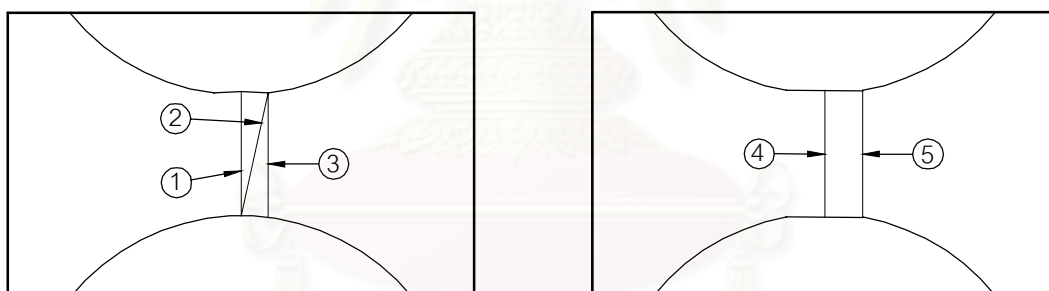


รูปที่ 3.5 แสดงรอยบุบขนาด  $a\%$  บนทรงกลมทั้งสองลูก

1. ศึกษาหาแนวเส้นตรงบริเวณช่องว่างทรงกลมที่มีค่า  $\int \alpha dx$  มากที่สุดหรือแนวที่โอกาสเกิดเบรกดาว์นมากที่สุด
2. ศึกษารอยบุบที่เกิดบนทรงกลมลูกต่างๆ (ลูกแรงดันสูง, ลูกต่อลงดิน และทั้งสองลูก) มีผลต่อแรงดันเบรกดาว์นต่างกันอย่างไร
3. ขนาดของรอยบุบมีผลต่อแรงดันเบรกดาว์นอย่างไร
4. สรุปหากรณีที่ทำให้แรงดันเบรกดาว์นคลาดเคลื่อนไปมากที่สุดและกำหนดขนาดรอยบุบที่ใหญ่ที่สุดที่ยังใช้ค่าในตารางที่ ข.1 ได้

### 3.1.1.2 การเลือกกลุ่มตัวอย่าง

1 เลือกทรงกลมขนาด 150 เซนติเมตร มีระยะห่าง 5, 40 และ 75 เซนติเมตร เลือกขนาดรอยบุบที่ใหญ่พอที่จะเห็นความแตกต่างของแรงดันเบรกดาว์นตามแนวต่างๆอย่างชัดเจน จึงได้รอยบุบขนาด 0.2% บนทรงกลมทั้ง 3 กรณี (ลูกแรงสูง, ลูกต่อลงดิน และทั้งสองลูก) มาใช้ในการวิเคราะห์หาแนวเส้นตรงที่จะเกิดเบรกดาว์นหรือแนวเส้นตรงที่คำนวณแรงดันเบรกดาว์นได้ต่ำที่สุดและจะใช้แนวเส้นตรงนี้วิเคราะห์เกี่ยวกับรอยบุบต่อไป โดยมีแนวเส้นตรงที่จะพิจารณา ดังรูปที่ 3.6



ก) เกิดรอยบุบบนทรงกลมลูกใดลูกหนึ่ง

ข) เกิดรอยบุบบนทรงกลมทั้งสองลูก

รูปที่ 3.6 แสดงแนวเส้นตรงที่จะเก็บข้อมูลความเครียดสนามไฟฟ้า

2. เลือกทรงกลมทุกขนาดที่ใช้โดยมีระยะห่าง 3 ระยะ คือ ระยะน้อยที่สุด, ระยะปานกลาง (%S/D ประมาณ 25%) และระยะมากที่สุดที่แสดงในตารางที่ ข.1 และเลือกขนาดรอยบุบที่ใหญ่พอที่จะเห็นความแตกต่างของ %Pb ของทรงกลมขนาดต่างๆอย่างชัดเจนและไม่ใหญ่เกินไปจนให้ %Pb เลยขอบเขต (-3%) ไปมาก จึงได้รอยบุบขนาด 0.6% บนทรงกลมทั้ง 3 กรณี มาใช้ในการวิเคราะห์ว่าการเกิดรอยบุบบนทรงกลมกรณีใดให้ค่าแรงดันเบรกดาว์นคลาดเคลื่อนจากกรณี

ทรงกลมมาตรฐานที่ได้จากการจำลองมากที่สุด โดยดูจาก%U<sub>b</sub>ที่เทียบกับการคำนวณดังสมการที่(3.2)ซึ่งเป็นค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันเบรกดาว์นจากกรณีทรงกลมมาตรฐานที่มาจากการคำนวณโดยใช้ข้อมูลความเครียดสนามไฟฟ้าจากโปรแกรมMaxwell2D

$$\%U_b(\text{Base on Maxwell}) = \frac{(U_{b,error}(\text{Maxwell}) - U_{b,standard}(\text{Maxwell}))}{U_{b,standard}(\text{Maxwell})} \times 100 \quad (3.2)$$

3. นำผลการทดลองจากข้อที่2 ไปพิจารณาหาผลกระทบของขนาดรอยบุบต่อ %U<sub>b</sub>สำหรับทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ โดยเทียบกับทั้งแรงดันเบรกดาว์นจากมาตรฐาน IEC 52 ในตารางที่ ข.1 และจากการคำนวณในตารางที่ ข.2 จากนั้นจึงเลือกเกิดรอยบนทรงกลมลูกที่ทำให้ |%U<sub>b</sub>| มากที่สุด โดยใช้ทรงกลมที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและระยะห่างที่ทำให้ |%U<sub>b</sub>| มากที่สุดด้วย แล้วเปลี่ยนขนาดรอยบุบเพื่อหาขนาดรอยบุบที่ยังสามารถใช้ค่าในตารางที่ ข.1 ได้

### 3.1.2 วิเคราะห์การผิดเพี้ยนจากทรงกลมไปเป็นทรงรี

#### 3.1.2.1 วัตถุประสงค์

จากข้อกำหนดในมาตรฐานIEC52ว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมคลาดเคลื่อนไม่เกิน2%ของค่าที่ระบุ ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์การผิดเพี้ยนจากทรงกลมไปเป็นทรงรีเพื่อตรวจสอบขอบเขตของการคลาดเคลื่อนนี้ให้ถูกต้องยิ่งขึ้น โดยความคลาดเคลื่อนที่แสดงในผลการจำลองจะเทียบกับค่าแรงดันเบรกดาว์นในตารางที่ข.1และในตารางที่ข.2เพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกันต่อไป โดยแบ่งหัวข้อที่จะทำการศึกษาดังนี้

1. ศึกษาการผิดเพี้ยนเป็นทรงรีทั้งวิธีตามแนวนอนและตามแนวตั้งว่ามีผลกระทบต่อแรงดันเบรกดาว์นอย่างไร
2. ศึกษาการผิดเพี้ยนจากทรงกลมไปเป็นทรงรีที่เกิดกับทรงกลมลูกแรงดันสูง, ลูกที่ต่อลงดิน และทั้งสองลูกพร้อมกันว่ามีผลต่อแรงดันเบรกดาว์นอย่างไร
3. ศึกษาขนาดการผิดเพี้ยนจากทรงกลมไปเป็นทรงรีทั้งวิธีตามแนวนอนและตามแนวตั้ง ว่ามีผลต่อแรงดันเบรกดาว์นอย่างไร
4. สรุปหากรณีที่ทำให้แรงดันเบรกดาว์นคลาดเคลื่อนมากที่สุดและกำหนดขอบเขตความคลาดเคลื่อนของเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลม

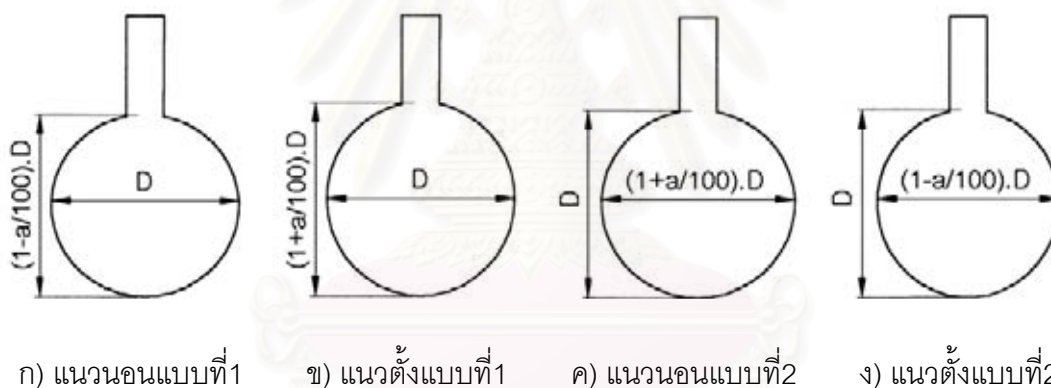


### 3.1.2.2 การเลือกกลุ่มตัวอย่าง

1. เลือกทรงกลมขนาด 50 เซนติเมตร มีระยะห่างตลอดย่านใช้งานที่ระบุในตารางที่ ข.1 โดยให้ลูกแรงดันสูงเป็นทรงรีตามแนวตั้งและตามแนวนอนรวมทั้งสิ้น 4 แบบดังรูปที่ 3.7 โดยมีขนาดผิเดี่ยวนไปเป็นทรงรี 3% ของเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลม เพื่อหารูปแบบการผิเดี่ยวนที่ ให้ค่าแรงดันเบรกดาวนัผิเดี่ยวนมากที่สุดและใช้วิเคราะห์วัตถุประสงคที่ต่อไป

2. เลือกทรงกลมขนาด 50 เซนติเมตร ในการศึกษาการผิเดี่ยวนเป็นทรงรีขนาด 3% ทั้งในแนวตั้งและแนวนอนบนทรงกลมทั้ง 3 กรณี (ลูกแรงสูง, ลูกต่อลงดิน และทั้งสองลูก) เพื่อวิเคราะห์วัตถุประสงคที่ 2 และหากรณีที่มีผลต่อแรงดันเบรกดาวนัมากที่สุด

3. จากผลการจำลองตามวัตถุประสงคที่ 1 และ 2 จะทำให้สามารถทำการจำลอง การผิเดี่ยวนเป็นทรงรีขนาดต่างๆทั้งตามแนวตั้งและตามแนวนอนบนทรงกลมลูกที่มีผลกระทบต่อแรงดันเบรกดาวนัมากที่สุด และหาขอบเขตการผิเดี่ยวนเป็นทรงรีทั้งแนวตั้งและแนวนอนของทรงกลมทุกขนาดที่พิจารณา จากนั้นจึงกำหนดขอบเขตการผิเดี่ยวนเป็นทรงรีที่แน่นอนที่ยังสามารถใช้ ตารางที่ ข.1 ได้



รูปที่ 3.7 แสดงการผิเดี่ยวนไปเป็นทรงรีขนาด  $a\%$  แบบต่างๆทั้งในแนวนอนและแนวตั้ง

## 3.2 แบบจำลองกลุ่มที่ 2 วิเคราะห์ก้านยึดทรงกลม

วิเคราะห์ทรงกลมที่ทรงกลมมาตรฐานแต่เปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของก้านยึดทรงกลมให้มีขนาดต่างๆกันเพื่อที่จะหาขอบเขตของขนาดก้านยึดทรงกลม

### 3.2.1 วัตถุประสงค

จากข้อกำหนดในมาตรฐาน IEC52 ว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของก้านยึดทรงกลมต้องมีขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลม ดังนั้นจึงทำการ

วิเคราะห์ก้านยึดทรงกลมเพื่อตรวจสอบขอบเขตของขนาดก้านยึดทรงกลมที่ถูกต้องยิ่งขึ้น โดยแบ่งหัวข้อที่จะทำการศึกษาดังนี้

1. ศึกษาหาบริเวณบนก้านทรงกลมที่มีโอกาสเกิดโคโรนามากที่สุด
2. ขนาดก้านยึดทรงกลมที่ขนาดใหญ่และเล็กกว่าที่กำหนดว่ามีผลหรือแนวโน้มในการเกิดโคโรนา (Corona) อย่างไร
3. ศึกษาขนาดก้านยึดทรงกลมที่ขนาดใหญ่และเล็กกว่าที่กำหนดไว้ว่ามีผลต่อแรงดันเบรกดาวนซ์ของช่องว่างทรงกลมอย่างไร

### 3.2.2 การเลือกกลุ่มตัวอย่าง

1. เลือกทรงกลมขนาด 50 เซนติเมตร มีระยะห่าง 15 เซนติเมตร เป็นแบบจำลองเพื่อศึกษาหาบริเวณบนก้านยึดทรงกลมที่มีโอกาสเกิดโคโรนามากที่สุด โดยใช้ข้อมูลความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวเส้นตรงระดับต่างๆระหว่างก้านยึดทรงกลมกับภาชนะบรรจุมาพิจารณา
2. เลือกทรงกลมขนาด 50 เซนติเมตร ระยะห่าง 15 เซนติเมตร เปลี่ยนขนาดก้านยึดทรงกลมเป็น 40%, 60%, 80%, 120%, 140%, 160%, 180% และ 200% ของ 0.2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลม เพื่อศึกษาแนวโน้มในการเกิดโคโรนาจากนั้นเลือกทรงกลมขนาด 10, 50 และ 150 เซนติเมตร ที่ระยะห่างมากที่สุดมาหาขอบเขตก้านยึดทรงกลมที่ยังไม่ทำให้เกิดโคโรนา
3. เลือกทรงกลมขนาด 10, 50 และ 150 เซนติเมตร ที่ระยะน้อยที่สุด, ระยะปานกลาง (%S/D ประมาณ 25%) และระยะมากที่สุดที่แสดงในตารางที่ ข.1 โดยให้ก้านทรงกลมมีขนาด 180% ของ 0.2D เพื่อศึกษาว่าที่ระยะห่างใดให้ค่าแรงดันเบรกดาวนซ์บริเวณช่องว่างทรงกลมคลาดเคลื่อนมากที่สุด จากนั้นทำการจำลองโดยเปลี่ยนขนาดก้านยึดทรงกลมให้ใหญ่ขึ้นจนถึง 2 เท่าของ 0.2D เพื่อศึกษาผลกระทบของขนาดก้านยึดทรงกลมที่ใหญ่ขึ้นต่อแรงดันเบรกดาวนซ์ของช่องว่างทรงกลม จากนั้นจึงกำหนดขนาดก้านยึดทรงกลมที่ยังใช้ค่าในตารางที่ ข.1 ได้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### การวิเคราะห์ผลการจำลองช่องว่างทรงกลม

ในบทนี้จะแสดงการเลือกกลุ่มตัวอย่างโดยละเอียดต่อเนื่องจากในบทที่ 3 พร้อมทั้งแสดงผลการจำลอง วิเคราะห์ผลการจำลอง สรุปผล และปัญหาที่เกิดขึ้นถ้ามี เพื่อให้ได้ขอบเขตทางโครงสร้างที่แน่นอนของทรงกลม โดยจะรายงานตามลำดับเหตุการณ์ที่ระบุในบทที่ 3

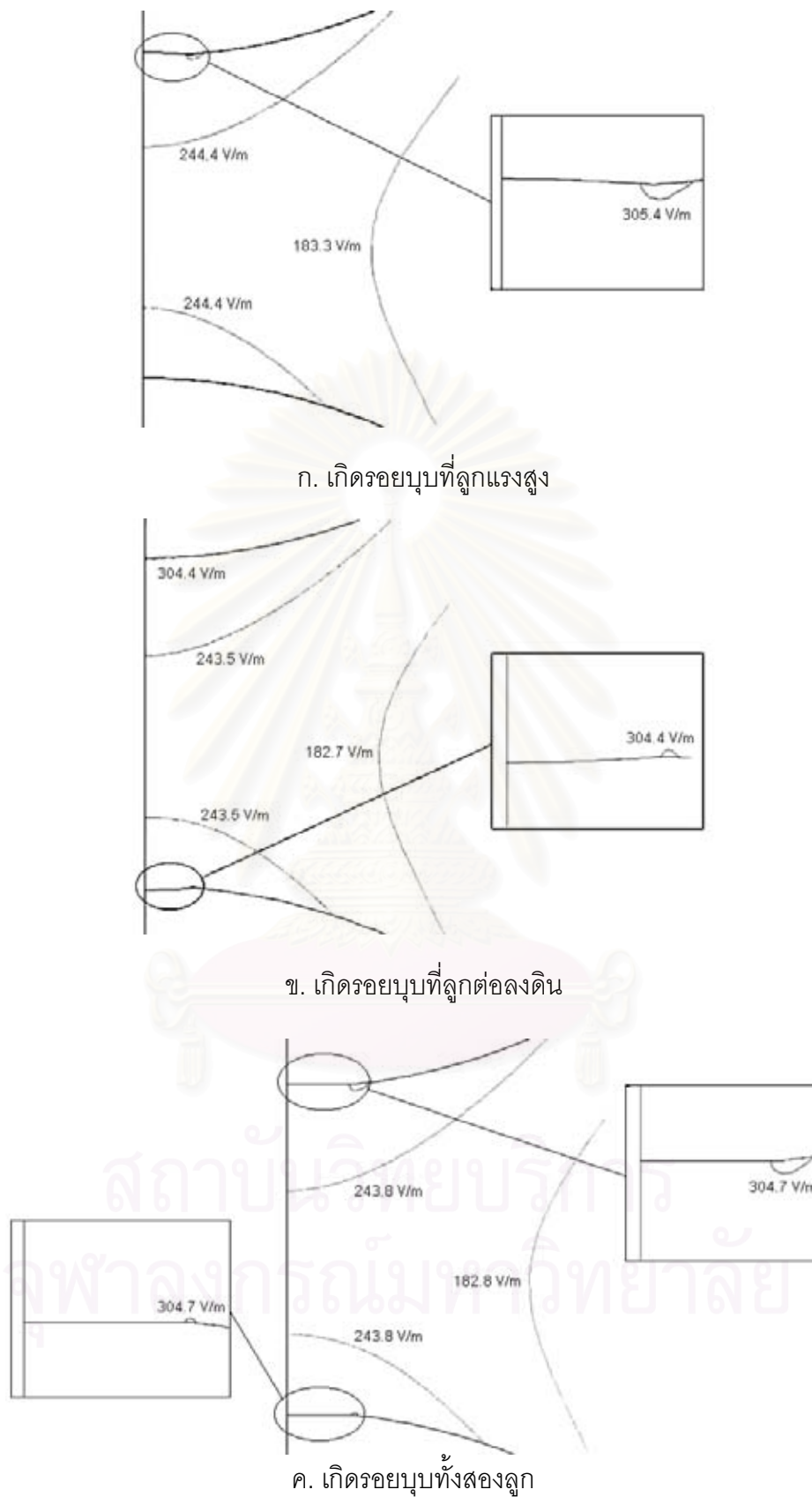
#### 4.1 แบบจำลองกลุ่มที่ 1 วิเคราะห์ทรงกลม

##### 4.1.1 วิเคราะห์การเกิดรอยบอบบนทรงกลม

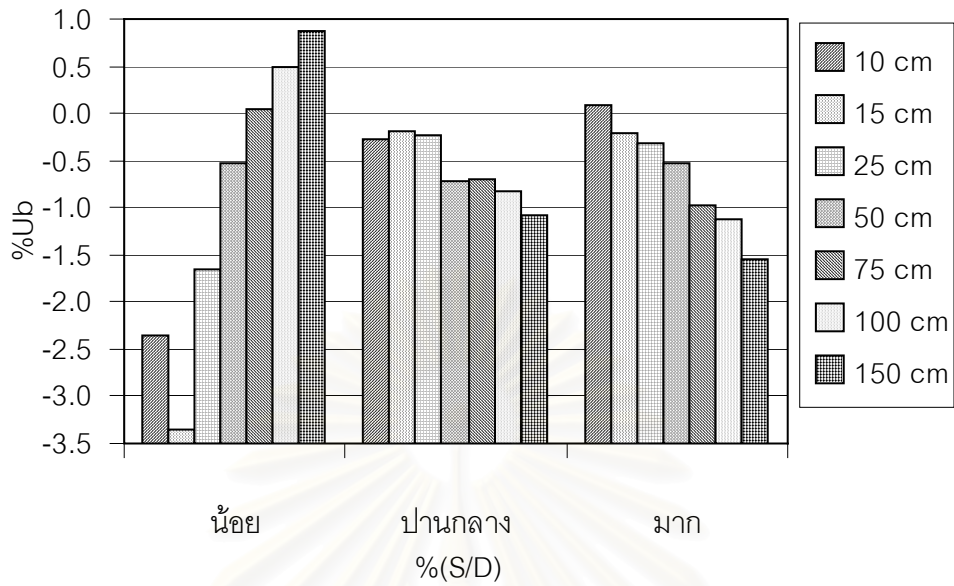
##### 4.1.1.1 ผลการจำลอง

ตารางที่ 4.1 แรงดันเบรกดาวนตามแนวที่แสดงในรูปที่ 3.6 ของทรงกลม 150 เซนติเมตร ที่ระยะห่าง 5, 40 และ 75 เซนติเมตร เมื่อเกิดรอยบอบขนาด 0.2% บนทรงกลมทั้ง 3 กรณี

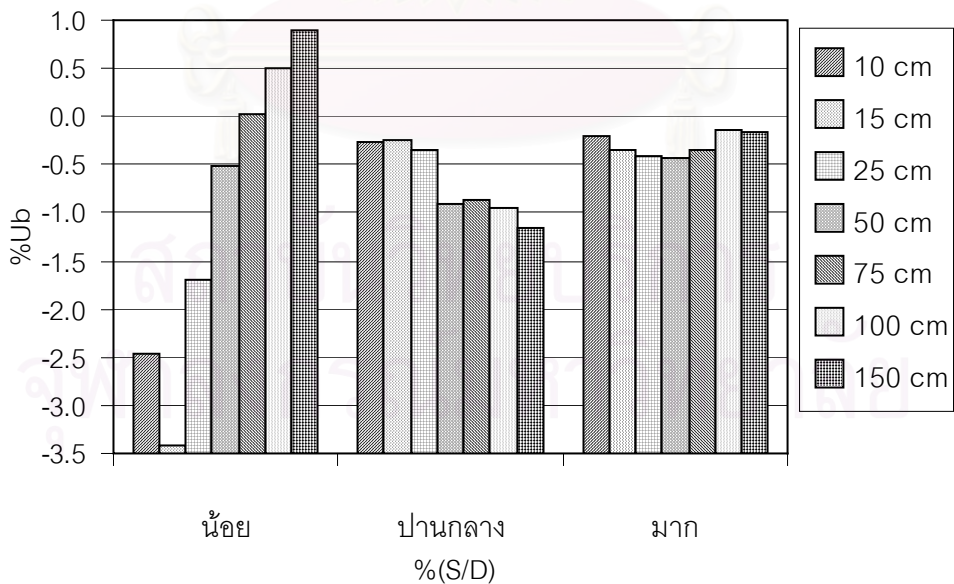
ระยะห่าง (cm.)	แรงดันเบรกดาวนทรงกลมมาตรฐานจากการคำนวณ (kV.)	แนวเส้นตรงที่เก็บข้อมูลความเครียดสนามไฟฟ้า	แรงดันเบรกดาวนเมื่อเกิดรอยบอบบนทรงกลม		
			ลูกแรงสูง(kV)	ลูกต่อดิน(kV)	ทั้งสองลูก(kV)
5	136.945	1	138.803	138.820	-
		2	136.487	136.514	-
		3	138.777	138.772	-
		4	-	-	137.004
		5	-	-	136.791
40	946.851	1	966.629	952.364	-
		2	945.588	943.841	-
		3	946.141	945.953	-
		4	-	-	971.366
		5	-	-	945.953
75	1436.722	1	1479.386	1435.840	-
		2	1432.079	1435.792	-
		3	1431.679	1437.242	-
		4	-	-	1473.244
		5	-	-	1429.753



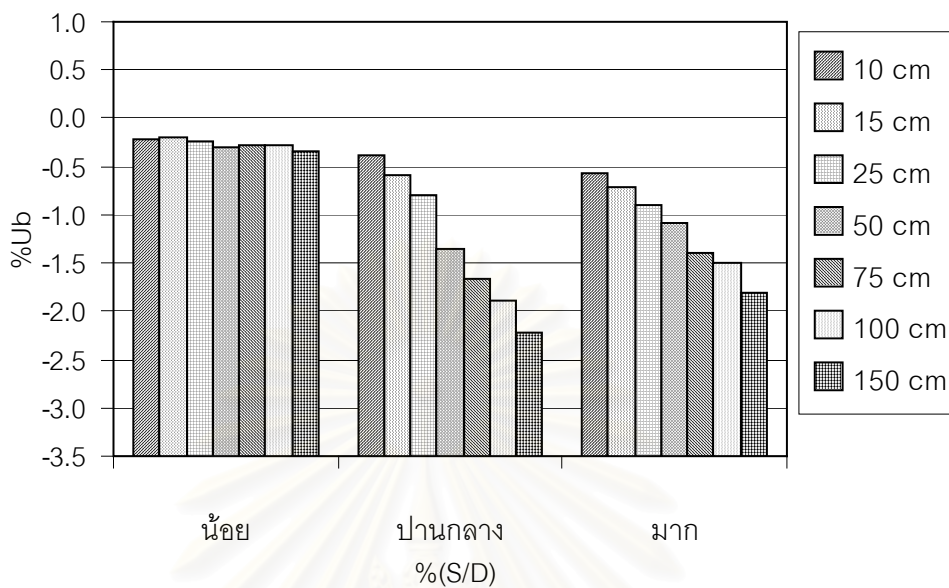
รูปที่ 4.1 รูปแสดงเส้นสนามไฟฟ้าเท่าในกรณีที่เกิดรอยบุบขนาด 0.6% กับทรงกลมลูกแรงสูง, ลูกต่อลงดิน และทั้งสองลูก,  $D = 150$  เซนติเมตร และ  $S = 40$  เซนติเมตร



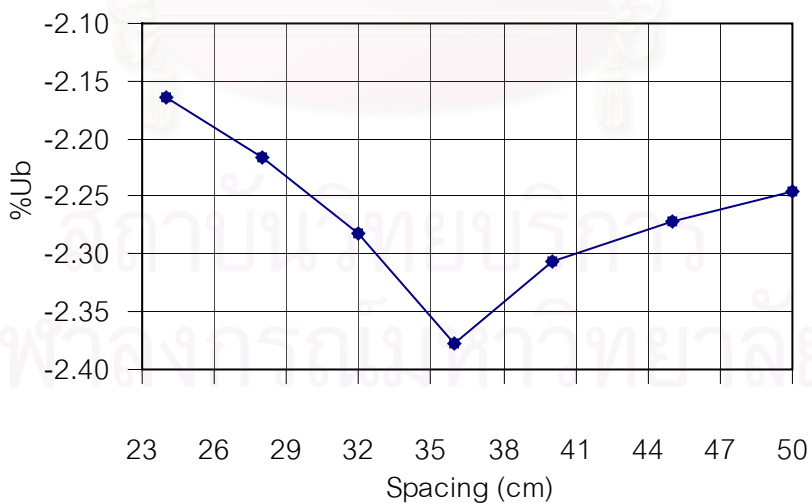
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน $\%U_b$ ที่เทียบกับการคำนวณ  
ของทรงกลมที่มีรอยบุบขนาด0.6%บนทรงกลมลูกแรงสูง



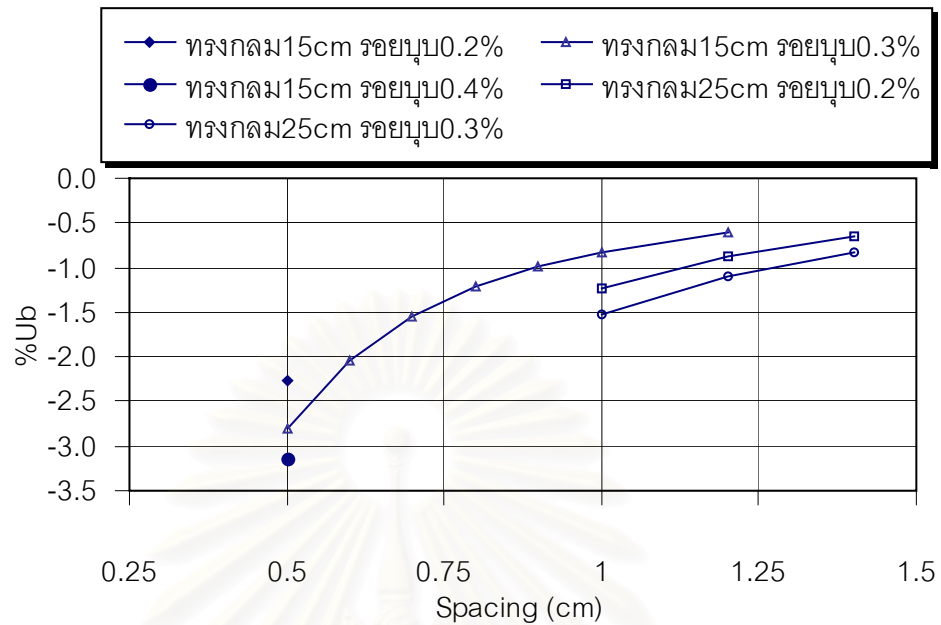
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน $\%U_b$ ที่เทียบกับการคำนวณ  
ของทรงกลมที่มีรอยบุบขนาด0.6%บนทรงกลมลูกต่อลงดิน



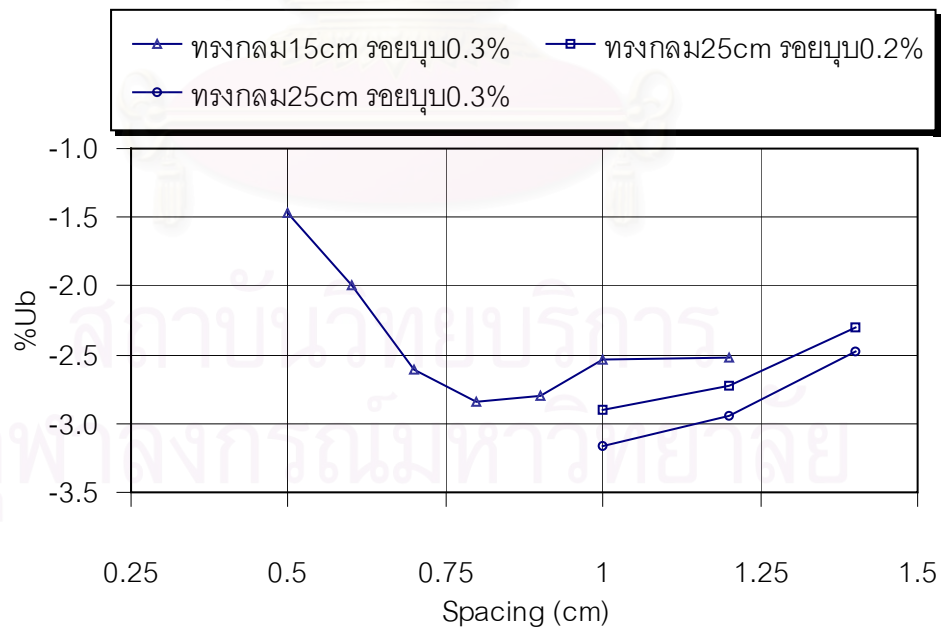
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน%Ubที่เทียบกับการคำนวณของทรงกลมที่มีรอยบุบขนาด0.6%บนทรงกลมทั้งสองลูก



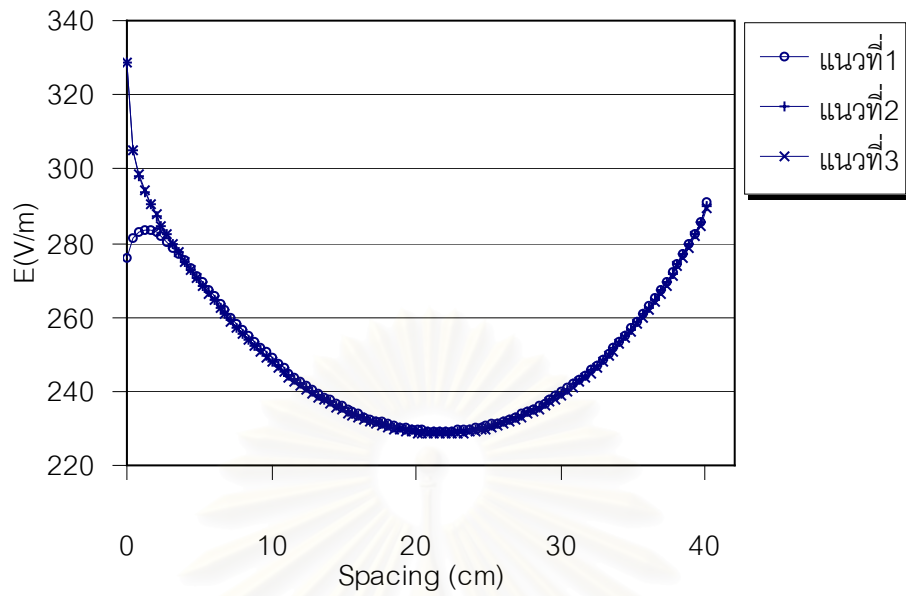
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน%Ubที่เทียบกับการคำนวณของทรงกลม150cm มีรอยบุบขนาด0.6%บนทรงกลมทั้งสองลูก



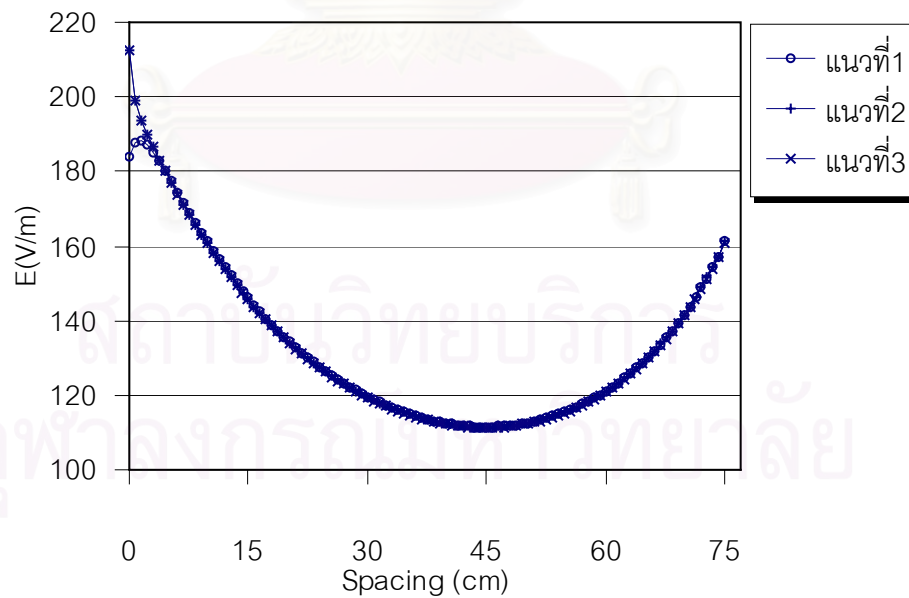
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน%Ubที่เทียบกับการคำนวณของทรงกลม 15 และ 25 cm ที่มีรอยบุบขนาดต่างๆบนทรงกลมลูกต่อลงดิน



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน%Ubที่เทียบกับ IEC52 ของทรงกลม 15 และ 25 cm ที่มีรอยบุบขนาดต่างๆบนทรงกลมลูกต่อลงดิน

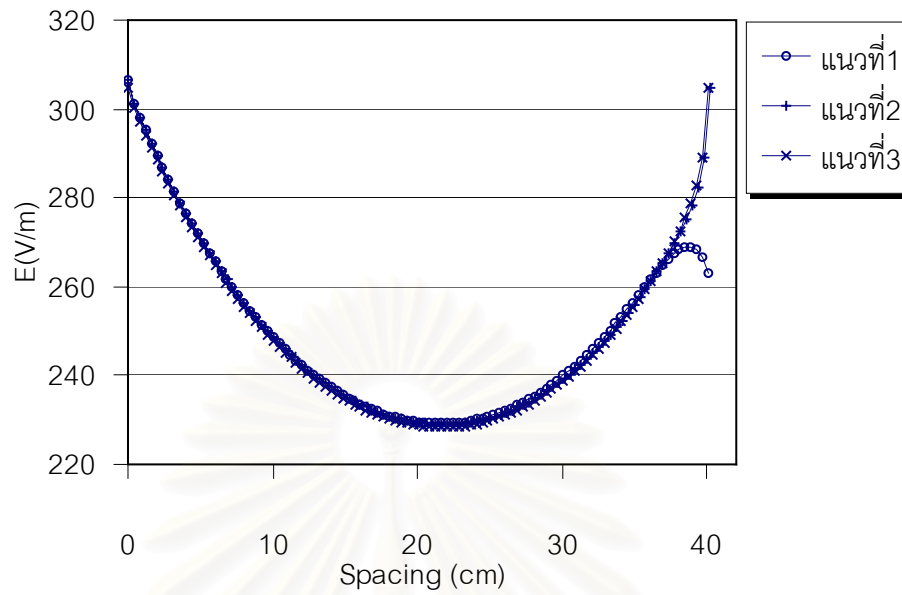


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวต่างๆในรูปที่ 3.6. ของทรงกลมที่มีรอยบุบขนาด 0.2% บนลูกแรงสูง,  $D = 150$  เซนติเมตร และ  $S = 40$  เซนติเมตร

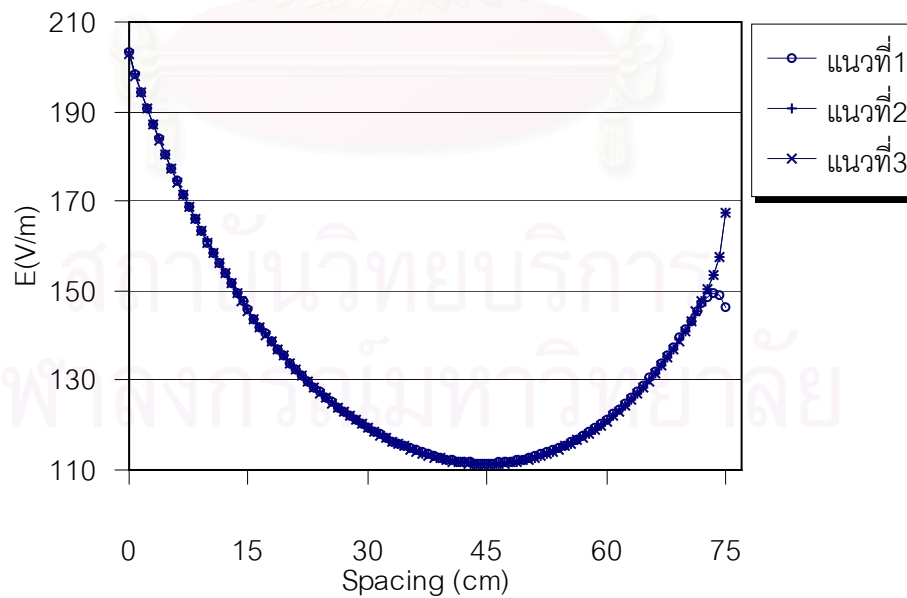


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวต่างๆในรูปที่ 3.6. ของทรงกลมที่มีรอยบุบขนาด 0.2% บนลูกแรงสูง,  $D = 150$  เซนติเมตร และ  $S = 75$  เซนติเมตร

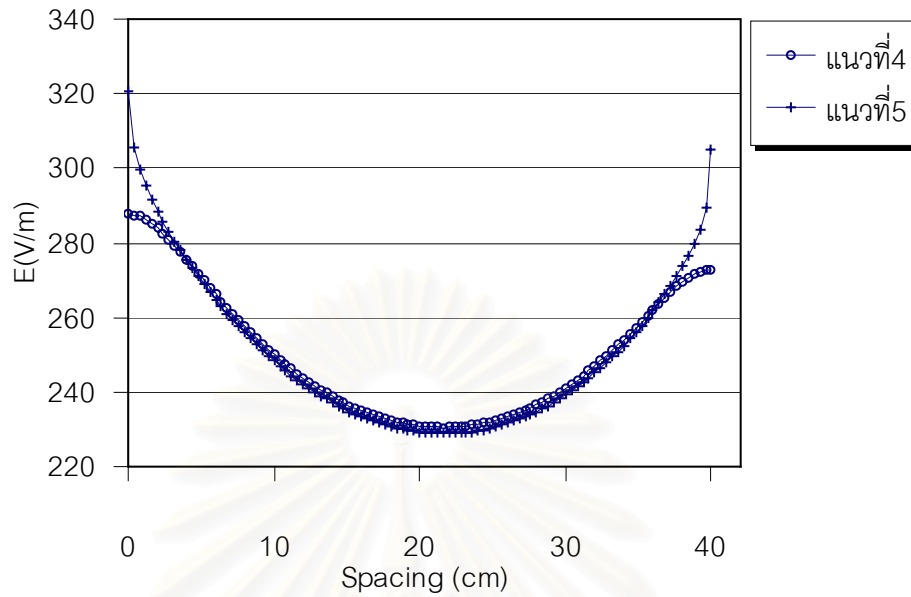




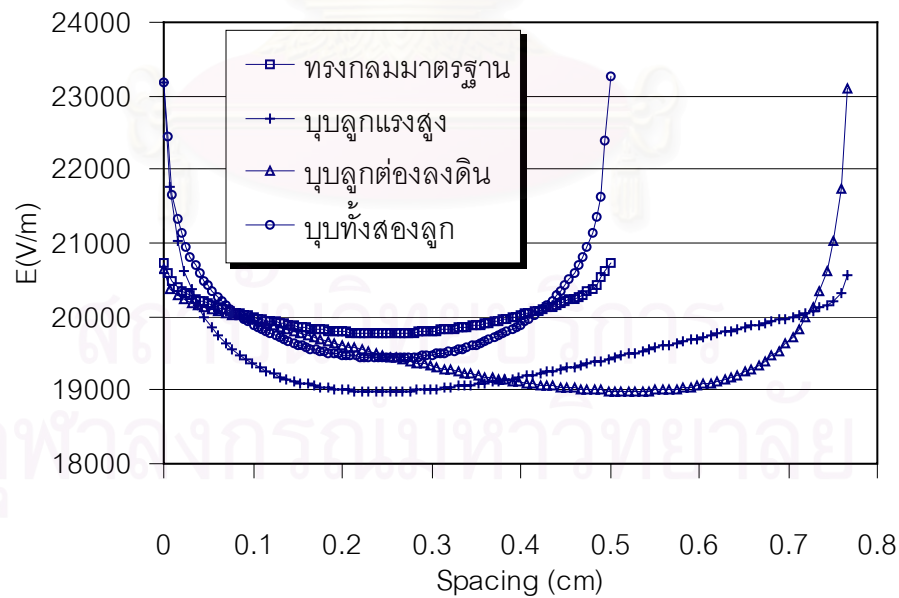
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวต่างๆในรูปที่ 3.6ก. ของทรงกลมที่มีรอยบุบขนาด 0.2% บนลูกต่อลงดิน,  $D = 150$  เซนติเมตร และ  $S = 40$  เซนติเมตร



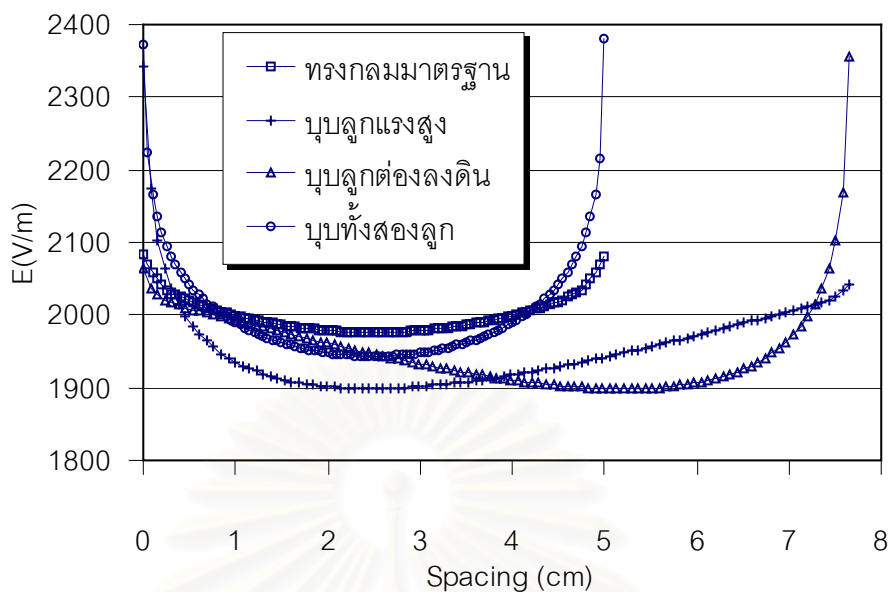
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวต่างๆในรูปที่ 3.6ก. ของทรงกลมที่มีรอยบุบขนาด 0.2% บนลูกต่อลงดิน,  $D = 150$  เซนติเมตร และ  $S = 75$  เซนติเมตร



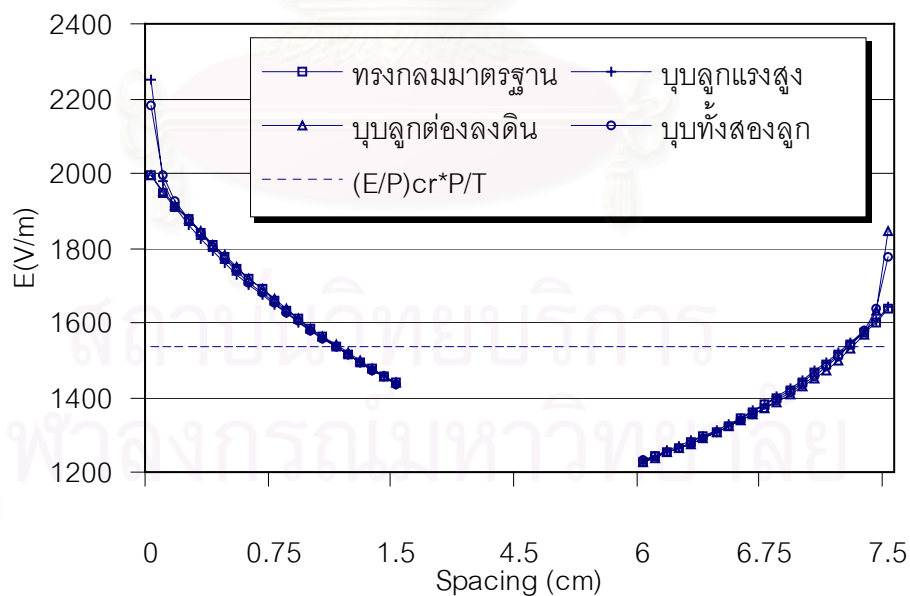
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวต่างๆในรูปที่ 3.6 ของทรงกลมที่มีรอยบุบขนาด 0.2% บนทั้งสองลูก,  $D = 150$  เซนติเมตร และ  $S = 40$  เซนติเมตร



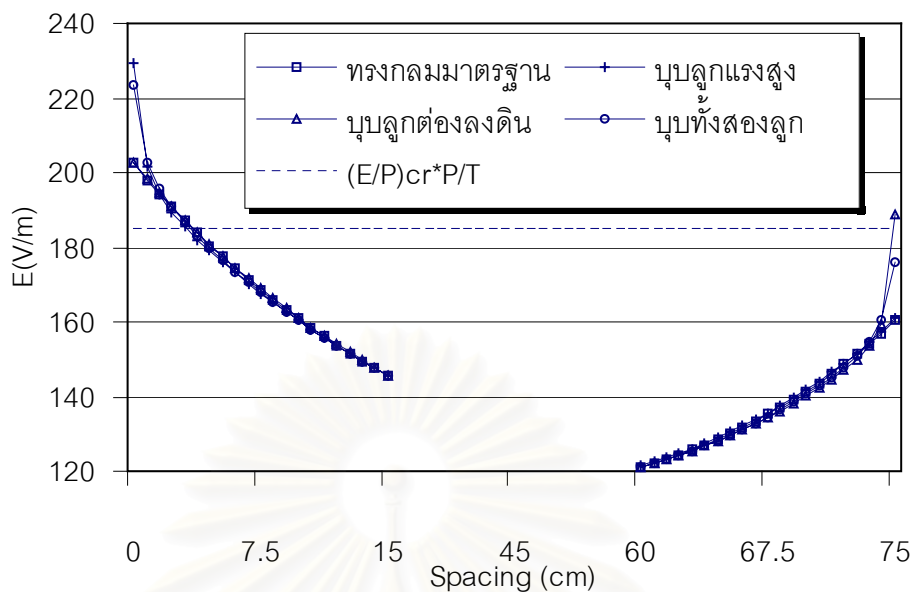
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าของทรงกลมที่มีรอยบุบขนาด 0.6% บนทรงกลมลูกต่างๆ,  $D = 15$  เซนติเมตร และ  $S = 0.5$  เซนติเมตร



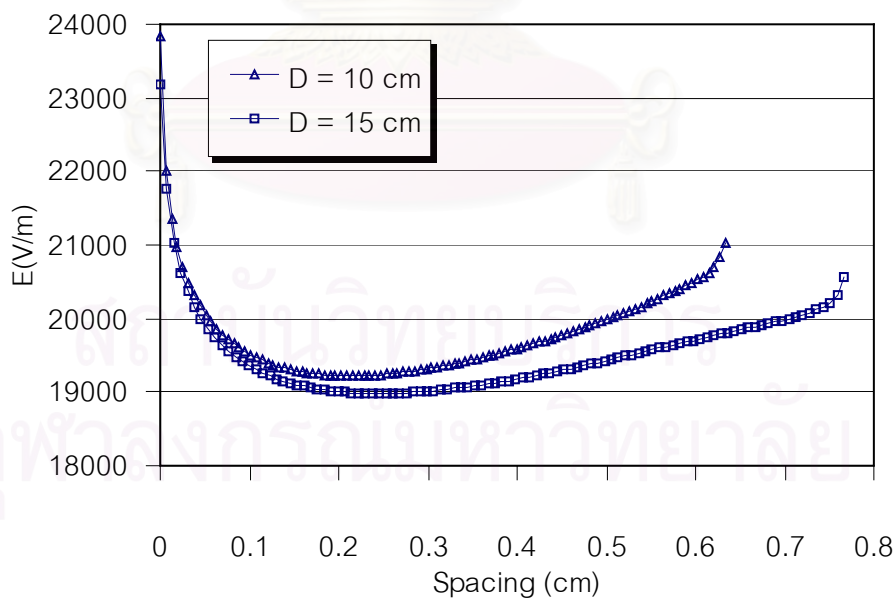
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าของทรงกลมที่มีรอยบุบขนาด 0.6% บนทรงกลมลูกต่างๆ,  $D = 150$  เซนติเมตร และ  $S = 5$  เซนติเมตร



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าของทรงกลมที่มีรอยบุบขนาด 0.6% บนทรงกลมลูกต่างๆ,  $D = 15$  เซนติเมตร และ  $S = 7.5$  เซนติเมตร



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าของทรงกลมที่มีรอยนูนขนาด 0.6% บนทรงกลมลูกต่างๆ, D = 150 เซนติเมตร และ S = 75 เซนติเมตร



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าของทรงกลมขนาด 10 และ 15 เซนติเมตรที่มีรอยนูนขนาด 0.6% บนทรงกลมลูกแรงสูง, S = 5 เซนติเมตร

#### 4.1.1.2 วิเคราะห์ผลการจำลอง

การเกิดรอยบุบบนทรงกลมจะมีลักษณะรอยบุบเป็น 2 ลักษณะ คือ เกิดรอยบุบลูกโดดลูกหนึ่งดังรูปที่ 3.4 และเกิดรอยบุบบนทรงกลมทั้งสองลูกดังรูปที่ 3.5 แนวที่จะเกิดเบรกดาวนจะต้องเป็นแนวที่หาค่าแรงดันเบรกดาวนได้น้อยที่สุด จากตารางที่ 4.1 ที่แสดงค่าแรงดันเบรกดาวนตามแนวต่างๆ ในรูปที่ 3.6ก และ 3.6ข สำหรับทรงกลม 150 เซนติเมตรที่เกิดรอยบุบลูกโดดลูกหนึ่ง จะเห็นได้ว่าที่ระยะห่าง (%S/D) ที่น้อยที่สุดกับที่ %S/D ปานกลาง ประมาณ 25% ค่าแรงดันเบรกดาวนที่คำนวณได้ตามแนวที่ 1 จะมีค่ามากที่สุด เพราะตั้งแต่ที่ %S/D ปานกลางลงมาการกระจายของสนามไฟฟ้าอยู่ในสภาวะที่ 1 หรือ ไม่ก็ 2 ดูจากบทที่ 2 ซึ่งบริเวณที่นำมาใช้ในการอินทิเกรตในสมการที่ (2.1.3) เพื่อหาแรงดันเบรกดาวนจะรวมไปถึงบริเวณทางด้านทรงกลมที่ต่อลงดินด้วย และจากรูปที่ 4.1ก, 4.1ข, 4.8 และ 4.10 ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณขอบของรอยบุบจะสูงกว่าบริเวณกันของรอยบุบทั้งกรณีบุบลูกแรงสูงและบุบลูกต่อลงดินกับความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณลูกทรงกลมปกติอีกลูกหนึ่งจะมีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 3 แนว ดังนั้นทั้งกรณีเกิดรอยบุบลูกแรงสูงและกรณีเกิดรอยบุบลูกต่อลงดินแรงดันเบรกดาวนที่คำนวณได้ตามแนวที่ 1 จึงมีค่ามากที่สุด และค่าแรงดันเบรกดาวนที่คำนวณได้ตามแนวที่สองจะมีค่าน้อยที่สุด เพราะการเกิดรอยบุบลูกโดดลูกหนึ่ง ทั้งสองกรณีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ห่างจากรอยบุบตามแนวที่ระยะน้อยกว่า 4 เซนติเมตรตามแนวที่ 2 จะน้อยกว่าแนวที่ 3 เล็กน้อย ส่วนระยะที่ไกลออกไปค่าความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวที่ 2 จะมากกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวที่ 3 โดยค่าความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวที่ 2 จะมากกว่าแนวที่ 3 ยิ่งขึ้นเมื่อระยะห่างมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.8 เนื่องจากประมาณ 90% ของระยะห่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในแนวที่ 2 มากกว่าแนวที่ 3 ดังนั้นค่าแรงดันเบรกดาวนของแนวที่ 2 จึงน้อยกว่าแนวที่ 3 สำหรับกรณีที่เกิดรอยบุบลูกโดดลูกหนึ่งและมีระยะห่างมากๆ การกระจายของความเครียดสนามไฟฟ้าจะอยู่ในสภาวะที่ 3 ซึ่งบริเวณที่ใช้ในการอินทิเกรตในสมการที่ (2.1.3) เพื่อหาแรงดันเบรกดาวนจะคิดเฉพาะบริเวณใกล้ทรงกลมลูกแรงสูงเท่านั้น ดังนั้นจึงมีแต่เกิดรอยบุบที่ลูกแรงสูงที่จะพิจารณาถึงผลของความเครียดสนามไฟฟ้าที่ขอบและกันของรอยบุบ ส่วนกรณีเกิดรอยบุบที่ลูกต่อลงดิน บริเวณที่เกิดรอยบุบไม่ถูกนำมาพิจารณา จากตารางที่ 4.1 ที่ระยะห่าง 75 เซนติเมตร จะเห็นได้ว่ากรณีเกิดรอยบุบลูกแรงสูง แรงดันเบรกดาวนตามแนวที่ 1 จะมีค่ามากที่สุดด้วยเหตุผลเดียวกับที่ระยะห่างน้อยๆ และแรงดันเบรกดาวนตามแนวที่ 2 จะมากกว่าแรงดันเบรกดาวนตามแนวที่ 3 เล็กน้อยซึ่งผิดกับที่ระยะห่างน้อยๆ เพราะว่าที่บริเวณใกล้ๆ ลูกแรงสูงค่าความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวที่ 2 น้อยกว่าแนวที่ 3 ดังรูปที่ 4.9 และเป็นบริเวณที่ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงที่สุดซึ่งมีผลต่อแรงดันเบรกดาวนมากที่สุดด้วย กรณีเกิดรอยบุบบนลูกต่อลงดินที่ระยะห่างมากๆ จากตารางที่ 4.1 แรงดันเบรกดาวนจากแนวที่ 1 จะมากกว่าแนวที่ 2 เล็กน้อยเพราะ

ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณใกล้จุดเกิดประกายไฟของลูกแรงสูงตามแนวที่1จะน้อยกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวที่2ดังรูปที่4.11 ส่วนแรงดันเบรกดาว์นจากแนวที่3ซึ่งไม่ได้เริ่มจากจุดเกิดประกายไฟ ทำให้มีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าน้อยที่สุด ค่าแรงดันเบรกดาว์นตามแนวที่3จึงมากที่สุด จากที่กล่าวมาทั้งหมดสรุปได้ว่าที่ระยะห่างน้อยๆ( $%S/D < 25%$ )จะใช้แนวที่สองหาแรงดันเบรกดาว์นกรณีบับลูกใดลูกหนึ่งทั้งสองกรณี ส่วนที่ระยะห่างมากๆจะใช้แนวที่3หาแรงดันเบรกดาว์นกรณีบับลูกแรงสูง และแนวที่2หาแรงดันเบรกดาว์นกรณีบับลูกต่อลงดินต่อไป

จากตารางที่4.1ในกรณีเกิดรอยบับทั้งสองลูกที่ตลอดช่วงระยะห่างค่าแรงดันเบรกดาว์นตามแนวที่4จะมากกว่าแนวที่5อย่างเห็นได้ชัด เพราะการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่จะศูนย์กลางของรอยบับมีค่าน้อยกว่าบริเวณขอบรอยบับทั้งสองลูกดังรูปที่4.12 ดังนั้นแรงดันเบรกดาว์นจากแนวที่5จึงเป็นค่าที่น้อยที่สุดและจะใช้เป็นแนวที่ใช้หาค่าแรงดันเบรกดาว์นกรณีทรงกลมทั้งสองลูกต่อไป

การเกิดรอยบับทั้ง 3 กรณี คือ ลูกแรงสูง, ลูกต่อลงดินและทั้งสองลูก กับทรงกลมขนาดต่างๆ จะต้องพิจารณาการเกิดเบรกดาว์นที่ระยะห่างตลอดช่วงที่ใช้งานคือระหว่าง $%S/D$ เท่ากับ 0.05 ถึง 50% โดยได้ผลการจำลองดังรูปที่ 4.2 ถึง 4.4 ซึ่งแสดงผลของรอยบับขนาด0.6%บนทรงกลมต่างๆ การวิเคราะห์ $%U_b$ ต่อจากนี้จะใช้ $%U_b$ ที่เทียบกับแรงดันเบรกดาว์นกรณีทรงกลมมาตรฐานที่ได้จากการคำนวณเช่นเดียวกันเป็นหลักเพราะเป็นการอ้างอิงค่าจากการคำนวณเช่นเดียวกัน

กรณีทีหนึ่ง การเกิดรอยบับบนลูกแรงสูง จากรูปที่ 4.2 ค่า $%U_b$ ที่ $%S/D$ ค่าน้อยๆจะเพิ่มขึ้นเมื่อทรงกลมขนาดใหญ่ขึ้น และค่า $%U_b$ ที่ $%S/D$ มากๆจะมีค่าลดลงเมื่อทรงกลมขนาดใหญ่ขึ้นเป็นเพราะว่าที่ $%S/D$ น้อยๆแนวข้อมูลความเครียดสนามไฟฟ้าที่ใช้หาค่าแรงดันเบรกดาว์นกรณีทรงกลมบับลูกแรงสูง(แนวที่2)จะยาวกว่ากรณีทรงกลมปกติอย่างมากดังแสดงในรูปที่4.13 กรณีบับลูกแรงสูงของทรงกลมขนาด 15 เซนติเมตร แนวข้อมูลความเครียดสนามไฟฟ้าที่ใช้จะยาว 0.77เซนติเมตร และมีความเครียดสนามไฟฟ้าที่รอยบับสูงประมาณ 23,200 V/m ส่วนกรณีทรงกลมมาตรฐานจะยาว 0.5 เซนติเมตร มีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าด้านแรงสูงประมาณ 20,700 V/m ผลของค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่มากกว่าและแนวข้อมูลความเครียดสนามไฟฟ้ายาวกว่ากรณีบับลูกแรงสูงทำให้ที่ทรงกลม 15 เซนติเมตรนี้ค่าแรงดันเบรกดาว์นกรณีบับลูกแรงสูงมีค่าน้อยกว่ากรณีทรงกลมมาตรฐาน ส่วนที่ทรงกลมลูกใหญ่ดังในรูปที่ 4.14 ทรงกลม 150 เซนติเมตร มีเพียงค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่มีค่าลดลงประมาณ10เท่าและระยะห่างเพิ่มขึ้น10เท่า แต่ค่าแรงดันเบรกดาว์นของกรณีบับลูกแรงสูงกลับมีค่ามากกว่าที่ทรงกลมมาตรฐาน สามารถอธิบายได้จากสมการที่(2.2.11)เมื่อได้ค่า $E_n$ ลดลง10เท่าทำให้ผลต่างของความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณลูกแรง

สูงระหว่างมาตรฐานกับบัพลูกแรงสูงลดลง10เท่าด้วยและให้ค่า $B_n$ เพิ่มขึ้น10เท่า ค่าTกรณีบัพลูกแรงสูงที่คำนวณได้จะมีค่ามากขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับการเพิ่มขึ้นของค่าTกรณีทรงกลมมาตรฐานเพราะค่า $E_n$ อยู่ในวงเล็บยกกำลังสองแต่ค่า $B_n$ ไม่ใช่ดังนั้นผลของการเพิ่มขึ้นของ $E_n$ จะมีผลต่อการกำหนดแรงดันเบรกดาวนมากกว่า $B_n$  จึงสรุปได้ว่าที่%S/Dน้อยๆเมื่อทรงกลมลูกใหญ่ขึ้น(ค่า $E_n$ ลดลง,  $B_n$ มากขึ้น) จะทำให้ค่า%Ubเพิ่มขึ้น ค่า%S/Dที่มาก ๆจะมีค่า%Ublดลงเมื่อทรงกลมมีขนาดใหญ่ขึ้นสังเกตจากรูปที่4.15 ทรงกลม 15 เซนติเมตรมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ใช้แบ่งพื้นที่ที่ใช้อินทิเกรตหาแรงดันเบรกดาวนประมาณ 1,535 V/m ดังนั้นจึงแสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าเฉพาะช่วงที่ใช้หาแรงดันเบรกดาวน คือ 0 ถึง 1.5 เซนติเมตร หรือ 20 เปอร์เซ็นต์ของระยะห่าง และ7.3ถึง7.5 เซนติเมตร จากรูปค่าความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณรอบบัพด้านแรงสูงจะสูงกว่ากรณีทรงกลมมาตรฐานในช่วงเปอร์เซ็นต์ของระยะห่างน้อยๆ โดยในช่วงนี้จะสั้นกว่าที่%S/Dน้อยๆ และตั้งแต่ที่ระยะห่างจากรอยบัพ 0.15 เซนติเมตรขึ้นไปค่าความเครียดสนามไฟฟ้ากรณีรอยบัพลูกแรงสูงจะน้อยกว่ากรณีทรงกลมมาตรฐานตลอด ส่วนที่ทรงกลมขนาดใหญ่ขึ้นดังรูปที่ 4.16 ทรงกลม 150 เซนติเมตรมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ใช้แบ่งพื้นที่ที่ใช้อินทิเกรตหาแรงดันเบรกดาวนประมาณ 185 V/m ดังนั้นช่วงที่ใช้หาแรงดันเบรกดาวน คือ 0 ถึง 3 เซนติเมตร หรือ 4 เปอร์เซ็นต์ของระยะห่าง ซึ่งเป็นบริเวณที่น้อยกว่าของทรงกลม 15 เซนติเมตรมากเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของระยะห่าง และจากที่ว่าบริเวณใกล้รอยบัพความเครียดสนามไฟฟ้าของกรณีรอยบัพลูกแรงสูงจะมากกว่ากรณีทรงกลมปกติ และเมื่อไกลออกไปความเครียดสนามไฟฟ้าจะน้อยกว่ากรณีทรงกลมมาตรฐาน ทำให้%Ubของทรงกลมลูกใหญ่ซึ่งใช้บริเวณในการอินทิเกรตหาแรงดันเบรกดาวนน้อยกว่าทรงกลมลูกเล็กมีคาลดลง(เนื่องจากบริเวณที่ความเครียดสนามไฟฟ้าของกรณีรอยบัพน้อยกว่ากรณีทรงกลมมาตรฐานลดลง) ส่วนบริเวณใกล้ทรงกลมต่อลงดินความเครียดสนามไฟฟ้ากรณีรอยบัพลูกแรงสูงจะมากกว่ากรณีทรงกลมมาตรฐานเพียงเล็กน้อยและเป็นบริเวณที่เล็กมากเมื่อเทียบกับบริเวณด้านแรงสูงจึงไม่นำมาพิจารณา

กรณีที่สอง การเกิดรอยบัพบนลูกต่อลงดิน ที่%S/Dค่าน้อยๆ จากรูปที่4.3ค่า%Ubจะเพิ่มขึ้นเมื่อทรงกลมมีขนาดใหญ่ขึ้นด้วยเหตุผลเดียวกับการเกิดรอยบัพที่ลูกแรงสูงเพราะที่%S/Dน้อยๆจะมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าค่อนข้างสม่ำเสมอทำให้ต้องใช้ในการอินทิเกรตตลอดช่วงระยะห่างดังในสภาวะที่1 และกราฟแสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าในรูปที่ 4.13 และ4.14 ของกรณีรอยบัพที่ลูกต่อลงดินมีลักษณะเหมือนกรณีรอยบัพที่ลูกแรงสูงเพียงแต่กลับด้านกัน ในรูปที่4.13มีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณที่ใกล้รอยบัพจะน้อยกว่าบริเวณเดียวกันของกรณีบัพลูกแรงสูงเล็กน้อย แต่ทั้งสองกรณีที่ระยะห่างตั้งแต่ 0.21 เซนติเมตร จากรอยบัพไปจนถึงจุดเกิดประกายไฟของทรงกลมมาตรฐาน(ยาว0.56เซนติเมตร)ความเครียดสนามไฟฟ้ากรณีบัพลูกต่อลงดินจะมากกว่าเล็กน้อย เนื่องจากบริเวณส่วนใหญ่ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของกรณีบัพ

ลูกต่อลงดินมากกว่ากรณีบอลลูนแรงสูง ดังนั้น  $%U_b$  ของกรณีบอลลูนต่อลงดินจึงมีค่าน้อยกว่า ส่วนที่  $%S/D$  มาก ๆ  $%U_b$  ของทรงกลมทุกขนาดมีค่าใกล้เคียงกันเพราะค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการหาแรงดันเบรกดาวาร์น์จะใช้เฉพาะด้านแรงสูงเป็นส่วนสำคัญดังสภาวะที่ 3 ดังนั้นค่าความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณรอยบุนด้านต่อลงดินจึงไม่มีผลต่อการคำนวณแรงดันเบรกดาวาร์น์ ส่วนค่าความเครียดสนามไฟฟ้าด้านแรงสูงก็จะมีลักษณะใกล้เคียงกันเนื่องจากเป็นทรงกลมมาตรฐานเหมือนกัน

กรณีที่สาม การเกิดรอยบุนบนทรงกลมทั้งสองลูก จากรูปที่ 4.4 ที่  $%S/D$  เท่าๆกัน ทรงกลมลูกใหญ่มีค่า  $%U_b$  น้อยกว่าทรงกลมลูกเล็กๆ จากรูปที่ 4.13 ทรงกลมขนาด 15 เซนติเมตรที่  $%S/D$  น้อยๆ (สภาวะที่ 1) เมื่อเปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้ากรณีทรงกลมบุนทั้งสองลูกในบริเวณใกล้ขอบรอยบุนจะมีค่าสูงกว่าที่ทรงกลมมาตรฐานมากและความเครียดสนามไฟฟ้าช่วงบริเวณกึ่งกลางระหว่างทรงกลมจะมีค่าน้อยกว่า และจากรูปที่ 4.14 ที่ทรงกลม 150 เซนติเมตรเมื่อเกิดรอยบุนทั้งสองลูกความเครียดสนามไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นจากกรณีทรงกลมมาตรฐานในอัตราส่วนมากกว่าที่ทรงกลม 15 เซนติเมตร ในรูปที่ 4.13 เล็กน้อย ดังนั้นค่า  $%U_b$  ที่  $%S/D$  เท่ากันของทรงกลมขนาดใหญ่จึงมีค่าน้อยกว่าทรงกลมขนาดเล็ก ส่วนที่  $%S/D$  มากๆ (สภาวะที่ 3) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณใกล้ขอบรอยบุนก็จะสูงกว่าทรงกลมมาตรฐานแต่สูงกว่าเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับที่  $%S/D$  น้อยๆ และที่ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณกึ่งกลางก็เช่นเดียวกันจะน้อยกว่ากรณีทรงกลมมาตรฐานเพียงเล็กน้อยดังรูปที่ 4.15 แต่การหาแรงดันเบรกดาวาร์น์จะใช้แค่บริเวณใกล้ลูกแรงสูง ดังนั้น  $%U_b$  จึงน้อยกว่าที่  $%S/D$  น้อยๆ (สภาวะที่ 1) และพบว่าที่ค่า  $%S/D$  ปานกลาง (สภาวะที่ 2) จะใช้ความเครียดสนามไฟฟ้าเฉพาะพื้นที่บริเวณใกล้ทรงกลมทั้งสองลูกในการหาแรงดันเบรกดาวาร์น์ทำให้ไม่คิดผลของพื้นที่บริเวณกึ่งกลางระหว่างทรงกลมที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าของกรณีบุนทั้งสองลูกน้อยกว่าที่ทรงกลมมาตรฐาน ดังนั้น  $%U_b$  ที่สภาวะนี้มีค่าน้อยที่สุดได้จากรูปที่ 4.4 ที่ทรงกลม 50 ถึง 150 เซนติเมตรมีค่า  $%U_b$  กรณีรอยบุนทั้งสองลูกน้อยที่สุดที่ค่า  $%S/D$  ปานกลาง ส่วนที่ทรงกลมขนาด 10 ถึง 25 เซนติเมตรที่ระยะ  $%S/D$  สูงสุดก็ยังคงอยู่ในสภาวะที่ 2 ดังนั้นจึงมีค่า  $%U_b$  น้อยที่สุดที่  $%S/D$  สูงสุด

จากที่กล่าวมาทั้ง 3 กรณีจะกำหนดได้ว่าทรงกลมแต่ละขนาดมีค่า  $%U_b$  ที่เทียบกับการคำนวณน้อยที่สุดที่ระยะเท่าใดและเกิดรอยบุนแบบไหนดังนี้ เมื่อเปรียบเทียบ  $%U_b$  ทั้ง 3 กรณีในรูปที่ 4.2 ถึง 4.4 ทรงกลมขนาด 10, 15 และ 25 เซนติเมตร จะมี  $%U_b$  น้อยที่สุดเมื่อเกิดรอยบุนที่ลูกต่อลงดินและมี  $%S/D$  น้อยที่สุด โดยที่ทรงกลมขนาด 15 เซนติเมตร และมีระยะห่าง 0.5 เซนติเมตร มีค่า  $%U_b$  น้อยที่สุดคือ -3.411% เมื่อทรงกลมบุนขนาด 0.6% บนทรงกลมลูกต่อลงดินและน้อยกว่าที่ทรงกลม 10 เซนติเมตรที่ระยะห่าง 0.5 เซนติเมตรเท่ากัน เพราะระยะของแนวเส้นตรงที่เกิดเบรกดาวาร์น์ของทรงกลม 15 เซนติเมตรยาวกว่าของทรงกลม 10 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4.17



ทำให้มีบริเวณสร้างอิเล็กทรอนิกส์มากกว่า จึงมีโอกาสเกิดเบรกดาวน้ง่ายกว่า ถึงแม้จะมีความเครียดสนามไฟฟ้าน้อยกว่าแต่มีผลต่อแรงดันเบรกดาวน้งเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับบริเวณสร้างอิเล็กทรอนิกส์ที่มากขึ้น ทรงแกลมขนาด 50, 75, 100 และ 150 เซนติเมตร จะมีค่า%U<sub>b</sub>น้อยที่สุดเมื่อเกิดรอยบุบทั้งสองลูกที่%S/Dปานกลาง(สภาวะที่2) โดยที่ทรงแกลม 150 เซนติเมตร จะมีค่า%U<sub>b</sub>น้อยที่สุด จากรูปที่ 4.5 เมื่อพิจารณาทรงแกลม150เซนติเมตรที่%S/Dอยู่ในสภาวะที่2 จะได้ระยะห่าง 36 เซนติเมตร เป็นระยะที่ให้%U<sub>b</sub>น้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ -2.378 % เมื่อเปรียบเทียบค่า%U<sub>b</sub>ที่น้อยที่สุดระหว่างทรงแกลม15เซนติเมตรและทรงแกลม150เซนติเมตร จะพบว่าที่ทรงแกลม 15เซนติเมตร จะมีค่าน้อยที่สุด ดังนั้นจึงนำทรงแกลมนี้ที่ระยะห่าง 0.5 เซนติเมตรมาหาขนาดรอยบุบที่ใหญ่ที่สุดที่ยังสามารถใช้ค่าในตารางที่ข.2ได้ โดยใช้กรณีบุบลูกต่อลงดินเป็นหลักได้ผลการจำลองดังแสดงในรูปที่ 4.6 ค่า%U<sub>b</sub>ของทรงแกลม 15 เซนติเมตรที่มีรอยบุบขนาด0.3%ที่ระยะห่าง 0.5 เซนติเมตร จะมีค่าน้อยกว่าที่ระยะห่างอื่นๆซึ่งมีค่าเท่ากับ-2.814%ซึ่งยังอยู่ในขอบเขตที่สามารถใช้ค่าในตารางที่ข.2ได้(มากกว่า-3%) แต่ที่รอยบุบขนาด0.4%ที่ระยะห่าง 0.5 เซนติเมตร %U<sub>b</sub>มีค่าน้อยกว่า-3%ซึ่งไม่สามารถใช้ค่าในตารางที่ข.2ได้ ดังนั้นจึงได้ขอบเขตของขนาดรอยบุบเมื่อเทียบกับแรงดันเบรกดาวน้งจากการคำนวณเป็น 0.3%

การหาขอบเขตขนาดรอยบุบเมื่อเทียบกับแรงดันเบรกดาวน้งในมาตรฐานIEC52 จะเริ่มจากหาว่า%U<sub>b</sub>ของทรงแกลมขนาดใดและระยะห่างเท่าไรในรูปที่3.3มีค่า%U<sub>b</sub>ใกล้-3%ได้ผล ดังนี้ คือ ทรงแกลม10เซนติเมตรที่%S/Dระหว่าง7ถึง15%และมากกว่า40%, ทรงแกลม15เซนติเมตรที่%S/Dน้อยกว่า10% และทรงแกลม25เซนติเมตรที่%S/Dน้อยกว่า6% และสำหรับที่%U<sub>b</sub>ใกล้3% คือ ทรงแกลม150เซนติเมตร %S/Dอยู่ในช่วง10ถึง15% จากนั้นจึงเริ่มพิจารณาที่ทรงแกลม 15 เซนติเมตรก่อนเพราะเมื่อเกิดรอยบุบจะให้%U<sub>b</sub>น้อยที่สุดจากรูปที่4.6 จากรูปที่4.7เมื่อเกิดรอยบุบขนาด0.3% จะได้%U<sub>b</sub>ที่เทียบกับIEC52น้อยที่สุดที่ระยะห่าง 0.8 เซนติเมตร(%S/D=5.3%)เท่ากับ -2.836% ซึ่งยังอยู่ในขอบเขตใช้งานได้ แต่เมื่อเกิดรอยบุบขนาด0.3%บนทรงแกลม 25 เซนติเมตรพบว่า%U<sub>b</sub>น้อยที่สุดที่ระยะห่าง 1 เซนติเมตรมีค่าเท่ากับ -3.171% ไม่อยู่ในขอบเขตที่ใช้งานได้ ส่วนทรงแกลมขนาด10เซนติเมตรไม่ต้องพิจารณาเพราะช่วงที่%U<sub>b</sub>น้อยที่สุดอยู่ที่%S/Dมากกว่า 7%ซึ่ง%U<sub>b</sub>จะมีค่าน้อยที่สุดที่%S/Dน้อยที่สุดและทรงแกลม10เซนติเมตรมี%U<sub>b</sub>มากกว่าที่ทรงแกลมขนาด15เซนติเมตรอยู่แล้วดังนั้นถ้ากรณีทรงแกลม15เซนติเมตรยังอยู่ในขอบเขตเมื่อเกิดรอยบุบขนาด 0.3%กรณีทรงแกลม 10 เซนติเมตรก็ต้องอยู่ในขอบเขต และที่ทรงแกลม 150 เซนติเมตร ระยะห่าง 5 เซนติเมตร ที่รอยบุบขนาด0.3%ให้ค่า%U<sub>b</sub>เทียบกับการคำนวณเท่ากับ -0.145% ซึ่งเป็นค่าติดลบ ดังนั้นรอยบุบจึงไม่ทำให้%U<sub>b</sub>เพิ่มขึ้นไปถึงค่า3%ได้ จึงสรุปได้ว่าทรงแกลม 25 เซนติเมตรมีค่า%U<sub>b</sub>ที่เทียบกับIEC52น้อยที่สุดที่รอยบุบขนาดเท่ากัน จากนั้นจึงพิจารณาเฉพาะทรงแกลม

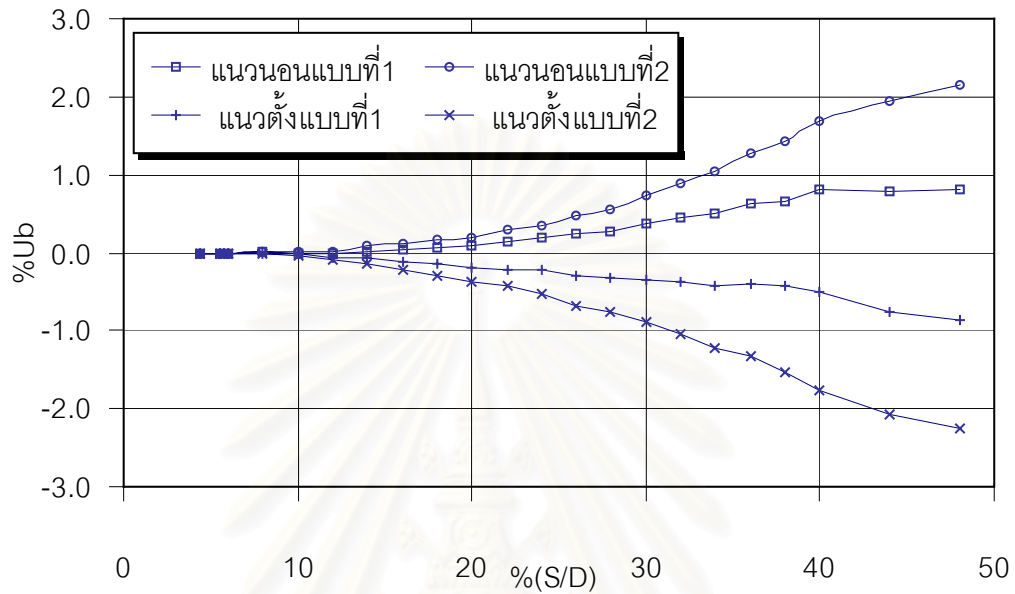
25 เซนติเมตร โดยลดขนาดรอยบุบเป็น 0.2% และได้ %U<sub>b</sub> น้อยที่สุดเท่ากับ -2.897% ซึ่งอยู่ในขอบเขตที่ใช้งานตารางที่ข.1 ได้ ดังนั้นขอบเขตของขนาดรอยบุบเมื่อเทียบกับมาตรฐาน IEC52 จึงเป็น 0.2%

#### 4.1.1.3 สรุปผลการจำลอง

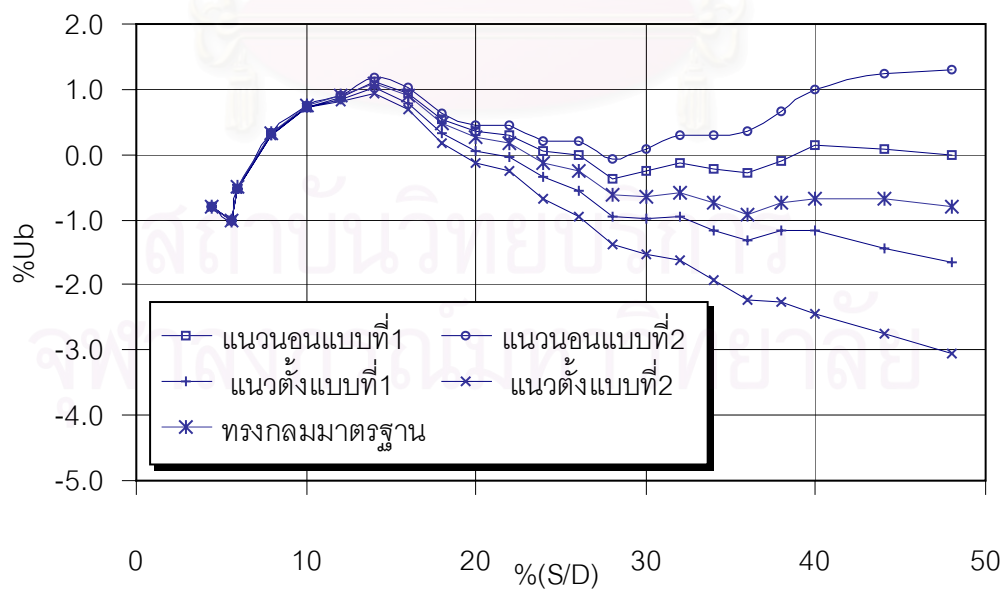
เมื่อนำทรงกลมทุกขนาดมาเปรียบเทียบกันจะได้ทรงกลมขนาด 15 เซนติเมตร เกิดรอยบุบที่ถูกต้องลงดินเป็นทรงกลมที่ให้ %U<sub>b</sub> ที่เทียบกับการคำนวณน้อยที่สุด จากการจำลองจะได้ขอบเขตของขนาดรอยบุบเมื่อเทียบกับแรงดันเบรกดาวร์จากการคำนวณมีค่าไม่เกิน 0.3% ของเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยมีทรงกลม 15 เซนติเมตร ระยะห่าง 0.5 เซนติเมตร เป็นกรณีที่ให้ %U<sub>b</sub> คลาดเคลื่อนมากที่สุดมีค่าเท่ากับ -2.814% และได้ขอบเขตของขนาดรอยบุบเมื่อเทียบกับแรงดันเบรกดาวร์จากตารางใน IEC52 มีค่าไม่เกิน 0.2% ของเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยมีทรงกลมขนาด 25 เซนติเมตร ระยะห่าง 1 เซนติเมตร เป็นกรณีที่ให้ %U<sub>b</sub> ผิดพลาดมากที่สุดมีค่าเท่ากับ -2.897%

#### 4.1.2 วิเคราะห์การผิดเพี้ยนจากทรงกลมไปเป็นทรงรี

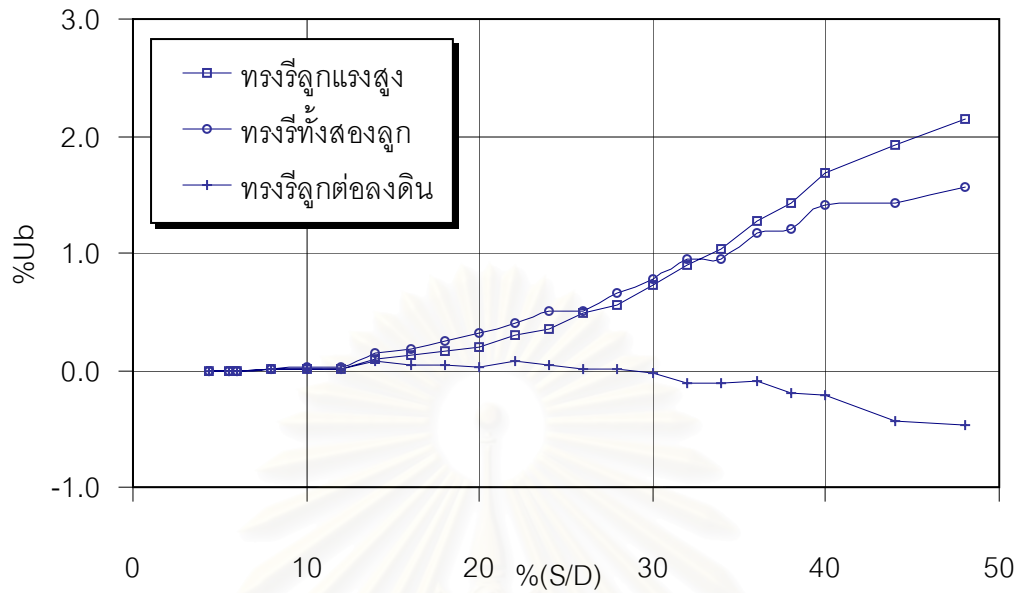
##### 4.1.2.1 ผลการจำลอง



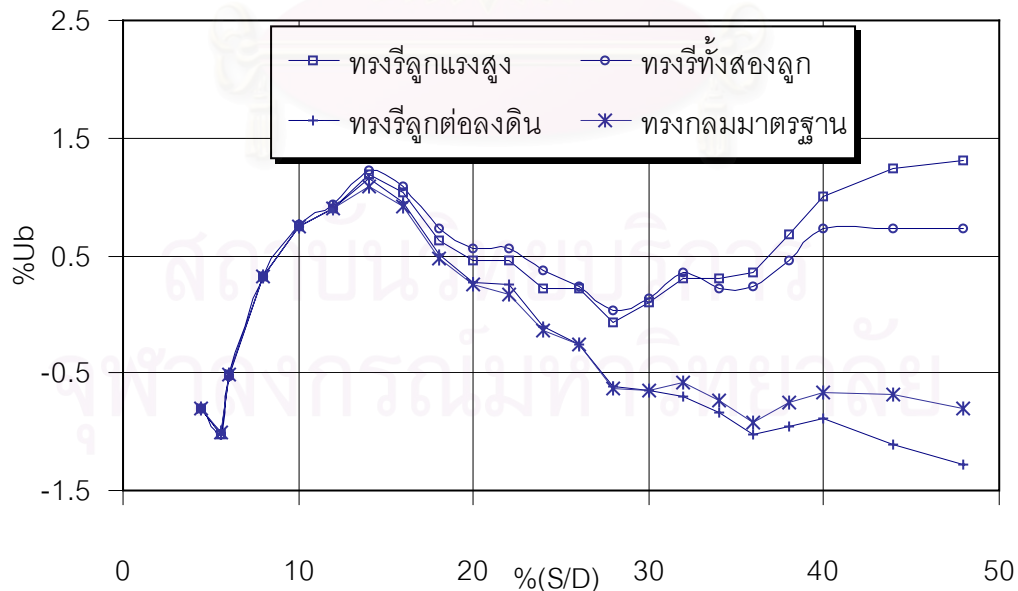
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน%U<sub>b</sub>ที่เทียบกับการคำนวณของทรงกลมที่รูปทรงผิดเพี้ยนเป็นทรงรีขนาด3% ทั้ง4ลักษณะดังรูปที่3.7 บนทรงกลมลูกแรงสูง, D = 50 เซนติเมตร



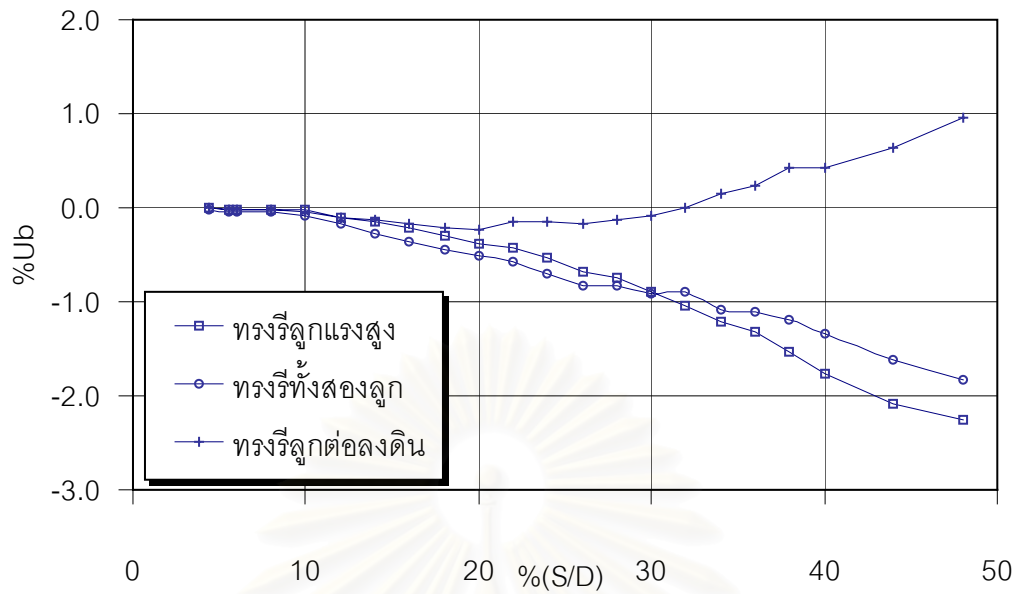
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน%U<sub>b</sub>ที่เทียบกับ IEC52 ของทรงกลมที่รูปทรงผิดเพี้ยนเป็นทรงรีขนาด3%ทั้ง4ลักษณะดังรูปที่3.7 บนทรงกลมลูกแรงสูง, D = 50 เซนติเมตร



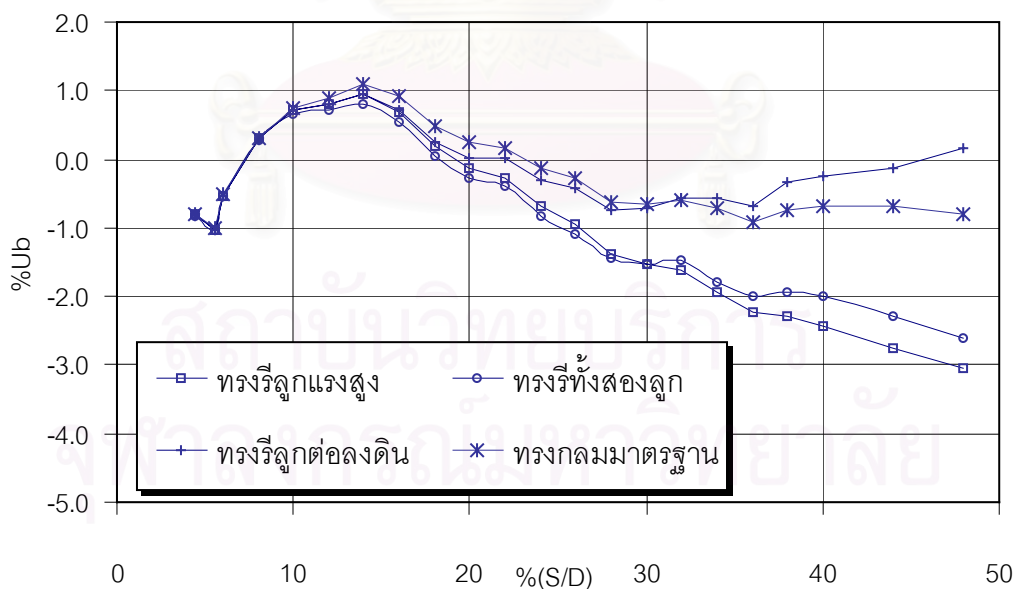
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน%Ubที่เทียบกับการคำนวณของทรงกลมที่รูปทรงผิวดัดเพี้ยนเป็นทรงรีแนวขนานขนาด 3%บนทรงกลมลูกต่างๆ, D = 50 เซนติเมตร



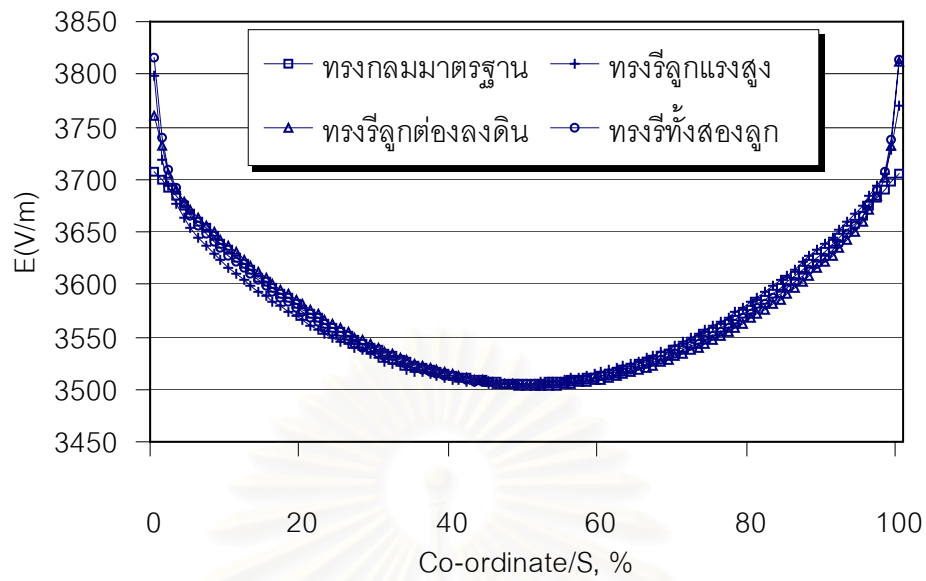
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน%Ubที่เทียบกับ IEC52 ของทรงกลมที่รูปทรงผิวดัดเพี้ยนเป็นทรงรีแนวขนานขนาด 3%บนทรงกลมลูกต่างๆ, D = 50 เซนติเมตร



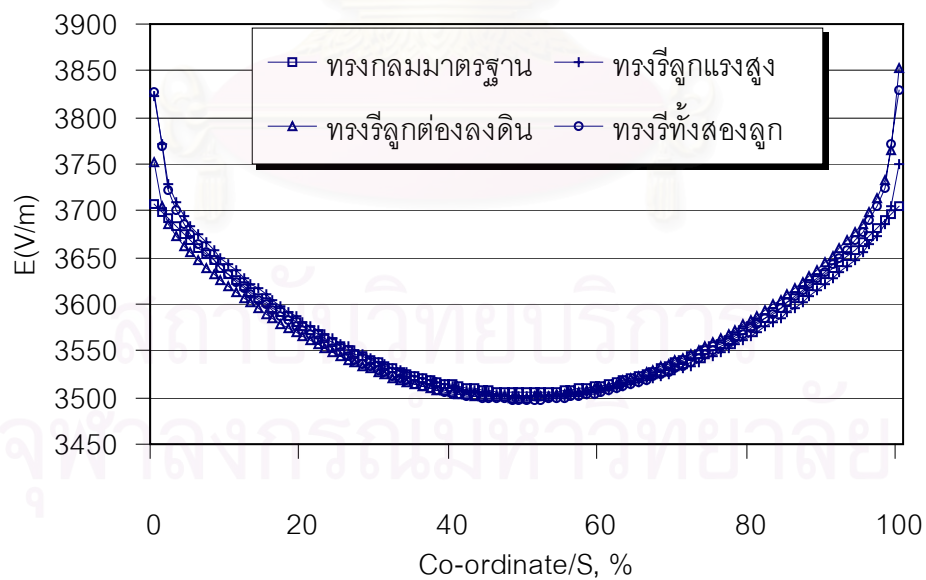
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน%Ubที่เทียบกับการคำนวณของทรงกลมที่รูปทรงผิดเพี้ยนเป็นทรงรีแนวตั้งขนาด 3%บนทรงกลมลูกต่างๆ, D = 50 เซนติเมตร



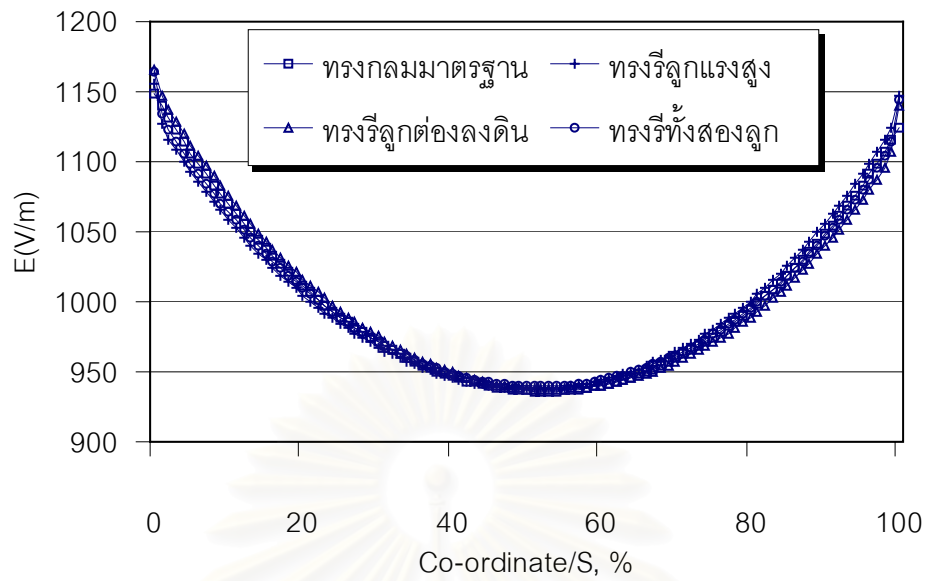
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน%Ubที่เทียบกับ IEC52 ของทรงกลมที่รูปทรงผิดเพี้ยนเป็นทรงรีแนวตั้งขนาด 3%บนทรงกลมลูกต่างๆ, D = 50 เซนติเมตร



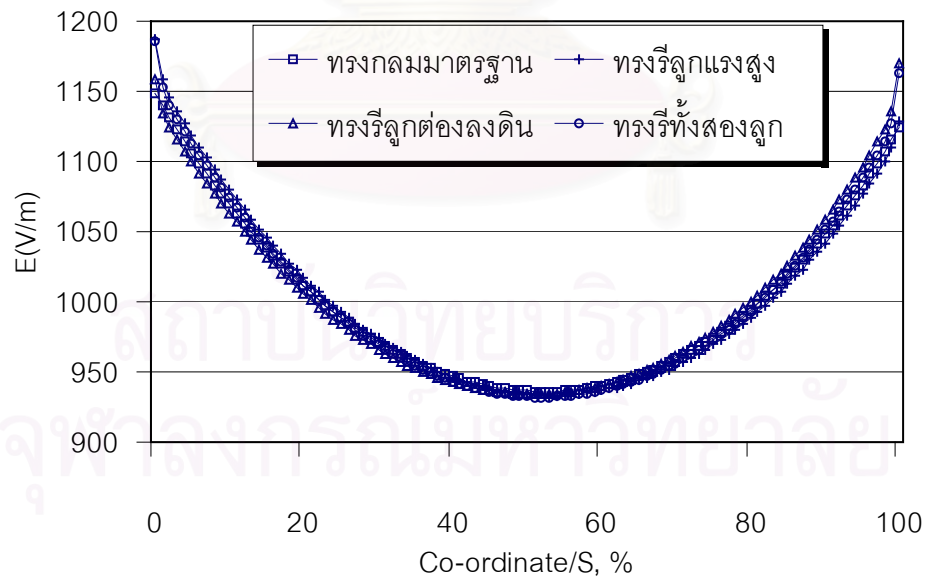
รูปที่ 4.24 กราฟการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าของทรงกลมที่รูปทรงผิดเพี้ยนเป็นทรงรี  
แนวอนขนาด 3%บนทรงกลมลูกต่างๆ,  $D = 50$  เซนติเมตร และ  $S = 2.8$  เซนติเมตร



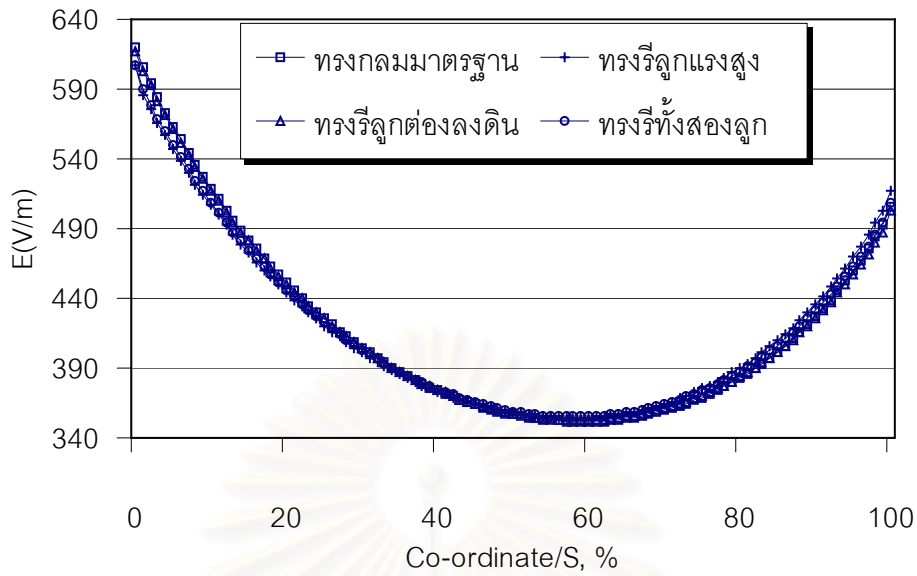
รูปที่ 4.25 กราฟการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าของทรงกลมที่รูปทรงผิดเพี้ยนเป็นทรงรี  
แนวตั้งขนาด 3%บนทรงกลมลูกต่างๆ,  $D = 50$  เซนติเมตร และ  $S = 2.8$  เซนติเมตร



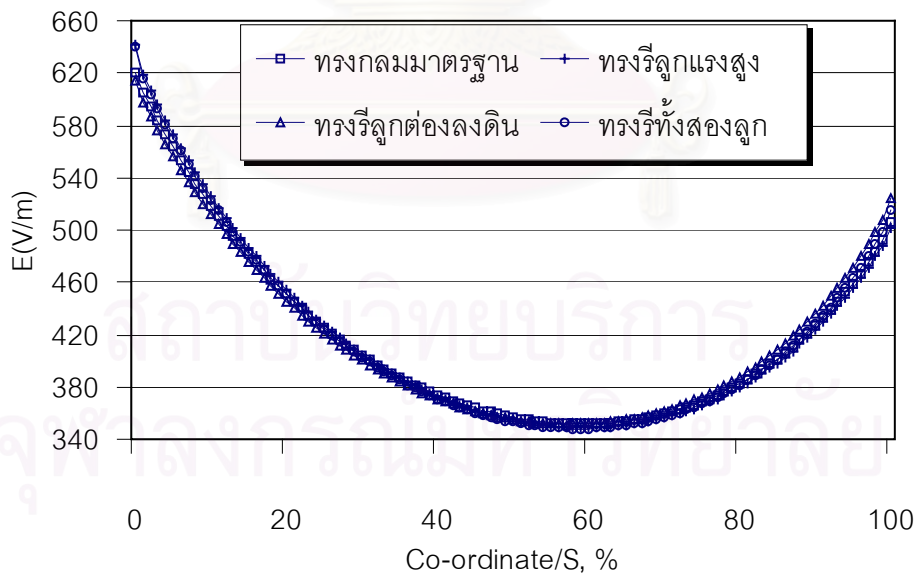
รูปที่ 4.26 กราฟการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าของทรงกลมที่รูปทรงผิดเพี้ยนเป็นทรงรี  
แนวอนขนาด 3%บนทรงกลมลูกต่างๆ,  $D = 50$  เซนติเมตร และ  $S = 10$  เซนติเมตร



รูปที่ 4.27 กราฟการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าของทรงกลมที่รูปทรงผิดเพี้ยนเป็นทรงรี  
แนวตั้งขนาด 3%บนทรงกลมลูกต่างๆ,  $D = 50$  เซนติเมตร และ  $S = 10$  เซนติเมตร

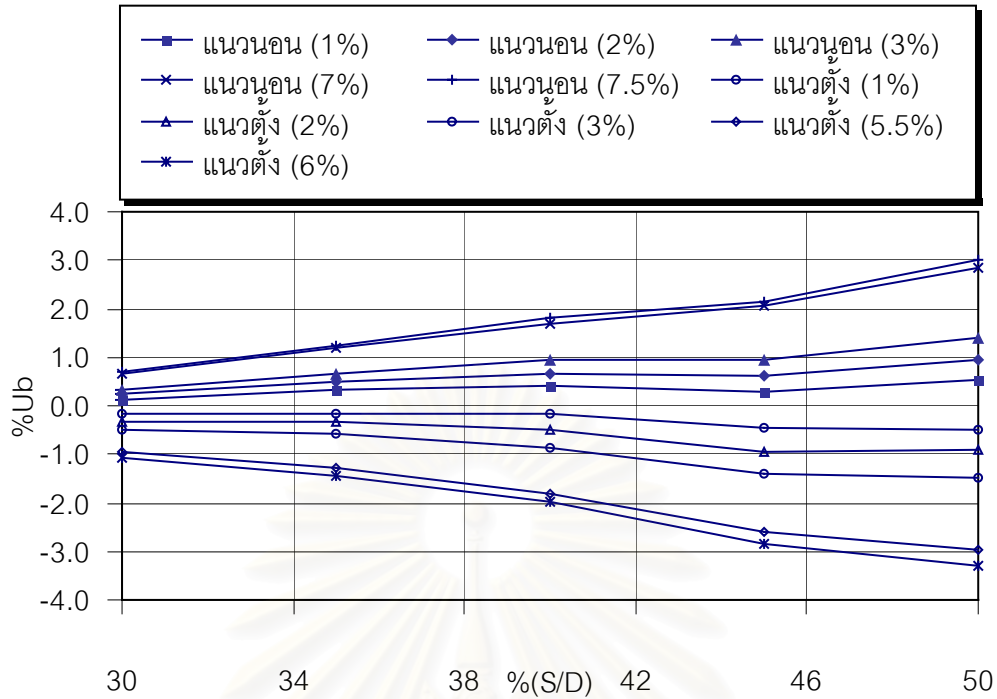


รูปที่ 4.28 กราฟการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าของทรงกลมที่รูปทรงผิดเพี้ยนเป็นทรงรี  
แนวอนขนาด 3%บนทรงกลมลูกต่างๆ,  $D = 50$  เซนติเมตร และ  $S = 24$  เซนติเมตร

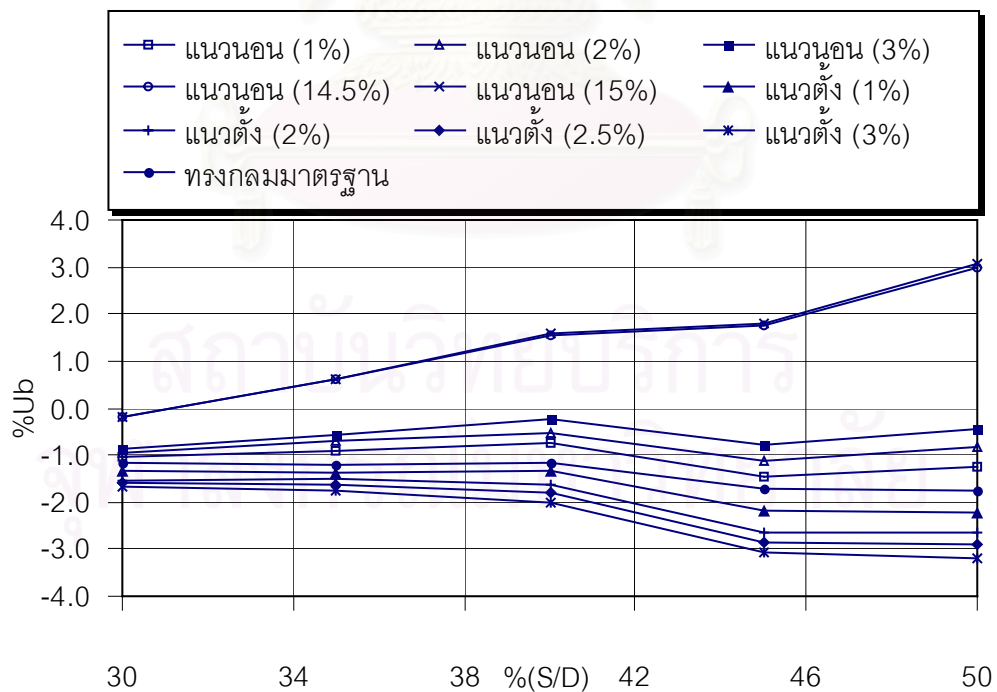


รูปที่ 4.29 กราฟการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าของทรงกลมที่รูปทรงผิดเพี้ยนเป็นทรงรี  
แนวตั้งขนาด 3%บนทรงกลมลูกต่างๆ,  $D = 50$  เซนติเมตร และ  $S = 24$  เซนติเมตร

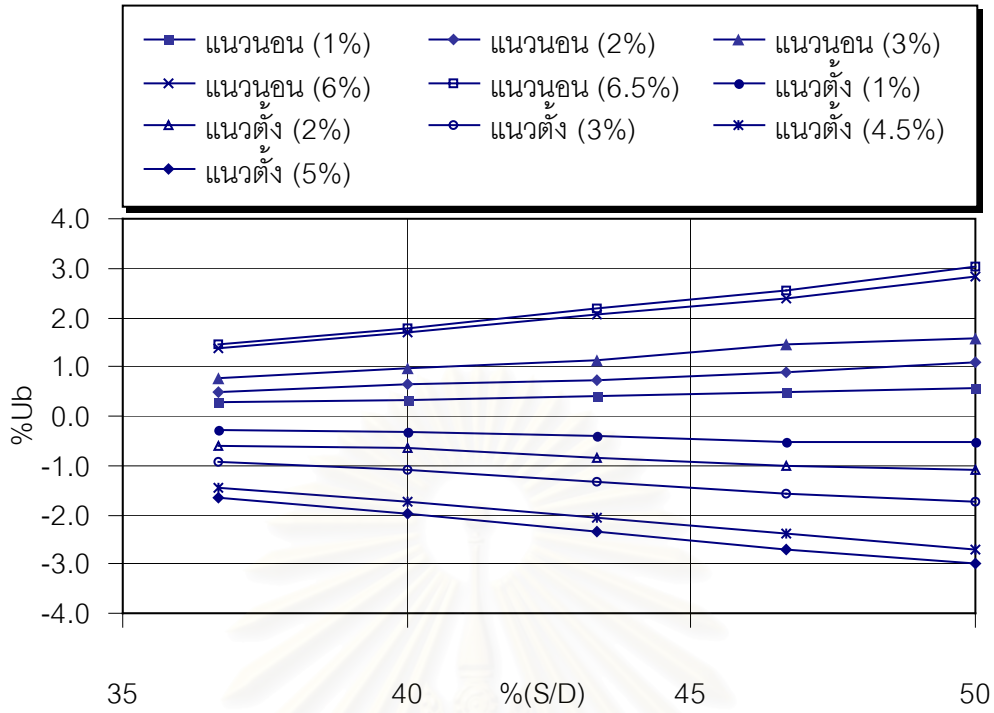




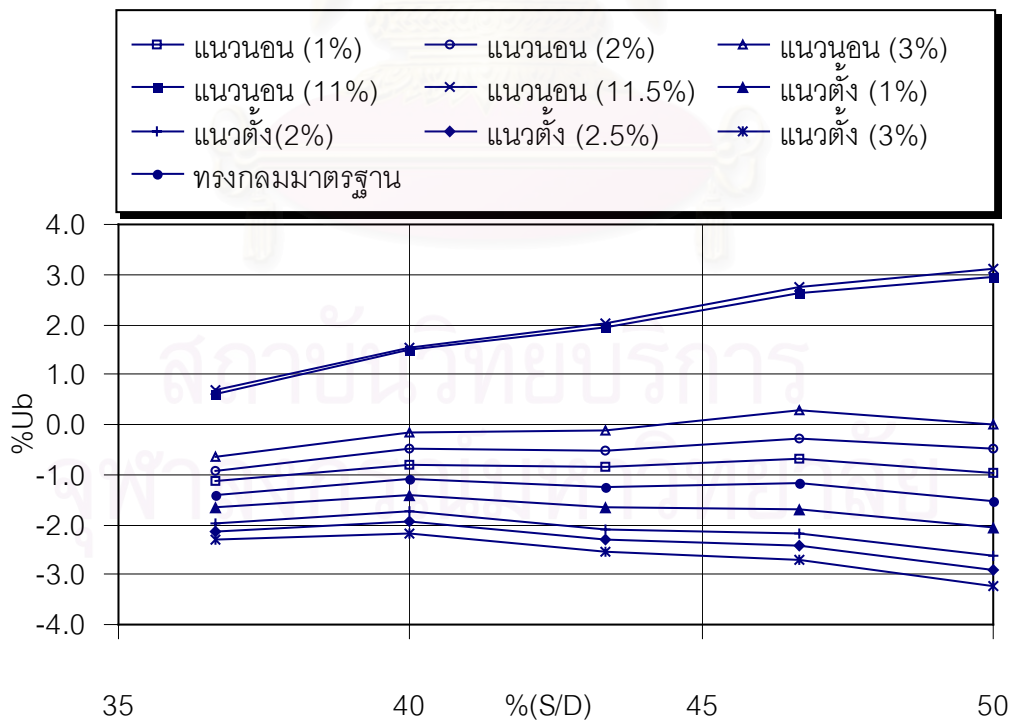
รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน%Ubที่เทียบกับการคำนวณของทรงกลมที่รูปทรงผิด  
เพี้ยนเป็นทรงรีขนาดต่างๆบนทรงกลมลูกแรงสูง, D = 10 เซนติเมตร



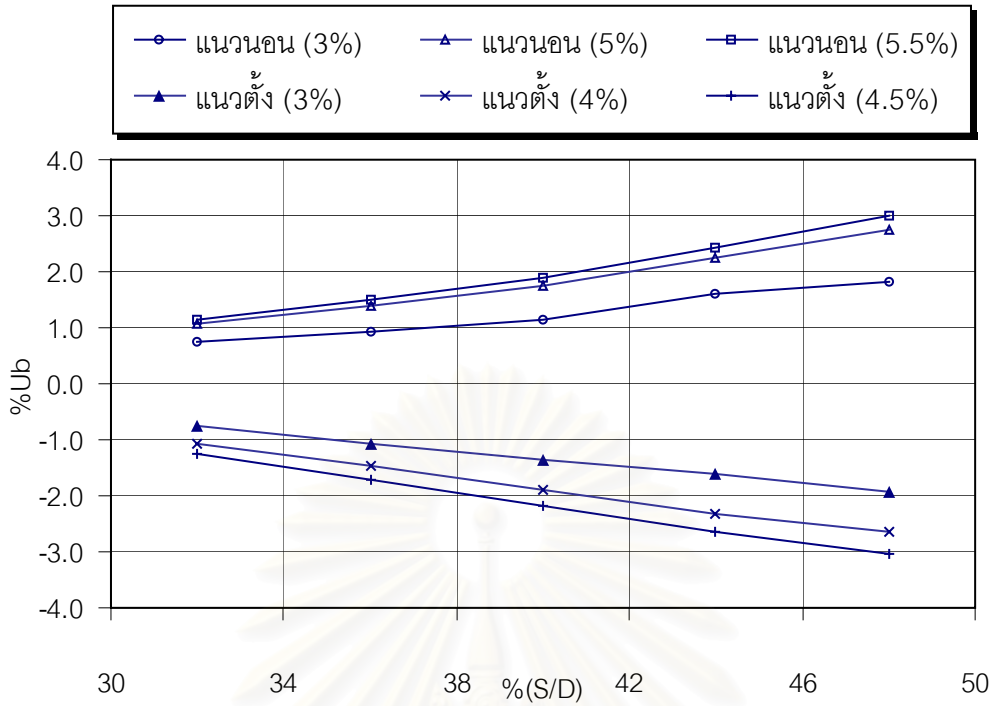
รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน%Ubที่เทียบกับ IEC52 ของทรงกลมที่รูปทรงผิด  
เพี้ยนเป็นทรงรีขนาดต่างๆบนทรงกลมลูกแรงสูง, D = 10 เซนติเมตร



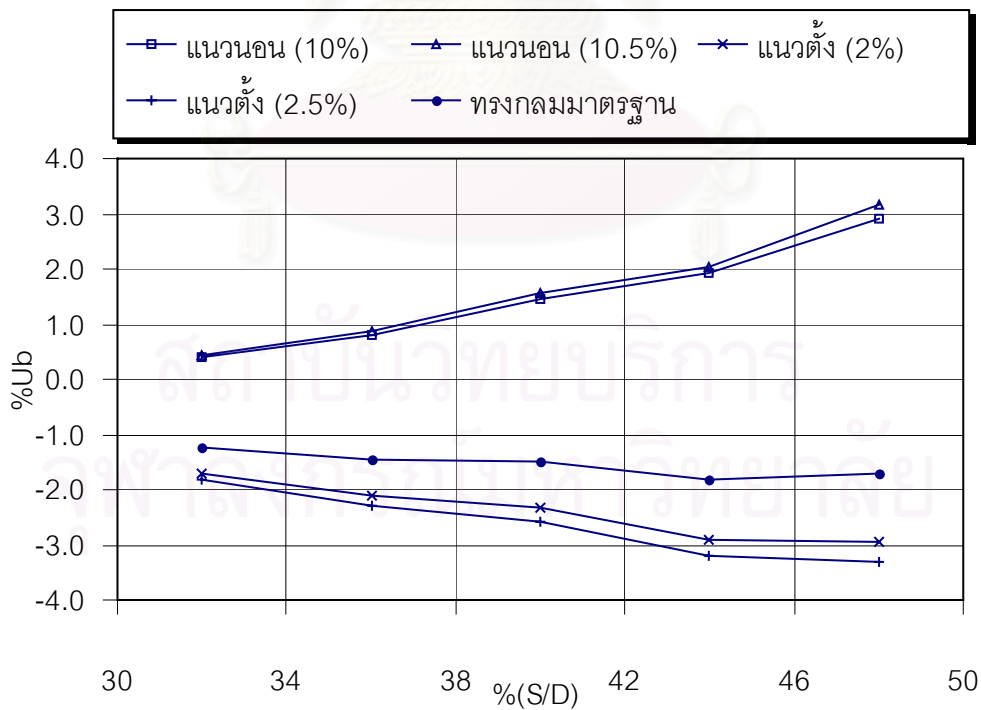
รูปที่ 4.32 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน%Ubที่เทียบกับการคำนวณของทรงกลมที่รูปทรงผิดเพี้ยนเป็นทรงรีขนาดต่างๆบนทรงกลมลูกแรงสูง, D = 15 เซนติเมตร



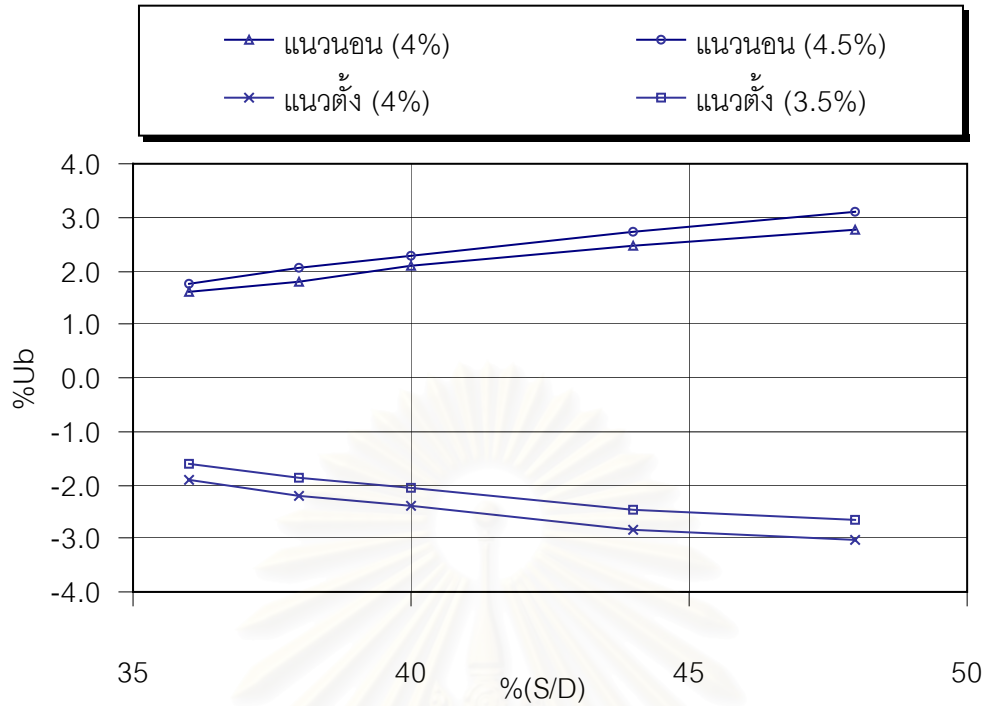
รูปที่ 4.33 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน%Ubที่เทียบกับ IEC52 ของทรงกลมที่รูปทรงผิดเพี้ยนเป็นทรงรีขนาดต่างๆบนทรงกลมลูกแรงสูง, D = 15 เซนติเมตร



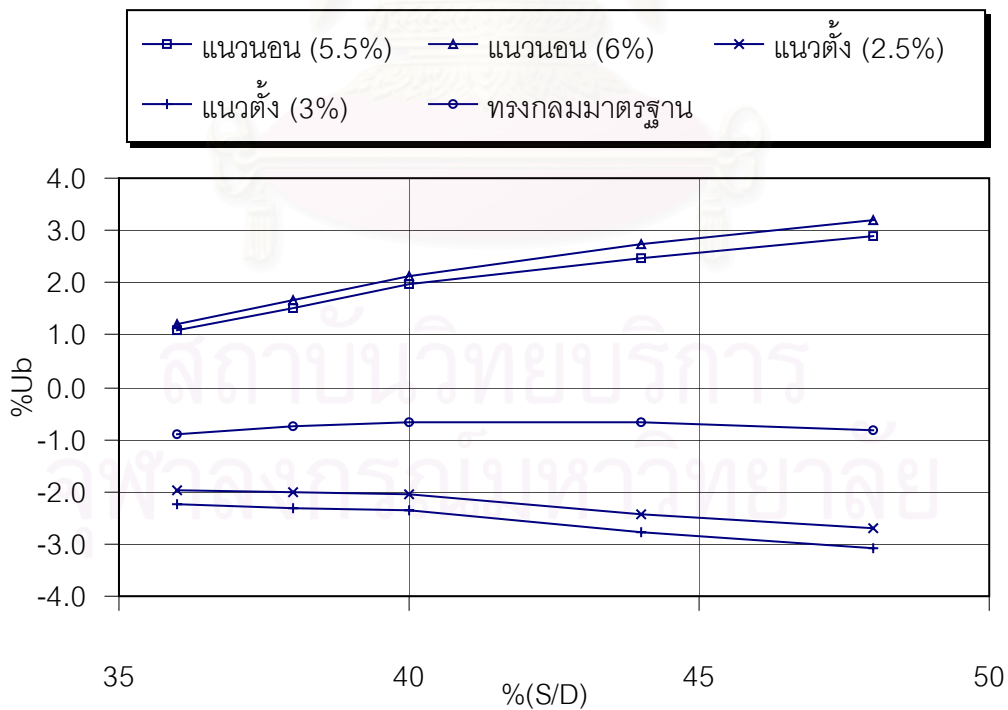
รูปที่ 4.34 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน%Ubที่เทียบกับการคำนวณของทรงกลมที่รูปทรงผิดเพี้ยนเป็นทรงรีขนาดต่างๆบนทรงกลมลูกแรงสูง, D = 25 เซนติเมตร



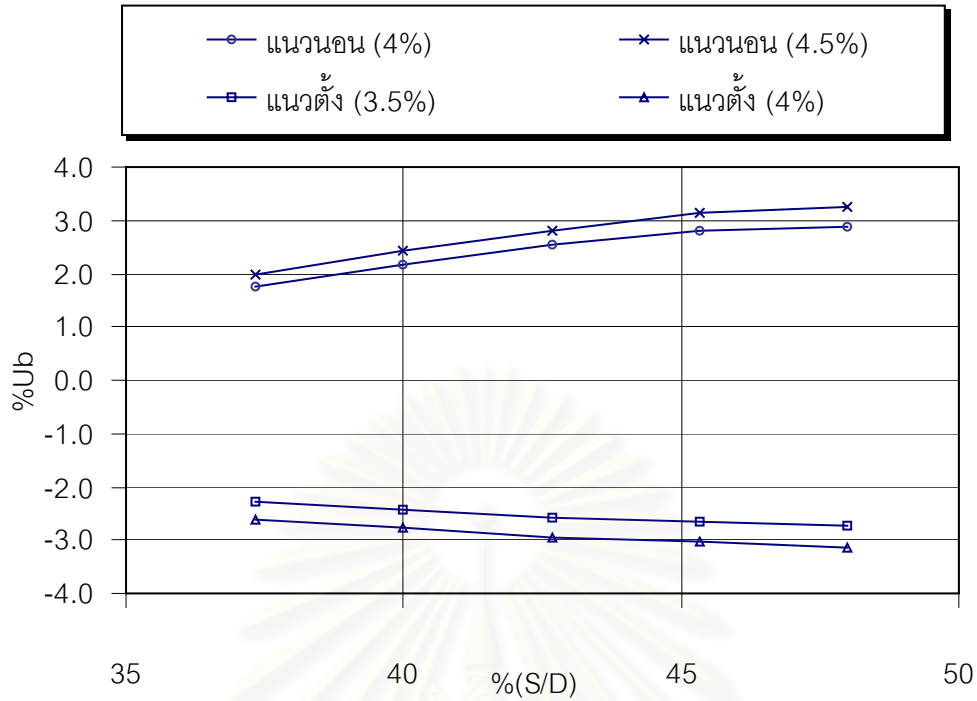
รูปที่ 4.35 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน%Ubที่เทียบกับ IEC52 ของทรงกลมที่รูปทรงผิดเพี้ยนเป็นทรงรีขนาดต่างๆบนทรงกลมลูกแรงสูง, D = 25 เซนติเมตร



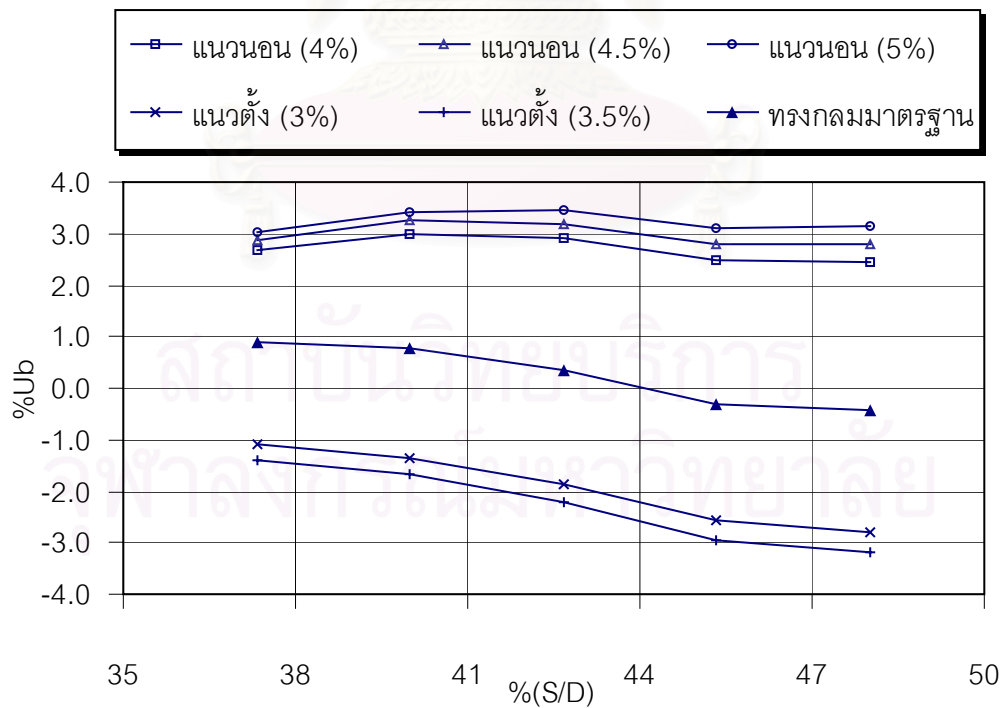
รูปที่ 4.36 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน%Urbที่เทียบกับการคำนวณของทรงกลมที่รูปทรงผิด  
เพี้ยนเป็นทรงรีขนาดต่างๆบนทรงกลมลูกแรงสูง, D = 50 เซนติเมตร



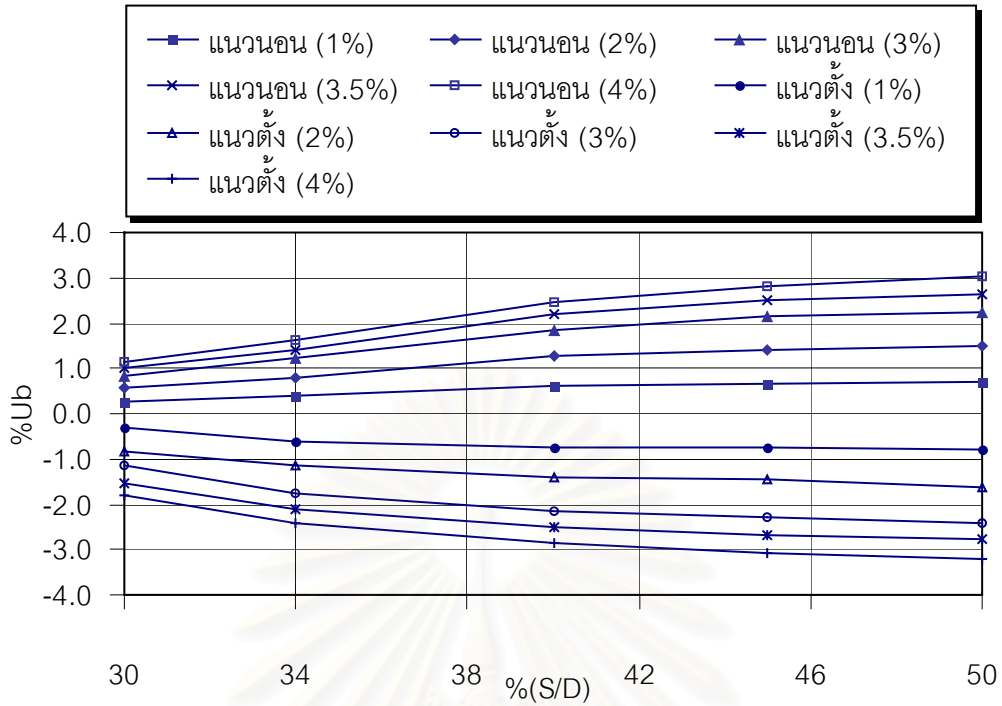
รูปที่ 4.37 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน%Urbที่เทียบกับ IEC52 ของทรงกลมที่รูปทรงผิด  
เพี้ยนเป็นทรงรีขนาดต่างๆบนทรงกลมลูกแรงสูง, D = 50 เซนติเมตร



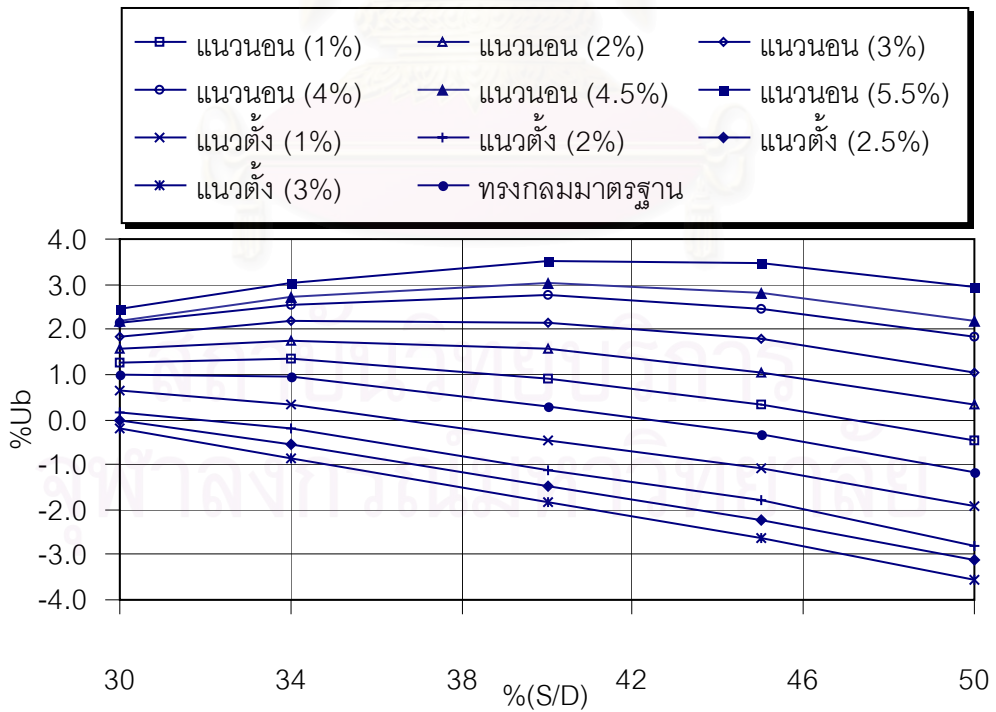
รูปที่ 4.38 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน%Ubที่เทียบกับการคำนวณของทรงกลมที่รูปทรงผิวด้านบนเป็นทรงรีขนาดต่างๆบนทรงกลมลูกแรงสูง, D = 75 เซนติเมตร



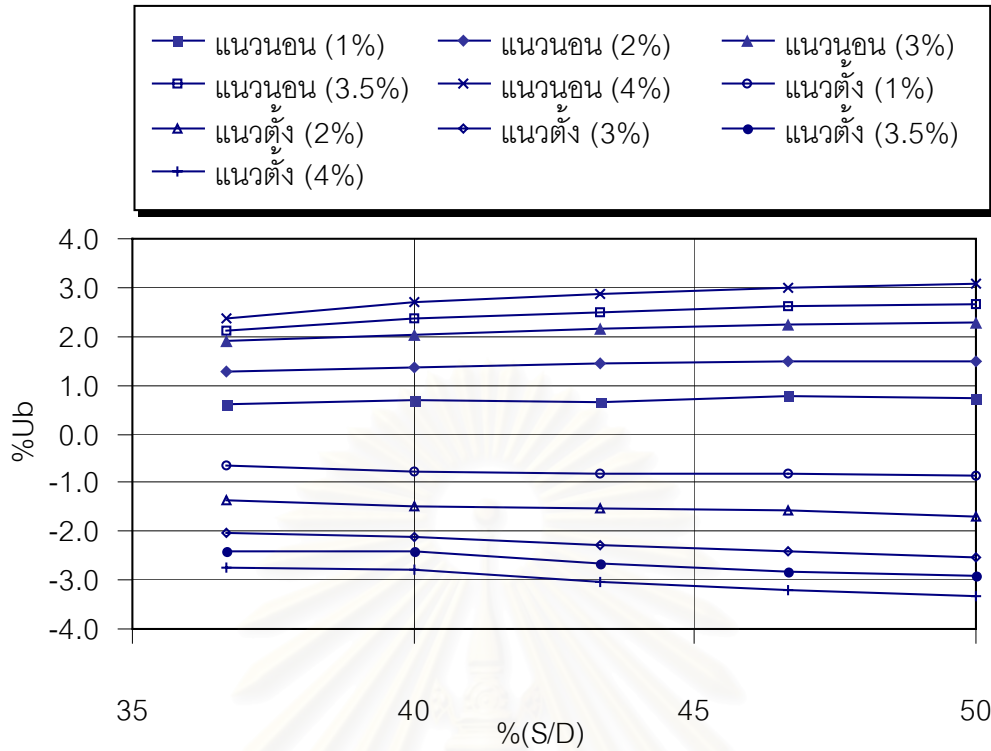
รูปที่ 4.39 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน%Ubที่เทียบกับ IEC52 ของทรงกลมที่รูปทรงผิวด้านบนเป็นทรงรีขนาดต่างๆบนทรงกลมลูกแรงสูง, D = 75 เซนติเมตร



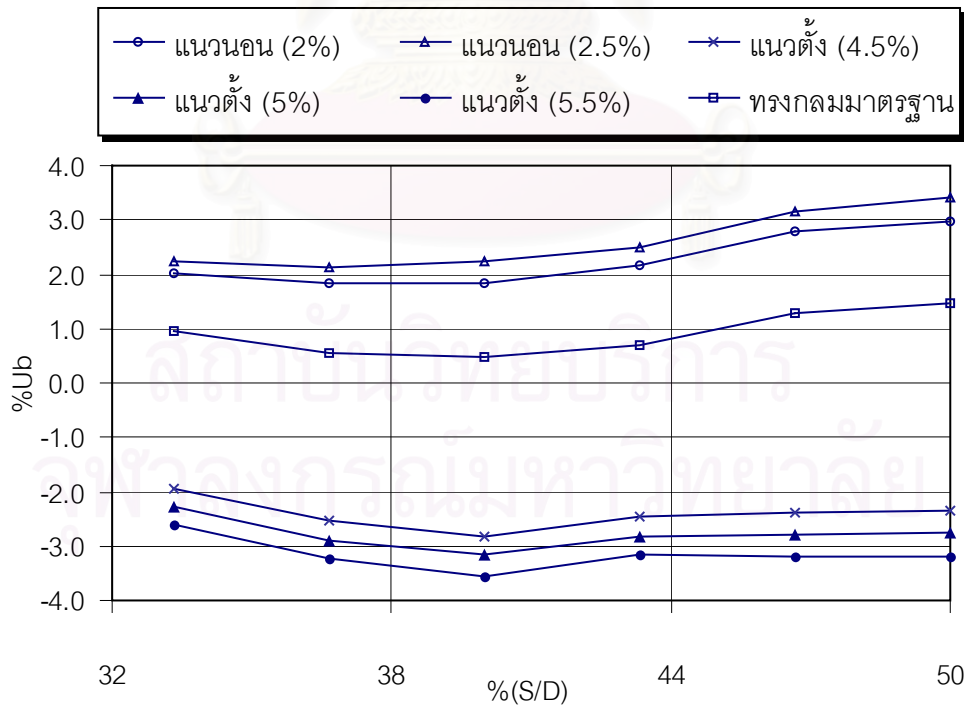
รูปที่ 4.40 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน%Ubที่เทียบกับการคำนวณของทรงกลมที่รูปทรงผิ  
 เพียงเป็นทรงรีขนาดต่างๆบนทรงกลมลูกแรงสูง, D = 100 เซนติเมตร



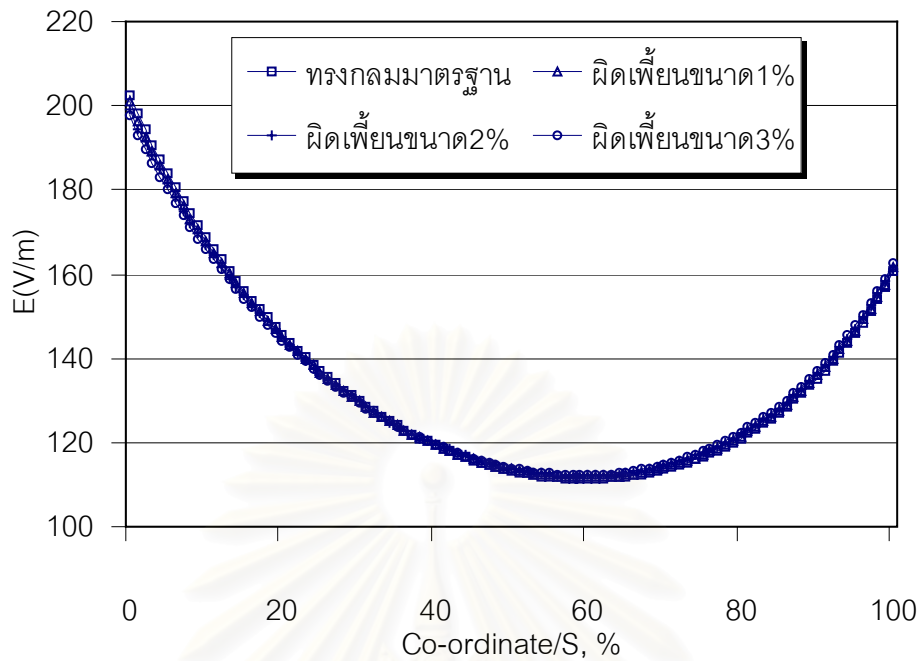
รูปที่ 4.41 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน%Ubที่เทียบกับ IEC52 ของทรงกลมที่รูปทรงผิ  
 เพียงเป็นทรงรีขนาดต่างๆบนทรงกลมลูกแรงสูง, D = 100 เซนติเมตร



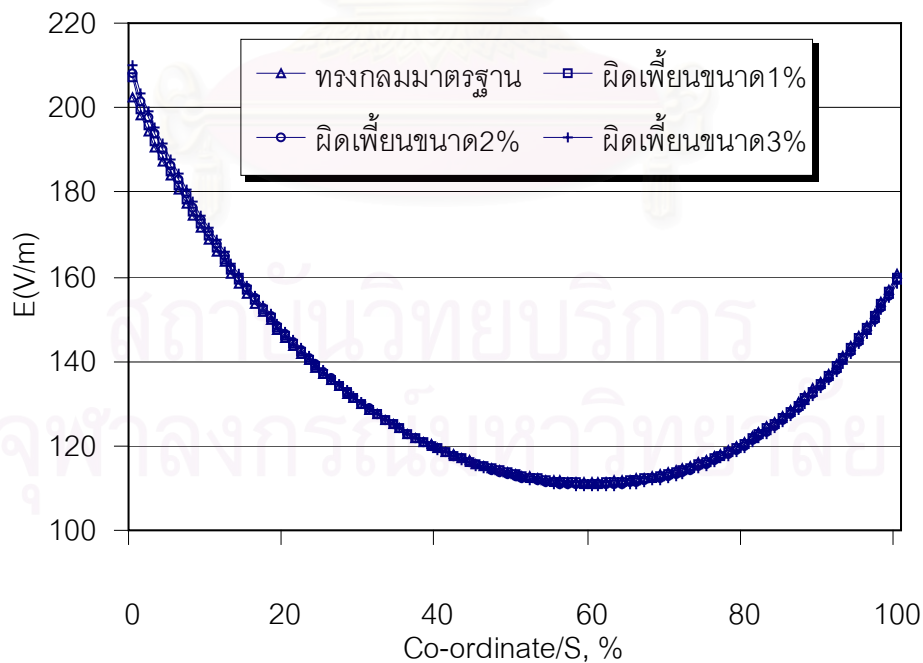
รูปที่ 4.42 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน%Ubที่เทียบกับการคำนวณของทรงกลมที่รูปทรงผิดเพี้ยนเป็นทรงรีขนาดต่างๆบนทรงกลมลูกแรงสูง, D = 150 เซนติเมตร



รูปที่ 4.43 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน%Ubที่เทียบกับ IEC52 ของทรงกลมที่รูปทรงผิดเพี้ยนเป็นทรงรีขนาดต่างๆบนทรงกลมลูกแรงสูง, D = 150 เซนติเมตร



รูปที่ 4.44 กราฟการกระจายความเคียดสนามไฟฟ้าของทรงกลมที่รูปทรงผิดเพี้ยนเป็นทรงรี  
แนวอนขนาดต่างๆบนทรงกลมลูกแรงสูง,  $D = 150$  เซนติเมตร และ  $S = 75$  เซนติเมตร



รูปที่ 4.45 กราฟการกระจายความเคียดสนามไฟฟ้าของทรงกลมที่รูปทรงผิดเพี้ยนเป็นทรงรี  
แนวตั้งขนาดต่างๆบนทรงกลมลูกแรงสูง,  $D = 150$  เซนติเมตร และ  $S = 75$  เซนติเมตร



#### 4.1.2.2 วิเคราะห์ผลการจำลอง

เนื่องจากการผิดเพี้ยนเป็นทรงรีทั้งแนวนอนและแนวตั้งมีอย่างละ 2 แบบขึ้นกับการกำหนดแกนทรงรีด้านใดด้านหนึ่งให้คงที่เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางดังรูปที่ 3.7ก ถึง 3.7ง โดยจะยึดถือแบบที่ทำให้ %Ub คลาดเคลื่อนมากที่สุดจากรูป 4.18 และ 4.19 ที่ทรงกลมขนาด 50 เซนติเมตร จะเห็นได้ว่าที่ตลอดช่วงระยะห่างการผิดเพี้ยนขนาด 3% เป็นทรงรีแนวนอนจะให้ค่าแรงดันเบรกดาวนสูงขึ้นสังเกตจากค่า %Ub เป็นบวกในรูปที่ 4.11 โดย %Ub จะมากที่สุดเมื่อเกิดการผิดเพี้ยนเป็นทรงรีแนวนอนแบบที่ 2 ดังรูปที่ 3.7ข และการผิดเพี้ยนเป็นทรงรีแนวตั้งจะให้แรงดันเบรกดาวนลดลงสังเกตจาก %Ub เป็นลบ โดย %Ub จะน้อยที่สุดเมื่อเกิดการผิดเพี้ยนเป็นทรงรีแนวตั้งแบบที่ 2 ดังรูปที่ 3.7ง ดังนั้นจึงใช้ทั้งสองแบบนี้ในการจำลองต่อไป

การผิดเพี้ยนเป็นทรงรีจะเกิดได้ 3 กรณี คือ เกิดกับลูกแรงสูง, ลูกต่อลงดินและทั้งสองลูก เมื่อพิจารณาที่ **ทรงรีแนวนอน** ได้ค่า %Ub ของทรงกลม 50 เซนติเมตรที่มีรูปทรงผิดเพี้ยนขนาด 3% เป็นทรงรีแนวนอนทั้ง 3 กรณี ดังรูปที่ 4.20 และ 4.21 จะสามารถแบ่งช่วงตามการเปรียบเทียบ %Ub ของกรณีต่างๆ ได้ 3 ช่วงดังนี้

- ช่วงที่ 1 %S/D น้อยกว่า 12% ในช่วงนี้แรงดันเบรกดาวนทั้ง 3 กรณีจะมีค่าใกล้เคียงกับที่ทรงกลมมาตรฐานมาก อธิบายได้จากรูปที่ 4.24 ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณจุดเกิดประกายไฟของทั้งสองลูกในทั้ง 3 กรณีสูงกว่าที่ทรงกลมมาตรฐานแต่กรณีเป็นทรงรีลูกใดลูกหนึ่งบริเวณที่ห่างลูกที่เป็นทรงรีออกไปเกิน 4% จนถึง 50% ของระยะห่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะน้อยกว่าที่ทรงกลมมาตรฐาน ส่วนที่ไกลกว่า 50% ความเครียดสนามไฟฟ้าก็จะเริ่มสูงกว่ากรณีทรงกลมมาตรฐานและเนื่องจาก %S/D ต่ำๆ (สภาวะที่ 1) ความเครียดสนามไฟฟ้าค่อนข้างสม่ำเสมอจะใช้ข้อมูลความเครียดสนามไฟฟ้าตลอดช่วงระยะห่างในการหาแรงดันเบรกดาวน ดังนั้นความเครียดสนามไฟฟ้าโดยเฉลี่ยของกรณีเป็นทรงรีลูกใดลูกหนึ่งจึงใกล้เคียงกับทรงกลมมาตรฐานทำให้แรงดันเบรกดาวนมีค่าใกล้เคียงกัน และในกรณีเป็นทรงรีทั้งสองลูกความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณใกล้เคียงจุดเกิดประกายไฟจะสูงที่สุด แต่ที่ระยะระหว่าง 5% ถึง 95% ความเครียดสนามไฟฟ้าจะน้อยกว่ากรณีทรงกลมมาตรฐานเพียงเล็กน้อยดังนั้นความเครียดสนามไฟฟ้าโดยเฉลี่ยจึงใกล้เคียงกับทรงกลมมาตรฐานทำให้แรงดันเบรกดาวนใกล้เคียงกัน

- ช่วงที่ 2 %S/D ระหว่าง 12% ถึง 32% ในช่วงนี้แรงดันเบรกดาวนกรณีเป็นทรงรีทั้งสองลูกจะมากที่สุด รองลงมาคือกรณีเป็นทรงรีลูกแรงสูงและกรณีเป็นทรงรีลูกต่ำตามลำดับ อธิบายได้จากรูปที่ 4.26 ความเครียดสนามไฟฟ้าของทั้ง 3 กรณีเมื่อเทียบกับทรงกลมมาตรฐานจะมีลักษณะคล้ายในช่วงที่ 1 แต่การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณจุดเกิดประกายไฟของทั้ง 3 กรณี มีค่ามากกว่ากรณีทรงกลมมาตรฐานเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับรูปที่ 4.24 ในช่วงที่ 1

ประกอบกับค่า%S/Dปานกลาง(สภาวะที่2)ซึ่งใช้ข้อมูลความเครียดสนามไฟฟ้าในบริเวณใกล้ทรงกลมแรงสูงเป็นส่วนใหญ่และใกล้ทรงกลมต่อลงดินเป็นส่วนน้อย ดังนั้นกรณีเป็นทรงรีลูกแรงสูงค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเกือบตลอดบริเวณใกล้ลูกแรงสูงจะน้อยกว่าที่ทรงกลมมาตรฐานและที่บริเวณตลอดย่านใกล้ลูกต่อลงดินจะมีค่ามากกว่าที่ทรงกลมมาตรฐาน แต่เนื่องจากข้อมูลความเครียดสนามไฟฟ้าส่วนใหญ่ที่ใช้ก็คือบริเวณใกล้ลูกแรงสูง ดังนั้นแรงดันเบรกดาวนจ์จึงมากกว่าที่ทรงกลมมาตรฐาน ส่วนกรณีเป็นทรงรีลูกต่อลงดินความเครียดสนามไฟฟ้าในบริเวณใกล้ลูกแรงสูงมีค่ามากกว่าที่ทรงกลมมาตรฐานแต่บริเวณใกล้ลูกต่อลงดินความเครียดสนามไฟฟ้าจะน้อยกว่า จึงทำให้ที่%S/Dน้อยๆ(ใกล้12%) ค่าแรงดันเบรกดาวนจ์มากกว่าที่ทรงกลมมาตรฐานเล็กน้อย เพราะบริเวณด้านต่อลงดินที่ใช้ข้อมูลความเครียดสนามไฟฟ้าหาแรงดันเบรกดาวนจ์ยังคงค่อนข้างใหญ่อยู่ แต่เมื่อ%S/Dมากขึ้นค่าแรงดันเบรกดาวนจ์จะค่อยๆน้อยลงจนกระทั่งที่%S/Dมากกว่า30% ค่าแรงดันเบรกดาวนจ์จะน้อยกว่าที่ทรงกลมมาตรฐานเพราะที่%S/Dมากขึ้นค่าความเครียดสนามไฟฟ้าก็จะไม่สม่ำเสมอมากขึ้นบริเวณข้อมูลความเครียดสนามไฟฟ้าด้านต่อลงดินที่ใช้หาแรงดันเบรกดาวนจ์ก็น้อยลง ดังนั้นค่าแรงดันเบรกดาวนจ์จะค่อยๆน้อยลง สำหรับกรณีเป็นทรงรีทั้งสองลูกมีความเครียดสนามไฟฟ้าเกือบตลอดบริเวณที่อยู่ในช่วงการอินทิเกรตหาแรงดันเบรกดาวนจ์ทั้งด้านแรงสูงและด้านต่อลงดินต่ำกว่าที่ทรงกลมมาตรฐาน ดังนั้นแรงดันเบรกดาวนจ์จึงมากกว่าที่ทรงกลมมาตรฐานและมากกว่ากรณีเป็นทรงรีลูกแรงสูงด้วยเพราะความเครียดสนามไฟฟ้าด้านต่อลงดินของกรณีเป็นทรงรีลูกแรงสูงสูงกว่าที่ทรงกลมมาตรฐานซึ่งตรงข้ามกับกรณีบุบทั้งสองลูก

– ช่วงที่3 %S/Dมากกว่า32% แรงดันเบรกดาวนจ์กรณีเป็นทรงรีลูกแรงสูงจะมีค่ามากที่สุดรองลงมา คือ กรณีเป็นทรงรีทั้งสองลูกและกรณีเป็นทรงรีลูกต่อลงดินตามลำดับ จากรูปที่ 4.28 ความเครียดสนามไฟฟ้าทั้ง 3 กรณีเมื่อเทียบกับทรงกลมมาตรฐานมีลักษณะคล้ายในช่วงที่1 แต่ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณจุดเกิดประกายไฟของทั้ง 3 กรณีมีค่าน้อยกว่ากรณีทรงกลมมาตรฐานเล็กน้อย และที่%S/Dมากๆ(สภาวะที่3)ซึ่งจะใช้ข้อมูลความเครียดสนามไฟฟ้าเฉพาะช่วงใกล้ทรงกลมลูกแรงสูงในการอินทิเกรตหาค่าแรงดันเบรกดาวนจ์ จากที่กล่าวไว้ว่าถ้าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงค่าแรงดันเบรกดาวนจ์จะต่ำ ดังนั้นจึงได้%Ubกรณีเป็นทรงรีลูกแรงสูงมากกว่ากรณีเป็นทรงรีทั้งสองลูกและค่า%Ubจะมากที่สุดที่%S/Dสูงสุด เพราะที่%S/Dนี้บริเวณที่ใช้ในการอินทิเกรตจะสั้นที่สุด ซึ่งที่บริเวณใกล้ลูกแรงสูงความเครียดสนามไฟฟ้าของทรงรีจะต่างจากที่ทรงกลมมาตรฐานมากกว่าบริเวณที่ไกลออกไป ดังนั้นจึงใช้ที่%S/Dสูงสุดนี้ในการหาขอบเขตการผิวด้านเป็นทรงรีแนวอนต่อไป ส่วนแรงดันเบรกดาวนจ์กรณีเป็นทรงรีลูกต่อลงดินจะน้อยกว่าที่ทรงกลมมาตรฐานด้วยเหตุผลเดียวกับในช่วงที่2

การผิดเพี้ยนเป็น**ทรงรีแนวตั้ง**จะให้%Ubของทรงกลม50เซนติเมตรมีรูปทรงผิดเพี้ยน3%ทั้ง 3 กรณีดังรูปที่4.22และ4.23 โดยสามารถแบ่งได้3ช่วงดังนี้

- ช่วงที่1 %S/Dน้อยกว่า10% ในช่วงนี้แรงดันเบรกดาวนทั้ง3กรณีจะมีค่าใกล้เคียงกับที่ทรงกลมมาตรฐานมาก อธิบายได้จากรูปที่4.25 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณจุดเกิดประกายไฟของทั้งสองลูกในทั้ง3กรณีสูงกว่าที่ทรงกลมมาตรฐานมาก โดยกรณีเป็นทรงรีลูกใดลูกหนึ่งบริเวณที่ห่างลูกที่เป็นทรงรีออกไปจนถึง30%ของระยะห่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะสูงกว่าที่ทรงกลมมาตรฐาน ส่วนที่ระยะ30%ถึง96%ความเครียดสนามไฟฟ้าก็จะน้อยกว่ากรณีทรงกลมมาตรฐานและเนื่องจาก%S/Dอยู่สถานะที่1ทำให้แรงดันเบรกดาวนใกล้เคียงกับที่ทรงกลมมาตรฐานเหมือนทรงรีแนวนอน และในกรณีเป็นทรงรีทั้งสองลูกความเครียดสนามไฟฟ้าที่ระยะระหว่าง8ถึง75%ของระยะห่าง จะน้อยกว่ากรณีทรงกลมมาตรฐานเพียงเล็กน้อย ดังนั้นความเครียดสนามไฟฟ้าโดยเฉลี่ยจึงใกล้เคียงกับทรงกลมมาตรฐานทำให้แรงดันเบรกดาวนมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เนื่องจากบริเวณที่ความเครียดสนามไฟฟ้าน้อยกว่าทรงกลมมาตรฐานของกรณีผิดเพี้ยนเป็นทรงรีแนวตั้งน้อยกว่ากรณีการผิดเพี้ยนเป็นทรงรีแนวนอน ดังนั้นแรงดันเบรกดาวนจึงค่อนข้างน้อยกว่าที่ทรงรีแนวนอนโดยสังเกตจาก%Ubที่%S/Dเท่ากับ10%ของทรงรีทั้งสองแนว

- ช่วงที่2 %S/Dระหว่าง10%ถึง30% ในช่วงนี้แรงดันเบรกดาวนกรณีเป็นทรงรีทั้งสองลูกจะน้อยที่สุด กรณีเป็นทรงรีลูกแรงสูง และกรณีเป็นทรงรีลูกต่อดินจะสูงขึ้นตามลำดับ อธิบายได้จากรูปที่4.27 ค่าการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าทั้ง3กรณีเมื่อเทียบกับทรงกลมมาตรฐานจะมีลักษณะคล้ายช่วงที่1 แต่ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณจุดเกิดประกายไฟของทั้ง3กรณีมีค่ามากกว่าทรงกลมมาตรฐานเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับรูปที่4.25ในช่วงที่1 ประกอบกับ%S/Dปานกลาง(สถานะที่2)ซึ่งใช้ข้อมูลความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณใกล้ทรงกลมแรงสูงเป็นส่วนใหญ่และบริเวณใกล้ทรงกลมต่อดินเป็นส่วนน้อย ดังนั้นด้วยเหตุผลในลักษณะเดียวกับที่ทรงรีแนวนอนทำให้กรณีเป็นทรงรีทั้งสองลูกให้แรงดันเบรกดาวนน้อยที่สุด เพราะทั้งบริเวณใกล้ทรงรีทั้งสองลูกมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าที่ทรงกลมมาตรฐาน และกรณีเป็นทรงรีลูกแรงสูงก็จะมีแรงดันเบรกดาวนสูงขึ้นแต่ยังน้อยกว่าที่ทรงกลมมาตรฐานเพราะมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณใกล้ลูกแรงสูงซึ่งเป็นบริเวณที่สำคัญในการหาแรงดันเบรกดาวนสูงกว่าที่ทรงกลมมาตรฐานและความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณลูกต่อดินต่ำกว่า ส่วนกรณีเป็นทรงรีลูกต่อดินจะมีแรงดันเบรกดาวนมากที่สุดแต่ยังน้อยกว่าที่ทรงกลมมาตรฐาน เพราะมีความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณใกล้ลูกแรงสูงต่ำกว่าที่ทรงกลมมาตรฐานและความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณลูกต่อดินสูงกว่า แต่เมื่อ%S/Dสูงขึ้นแรงดันเบรกดาวนของกรณีนี้ก็ค่อยๆสูงขึ้น เพราะข้อมูลความเครียดสนามไฟฟ้าที่ใช้หาแรงดันเบรกดาวนจะขึ้นกับด้านแรงสูงมากขึ้นและด้านต่อดินน้อยลง จนกระทั่งที่%S/Dเท่ากับ32%แรงดันเบรกดาวนจะสูงกว่าที่ทรงกลมมาตรฐานดังรูปที่4.22และ4.23

– ช่วงที่3 %S/Dมากกว่า30% แรงดันเบรกดาวนักรถเป็นทรงรีลูกแรงสูงจะมีค่าน้อยที่สุด กรณีเป็นทรงรีทั้งสองลูกและกรณีเป็นทรงรีลูกต่อลงดินจะสูงขึ้นตามลำดับ จากรูปที่4.29 ความเครียดสนามไฟฟ้าทั้ง3กรณีเมื่อเทียบกับทรงกลมมาตรฐานมีลักษณะคล้ายในช่วงที่1 แต่ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณจุดเกิดประกายไฟของทรงรีจะสูงกว่าที่ทรงกลมมาตรฐาน แต่สำหรับกรณีเป็นทรงรีลูกใดลูกหนึ่งความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณใกล้ลูกปกติจะมีค่าน้อยกว่าที่ทรงกลมมาตรฐานเล็กน้อย และที่%S/Dมากๆการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าอยู่ในสถานะที่3 ที่ใช้ข้อมูลความเครียดสนามไฟฟ้าเฉพาะด้านแรงสูงจึงทำให้แรงดันเบรกดาวนัทั้ง3กรณีเป็นดังที่กล่าวข้างต้นและที่%S/Dสูงสุดของกรณีเป็นทรงรีลูกแรงสูงจะให้%U<sub>b</sub>น้อยที่สุด เพราะช่วงการอินทิเกรตหาแรงดันเบรกดาวนัจะสั้นที่สุด ซึ่งบริเวณใกล้ลูกแรงสูงความเครียดสนามไฟฟ้าของทรงรีจะสูงกว่าที่ทรงกลมมาตรฐานมากกว่าบริเวณที่ไกลออกไป ดังนั้นจึงใช้ในการหาขอบเขตการหาขอบเขตการผิดเพี้ยนเป็นทรงรีแนวตั้งต่อไป

การหาขอบเขตการผิดเพี้ยนเป็นทรงรีที่มากที่สุดที่ยังใช้ค่าในตารางIEC52ได้ ต้องมี%U<sub>b</sub>อยู่ระหว่าง -3% ถึง 3% โดยจะใช้กรณีเป็นทรงรีลูกแรงสูงที่%S/Dมากกว่า30%ขึ้นไปในการพิจารณาหาขอบเขต และเลือกขนาดการผิดเพี้ยนหลายๆขนาดเพื่อหาขนาดการผิดเพี้ยนเป็นทรงรีแนวอนที่ทำให้%U<sub>b</sub>มากกว่าและน้อยกว่า3% และหาขนาดการผิดเพี้ยนเป็นทรงรีแนวตั้งที่ทำให้%U<sub>b</sub>มากกว่าและน้อยกว่า-3% โดยมีขนาดการผิดเพี้ยนต่างกันเพียง0.5% ผลการจำลองจะแสดงเป็นทรงกลมทีละขนาดเพื่อหาขอบเขตการผิดเพี้ยนทั้งที่มาจากการเปรียบเทียบกับแรงดันเบรกดาวนัที่ได้จากการคำนวณ(ตารางที่ ข.2) และเทียบกับมาตรฐานIEC52(ตารางที่ข.1)โดยพิจารณาทั้งเป็นทรงรีแนวอนและแนวตั้งพร้อมกันดังตารางที่ 4.2

จากรูปที่4.30ถึง4.43 ค่า|%U<sub>b</sub>|จะเพิ่มขึ้นเมื่อทรงกลมมีขนาดการผิดเพี้ยนเป็นทรงรีมากขึ้น อธิบายได้จากรูปที่4.44และ4.45ที่%S/Dอยู่ในสถานะที่3 เมื่อขนาดการผิดเพี้ยนมากขึ้นค่าความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณใกล้ลูกแรงสูงจะต่างจากที่ทรงกลมมาตรฐานมากขึ้น จึงทำให้%U<sub>b</sub>เพิ่มขึ้น จากตารางที่ 4.2 เมื่อพิจารณาขอบเขตการผิดเพี้ยนที่เทียบกับการคำนวณ ทรงกลมลูกที่ใหญ่ที่สุด150เซนติเมตร จะมีขนาดการผิดเพี้ยนเป็นทรงรีทั้งแนวอนและแนวตั้งน้อยที่สุด คือ 3.5%ทั้งสองแนว ส่วนที่ทรงกลมขนาดเล็กลงไปขนาดการผิดเพี้ยนที่ยอมรับได้จะมีค่าสูงขึ้นเพราะว่าที่%S/Dมากที่สุดของทรงกลมขนาดเล็กๆ(10, 15 และ25 เซนติเมตร) จะใช้ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณลูกต่อลงดินในการหาแรงดันเบรกดาวนัด้วย จึงทำให้ที่ขนาดผิดเพี้ยนเท่ากัน%U<sub>b</sub>จะน้อยกว่าทรงกลมลูกใหญ่ และที่ทรงกลม50ถึง150เซนติเมตร ขนาดการผิดเพี้ยนที่ยอมรับได้จะใกล้เคียงกันเพราะช่วงการอินทิเกรตหาแรงดันเบรกดาวนัมีแค่บริเวณลูกแรงสูง และที่ทรงกลมใหญ่ขึ้นช่วงการอินทิเกรตจะสั้นลงประกอบกับผลต่างของความเครียดสนามไฟ

ฟ้าบริเวณใกล้จุดเกิดประกายไฟจะมากกว่าที่ไกลออกไป จึงทำให้%U<sub>b</sub>มากกว่าที่ทรงกลมลูกเล็ก ดูได้จากรูปที่4.40 ทรงกลมขนาด100เซนติเมตรเมื่อถูกแรงสูงผิดเพี้ยนขนาด1%เป็นทอร์รี่แวนอนที่ระยะห่างมากที่สุดได้%U<sub>b</sub>เท่ากับ 0.713% ซึ่งน้อยกว่า%U<sub>b</sub>ของทรงกลม 150 เซนติเมตร(0.734%)ที่ผิดเพี้ยนในลักษณะเดียวกัน

สำหรับขอบเขตการผิดเพี้ยนที่เทียบกับมาตรฐานIEC52 จากรูปที่3.3 ทรงกลม 150เซนติเมตรมีค่า%U<sub>b</sub>มากที่สุดอยู่2ช่วง คือ ช่วงบริเวณ%S/Dระหว่าง7ถึง14%เป็นช่วงที่จะไม่พิจารณาตามที่ระบุในบทที่3 อีกช่วงหนึ่งคือที่%S/Dมากกว่า35% ดังนั้นจากตารางที่ 4.2 จึงมีขนาดการผิดเพี้ยนเป็นทอร์รี่แวนอนน้อยที่สุด คือ 2% และ%U<sub>b</sub>ที่%S/Dมากกว่า35%มีค่าน้อยๆที่ ทรงกลม10, 15, 25 และ100 เซนติเมตร จากที่ว่าทรงกลมลูกใหญ่จะมี|%U<sub>b</sub>|มากกว่าทรงกลมลูกเล็ก เมื่อเกิดการผิดเพี้ยนลักษณะเดียวกัน ดังนั้นจากตารางที่ 4.2 จึงได้ทรงกลม 25 และ100 เซนติเมตรมีขนาดการผิดเพี้ยนเป็นทอร์รี่แวนอนตั้งน้อยที่สุด คือ 2%

ตารางที่ 4.2 สรุปขอบเขตการผิดเพี้ยนเป็นทอร์รี่ที่เทียบกับการคำนวณ และเทียบกับมาตรฐาน IEC 52 ของทรงกลมแต่ละขนาด

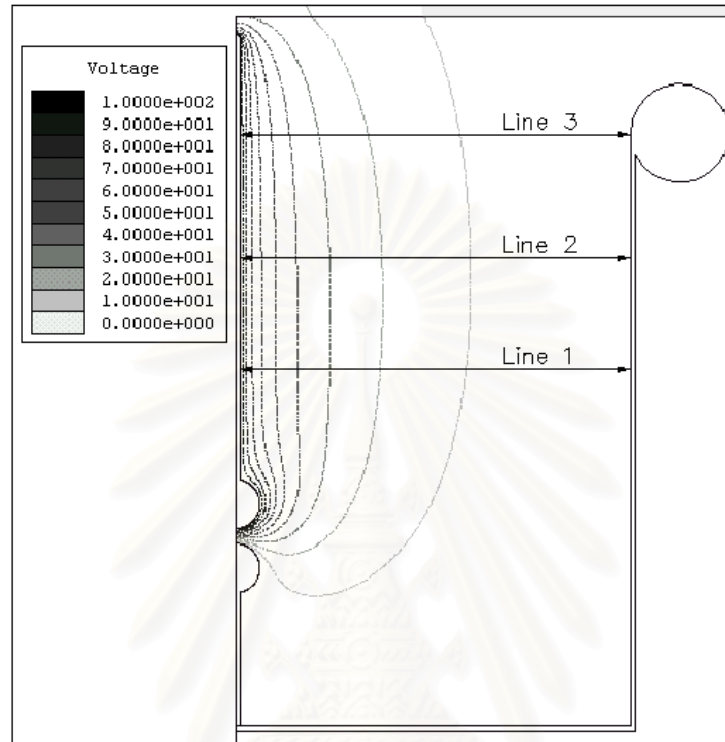
เส้นผ่าน ศูนย์กลาง( cm.)	ขอบเขตขนาดการผิดเพี้ยนเป็นทอร์รี่ (%)			
	เมื่อเทียบการคำนวณ		เมื่อเทียบกับ IEC52	
	ทอร์รี่แวนอน	ทอร์รี่แวนอนตั้ง	ทอร์รี่แวนอน	ทอร์รี่แวนอนตั้ง
10	7.0	5.5	14.5	2.5
15	6.0	4.5	11.0	2.5
25	5.0	4.0	10.0	2.0
50	4.0	3.5	5.5	2.5
75	4.0	3.5	4.0	3.0
100	3.5	3.5	4.0	2.0
150	3.5	3.5	2.0	4.5

#### 4.1.2.3 สรุปผลการจำลอง

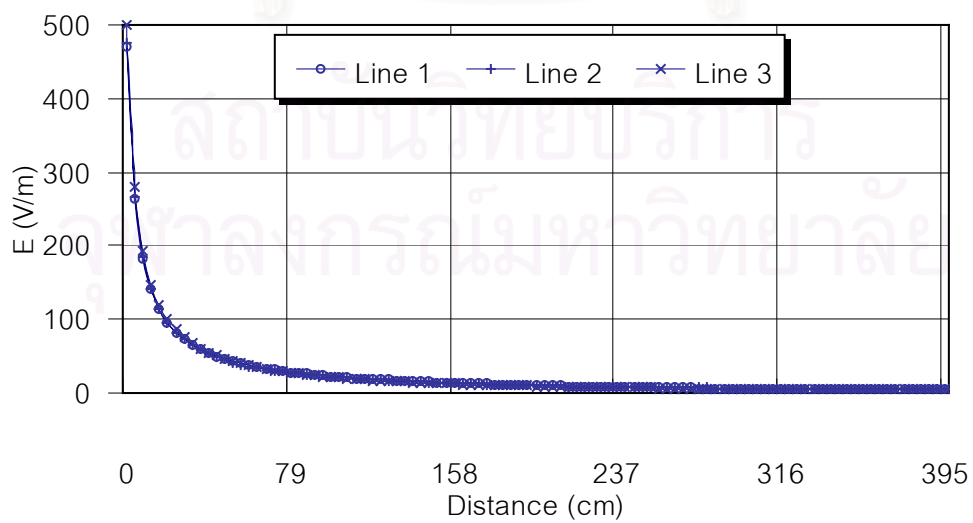
รูปทรงของการบิดเบี้ยวเป็นทรงรีที่ใช้ในการหาขอบเขตการบิดเบี้ยวสำหรับทรงรี  
 แนวนอนจะมีรูปทรงตามรูปที่ 3.7ค โดยการบิดเบี้ยวเป็นทรงรีแนวนอนที่ลูกแรงสูงทำให้แรงดัน  
 เบรกดาวน์เพิ่มขึ้นและที่ระยะห่าง(%S/D)สูงสุดจะเป็นกรณีที่ทำให้%U<sub>b</sub>มากที่สุด การบิดเบี้ยวเป็น  
 ทรงรีแนวตั้งจะมีรูปทรงตามรูปที่ 3.7ง โดยการบิดเบี้ยวเป็นทรงรีแนวตั้งที่ลูกแรงสูงจะทำให้แรงดัน  
 เบรกดาวน์ลดลง และที่ระยะห่าง(%S/D)สูงสุดจะเป็นกรณีที่ทำให้%U<sub>b</sub>มากที่สุด ได้ทรงกลม 150  
 เซนติเมตรเป็นทรงกลมที่ทำให้%U<sub>b</sub>ที่เทียบกับการคำนวณมากที่สุดเมื่อเกิดการบิดเบี้ยวเป็นทรงรี  
 ทั้งแนวนอนและแนวตั้ง และมีขอบเขตการบิดเบี้ยวเป็นทรงรีที่เทียบกับการคำนวณเป็น 3.5% ทั้ง  
 สองแนว ส่วนขอบเขตการบิดเบี้ยวที่เทียบกับIEC52 จะได้ทรงกลม 150 เซนติเมตรมีขนาดการบิด  
 เบี้ยวเป็นทรงรีแนวนอนน้อยที่สุด คือ 2% และทรงกลมขนาด 25 และ 100 เซนติเมตร มีขนาดการ  
 บิดเบี้ยวเป็นทรงรีแนวตั้งน้อยที่สุด คือ 2% ขอบเขตที่ใช้กำหนดความคลาดเคลื่อนของเส้นผ่าน  
 ศูนย์กลางทรงกลมควรเป็นขอบเขตที่เทียบกับการคำนวณด้วยกันจึงให้ความคลาดเคลื่อนที่ถูก  
 ต้อง ดังนั้นจึงได้ขอบเขตความคลาดเคลื่อนของเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 3.5% ซึ่งมากกว่าเงื่อนไข  
 ไขการสร้างและใช้ช่องว่างทรงกลมที่ระบุในมาตรฐาน IEC52 ที่กล่าวว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  
 ทรงกลมจะคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน 2% ของค่าที่ระบุ

## 4.2 แบบจำลองกลุ่มที่ 2 วิเคราะห์ก้านยึดทรงกลม

### 4.2.1 ผลการจำลอง



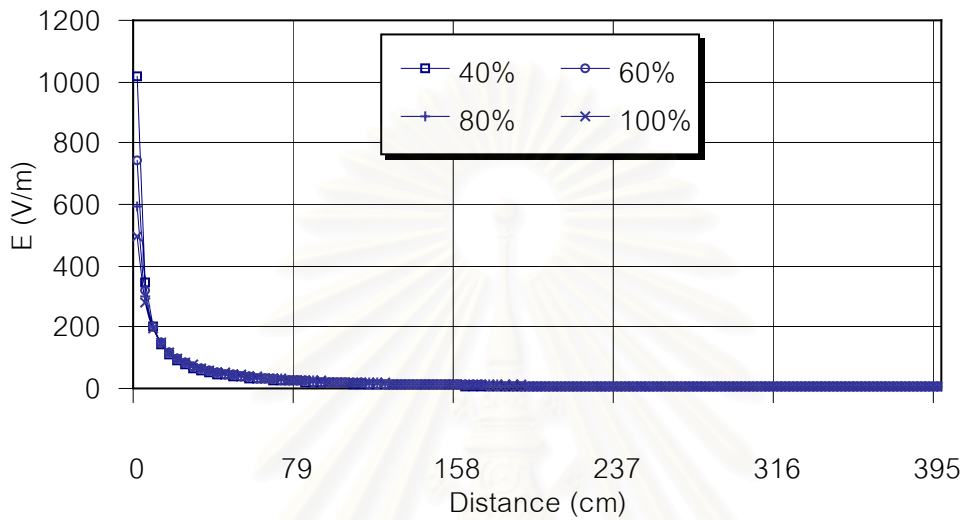
รูปที่ 4.46 แสดงเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าและแนวเส้นตรงที่ใช้พิจารณาค่าแรงดันเริ่มเกิดบนก้านยึดทรงกลม,  $D = 50$  เซนติเมตร และ  $S = 15$  เซนติเมตร



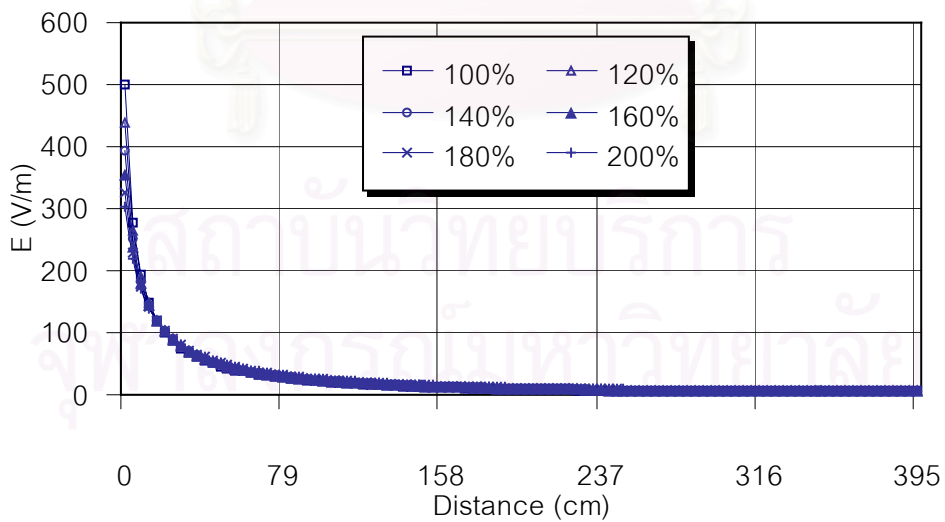
รูปที่ 4.47 กราฟแสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวเส้นตรงในรูปที่ 4.46

ตารางที่ 4.3 ค่าแรงดันเริ่มเกิดที่บริเวณก้านยึดทรงกลมที่แนวเส้นตรงต่างๆตามรูปที่ 4.46

	Line 1	Line 2	Line 3
แรงดันเริ่มเกิดบริเวณก้านยึดทรงกลม (kV)	704.829	699.685	667.372



รูปที่ 4.48 กราฟแสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างก้านยึดทรงกลมกับภาชนะที่บรรจุน้ำตามLine3, ขนาดก้านยึดทรงกลม 40, 60, 80 และ100%ของ0.2D



รูปที่ 4.49 กราฟแสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างก้านยึดทรงกลมกับภาชนะที่บรรจุน้ำตามLine3, ขนาดก้านยึดทรงกลม 120, 140, 160, 180 และ200%ของ0.2D



ตารางที่ 4.4 ค่าแรงดันเบรกดาวนจ์จากการคำนวณ, %Ub และแรงดันเริ่มเกิดระหว่างก้านยึดทรงกลมกับภาชนะบรรจุตามLine3 ที่ขนาดก้านยึดทรงกลมต่างๆ, D = 50 cm และ S = 15 cm

ขนาดก้านยึดทรงกลม (%ของ0.2เท่าของD)	แรงดันเริ่มเกิดที่ ก้านยึดทรงกลม (kV)	แรงดันเบรกดาวนจ์ของ ทรงกลม, Ub (kV)	%Ub (IEC52) (%)
40	359.476	364.327	-0.665
60	471.306	364.390	-0.648
80	568.788	364.432	-0.636
100	667.367	364.460	-0.628
120	744.319	364.560	-0.601
140	824.057	364.659	-0.574
160	898.664	364.664	-0.573
180	968.465	364.715	-0.559
200	1037.054	364.975	-0.488

ตารางที่ 4.5 ค่าแรงดันเริ่มเกิดระหว่างก้านยึดทรงกลมกับภาชนะบรรจุตามLine3 ที่ขนาดก้านยึดทรงกลมต่างๆของทรงกลม 10, 50 และ150 cm ที่ระยะห่างมากที่สุด

เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	ระยะห่าง (cm)	ขนาดก้านยึด ทรงกลม(%0.2D)	แรงดันเริ่มเกิดที่ ก้านยึดทรงกลม(kV)	แรงดันเบรกดาวนจ์ของทรง กลมจากการคำนวณ (kV)
10	5	40	95.775	118.818
		50	109.869	
		60	123.192	
		80	147.072	
50	24	40	359.376	502.287
		60	471.382	
		70	522.238	
		80	570.936	
150	75	40	932.438	1436.722
		60	1234.472	
		70	1374.229	
		80	1504.576	

ตารางที่ 4.6 ค่าแรงดันเบรกดาวร์และ%U<sub>b</sub>โดยเทียบกับการคำนวณเมื่อก้านยึดทรงกลมมีขนาด 180%ของ0.2Dที่ทรงกลมขนาด 10, 50 และ 150 cm.

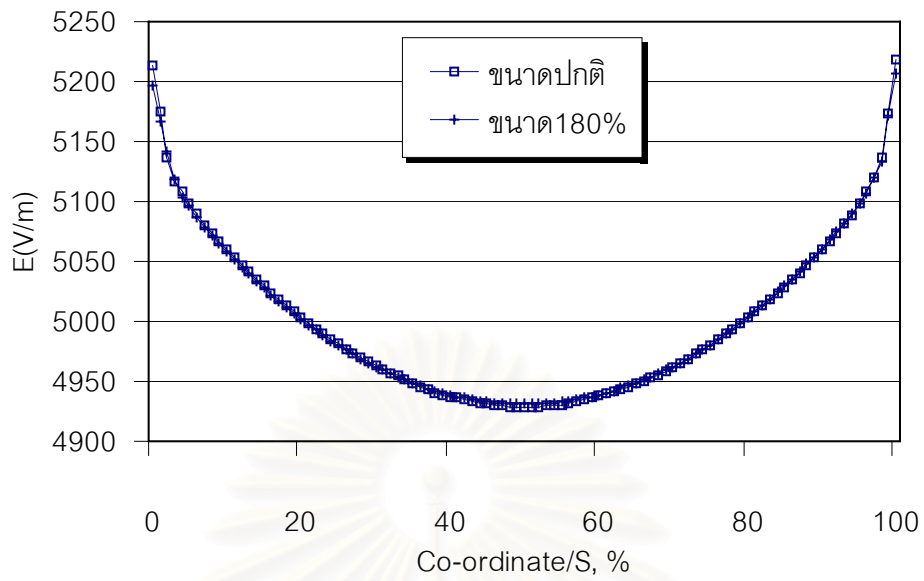
เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	ระยะห่าง (cm.)	แรงดันเบรกดาวร์ของทรงกลม		%U <sub>b</sub> (เทียบกับการคำนวณ) (%)
		ขนาดก้านมาตรฐาน (kV)	ขนาดก้าน(180%) (kV)	
10	0.5	16.743	16.744	0.007
	2.6	72.311	72.331	0.028
	5	118.818	119.324	0.426
50	2	57.585	57.587	0.005
	15	364.490	364.710	0.060
	24	502.287	504.388	0.418
150	5	136.945	136.962	0.012
	36	868.400	868.949	0.063
	75	1436.722	1442.119	0.376

ตารางที่ 4.7 ค่าแรงดันเบรกดาวร์และ%U<sub>b</sub>โดยเทียบกับการคำนวณเมื่อก้านยึดทรงกลมมีขนาด 120 ถึง 200%ของ0.2Dที่ระยะห่างมากที่สุดของทรงกลมแต่ละขนาด

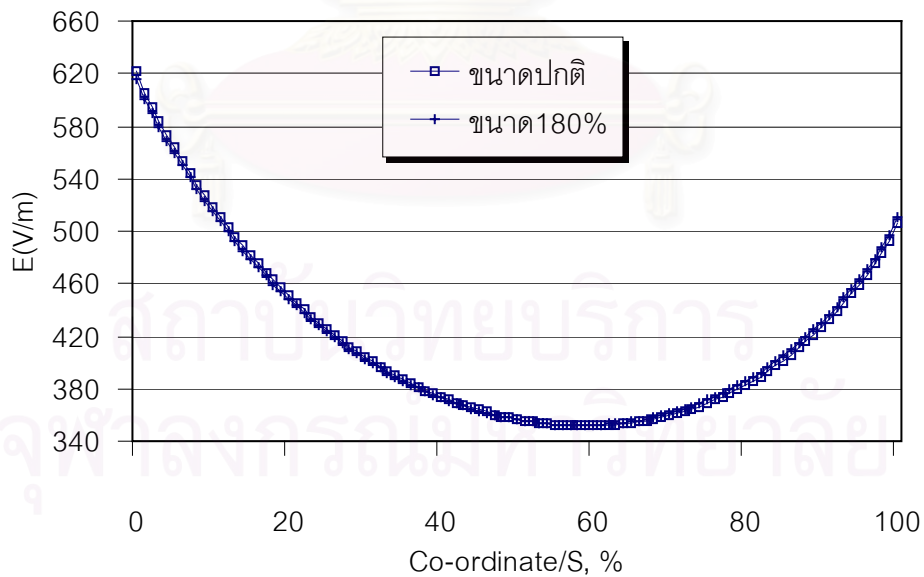
เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	ระยะห่าง (cm.)	แรงดันเบรกดาวร์ ทรงกลมมาตรฐาน จากการคำนวณ (kV)	ขนาดก้านยึดทรงกลม (%ของ0.2D) (%)	แรงดันเบรกดาวร์ ที่ขนาดก้านต่างๆ (kV)	%U <sub>b</sub> เทียบกับการ คำนวณ (%)
10	5	118.818	120	118.984	0.140
			140	119.131	0.264
			180	119.324	0.422
			200	119.332	0.432
15	7.5	171.364	120	171.623	0.151
			140	171.768	0.236
			180	171.879	0.300
			200	172.099	0.429

ตารางที่ 4.7(ต่อ) ค่าแรงดันเบรกดาว์นและ%Ubโดยเทียบกับการคำนวณเมื่อก้านยึดทรงกลมมีขนาด 120 ถึง 200%ของ0.2Dที่ระยะห่างมากที่สุดของทรงกลมแต่ละขนาด

เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	ระยะห่าง (cm.)	แรงดันเบรกดาว์นทรงกลมมาตรฐานจากการคำนวณ (kV)	ขนาดก้านยึดทรงกลม (%ของ0.2D) (%)	แรงดันเบรกดาว์นที่ขนาดก้านต่างๆ (kV)	%Ubเทียบกับการคำนวณ (%)
25	12	265.817	120	266.267	0.169
			140	266.478	0.249
			180	266.890	0.361
			200	267.106	0.485
50	24	502.287	120	502.833	0.109
			140	503.400	0.222
			180	504.388	0.418
			200	504.590	0.458
75	36	734.196	120	735.039	0.115
			140	735.648	0.198
			180	737.020	0.385
			200	737.685	0.475
100	50	981.449	120	982.323	0.089
			140	983.368	0.196
			180	985.442	0.407
			200	986.233	0.488
150	75	1436.722	120	1438.062	0.093
			140	1439.489	0.193
			180	1442.119	0.376
			200	1443.141	0.447



รูปที่ 4.50 กราฟการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าของทรงกลมที่ก้านยึดทรงกลม  
ขนาดปกติและ180%ของ0.2D, D = 50 เซนติเมตร และ S = 2 เซนติเมตร



รูปที่ 4.51 กราฟการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าของทรงกลมที่ก้านยึดทรงกลม  
ขนาดปกติและ180%ของ0.2D, D = 50 เซนติเมตร และ S = 24 เซนติเมตร

#### 4.2.2 วิเคราะห์ผลการจำลอง

จากรูปที่ 4.46 ได้ทำการศึกษาหาบริเวณต่างๆของก้านยึดทรงกลมว่าบริเวณใดจะมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงที่สุดซึ่งทำให้มีโอกาสเกิดเบรกดาวน์แบบไม่สมบรูณ์หรือโคโรนาได้มากที่สุด โดยเลือกแนวเส้นตรงที่จะทำการเก็บข้อมูลความเครียดสนามไฟฟ้าเพื่อหาแรงดันเริ่มเกิด (Ui) ทั้งหมด 3 แนว เริ่มจากบริเวณก้านยึดทรงกลมที่ใกล้ทรงกลมลูกแรงดันสูง คือ Line1 จนถึงบริเวณแนวระดับเดียวกับปากของที่ภาชนะบรรจุคือ Line3 ได้การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวต่างๆดังรูปที่ 4.47 จะเห็นได้ว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าตามLine3ที่ใกล้บริเวณผิวก้านยึดทรงกลมมีค่าสูงที่สุด และที่ Line1 มีค่าต่ำที่สุด และเมื่อคำนวณหาแรงดันเริ่มเกิดได้ผลออกมดั่งตารางที่ 4.3 โดยค่าแรงดันเริ่มเกิดมีค่ามากที่สุดที่ Line1 และมีค่าลดลงไปเรื่อยๆเมื่อห่างจากทรงกลมออกไปจนถึง Line3 ซึ่งมีค่าแรงดันเริ่มเกิดน้อยที่สุด แสดงว่า Line3 จะมีโอกาสเกิดเบรกดาวน์แบบไม่สมบรูณ์หรือโคโรนามากที่สุดและจะใช้ในการหาขนาดก้านยึดทรงกลมที่เล็กที่สุดที่ไม่เกิดโคโรนาต่อไป

เมื่อพิจารณาขนาดของก้านยึดทรงกลมกับผลกระทบต่อแรงดันเริ่มเกิดและการเกิดโคโรนา ในรูปที่ 4.48และ4.49 แสดงการกระจายของความเครียดสนามไฟฟ้ากรณีก้านยึดทรงกลมเล็กกว่ามาตรฐาน( $<0.2D$ )และใหญ่กว่ามาตรฐาน( $>0.2D$ ) เห็นได้ว่าที่ก้านยึดทรงกลมเล็กๆความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณใกล้ก้านยึดทรงกลมจะมีค่ามากและแรงดันเริ่มเกิดจะมีค่าน้อยดังตารางที่ 4.4 แรงดันเริ่มเกิดของก้านยึดทรงกลมขนาด40%มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 359.476 kV ในทางเดียวกันเมื่อเพิ่มขนาดก้านยึดทรงกลมให้ใหญ่กว่ามาตรฐาน ( $>0.2D$ ) ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณใกล้ก้านยึดทรงกลมจะมีค่าลดลงดังรูปที่ 4.46 และแรงดันเริ่มเกิดมีค่าเพิ่มขึ้นดังตารางที่ 4.4 และจากตารางนี้ค่าแรงดันเบรกดาวน์ระหว่างช่องว่างทรงกลมจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดก้านยึดทรงกลมเพิ่มขึ้นแต่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเห็นได้จาก%Ubที่ขนาดก้านยึดทรงกลม200%ของ 0.2Dจะเพิ่มขึ้นจากที่ขนาดก้านยึดทรงกลม0.2Dเพียง0.140%เท่านั้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าขนาดก้านยึดทรงกลมมีผลกระทบต่อแรงดันเบรกดาวน์ระหว่างช่องว่างทรงกลมเพียงเล็กน้อย

เมื่อก้านยึดทรงกลมมีขนาดเล็กจะให้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงบริเวณใกล้ๆก้านยึดทรงกลมและมีความไม่สม่ำเสมอสูงซึ่งมีผลต่อการเกิดโคโรนาขึ้นที่ก้านยึดทรงกลมได้ โดยวิธีที่จะใช้พิจารณาการเกิดโคโรนาคือ เปรียบเทียบแรงดันเริ่มเกิดที่บริเวณระหว่างก้านยึดทรงกลมกับภาชนะบรรจุที่คำนวณได้กับแรงดันเบรกดาวน์ที่ช่องว่างทรงกลม ถ้าแรงดันเริ่มเกิดที่ก้านยึดทรงกลมมีค่าน้อยกว่าก็จะมีโอกาสเกิดโคโรนาที่ก้านยึดทรงกลมได้ ดังนั้นจึงทำการจำลองทรงกลม 3 ขนาด คือ 10, 50 และ 150 เซนติเมตร ที่ระยะห่างมากที่สุด คือ 5, 24 และ 75 เซนติเมตร ตาม

ลำดับ ซึ่งที่ระยะห่างนี้จะมีค่าแรงดันเบรกดาวนสูงที่สุดทำให้มีโอกาสเกิดโคโรนามากที่สุด ได้ผลตามตารางที่ 4.5 ทรงกลม 10 เซนติเมตร แรงดันเริ่มเกิดที่ก้านยึดทรงกลมมากกว่าแรงดันเบรกดาวนที่ทรงกลมเมื่อก้านยึดทรงกลมมีขนาดเล็กที่สุดเป็น 60 % , ทรงกลม 50 เซนติเมตร แรงดันเริ่มเกิดที่ก้านยึดทรงกลมจะมากกว่าเมื่อก้านยึดทรงกลมมีขนาดเล็กที่สุดเป็น 70 % และทรงกลม 150 เซนติเมตร แรงดันเริ่มเกิดจะมากกว่าเมื่อก้านยึดทรงกลมมีขนาดเล็กที่สุดเป็น 80 % ของ 0.2D และมีขนาดใหญ่ที่สุดที่ยังไม่เกิดโคโรนาเมื่อเทียบกับทรงกลมอีก 2 ลูก เพราะวาระยะห่างระหว่างก้านยึดทรงกลมกับภาชนะทรงกระบอกที่ล้อมรอบที่ใช้ในแบบจำลองดังรูปที่ ค.1 มีค่าเป็น  $2A$  ค่า  $A$  ดูได้จากตารางที่ ค.1 ซึ่งมีค่าเป็น  $3D$  ที่ทรงกลม 150 เซนติเมตร ซึ่งเป็นอัตราส่วนต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $A/D=3$ ) ที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับทรงกลมที่ขนาดเล็กกว่าดังแสดงในตารางที่ ค.1 จึงทำให้มีโอกาสเกิดโคโรนามากที่สุด ดังนั้นขนาดของก้านยึดทรงกลมที่เล็กที่สุดที่ไม่เกิดโคโรนาเป็น 80% ของ 0.2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลม หรือเท่ากับ 0.16 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลม

เมื่อก้านยึดทรงกลมมีขนาดใหญ่ขึ้นจะให้แรงดันเบรกดาวนของช่องว่างทรงกลมมากขึ้น ดังนั้นจึงทำการศึกษาค้นคว้าเพื่อหาผลกระทบนี้จนถึงก้านยึดทรงกลมขนาด 200% ของ 0.2D จากตารางที่ 4.6 ที่ขนาดก้านยึดทรงกลม 180% จะเห็นได้ว่าทรงกลมทั้ง 3 ขนาดจะให้  $\%U_b$  สูงสุดที่ระยะห่างมากที่สุด เพราะที่ระยะห่างน้อยๆ ดังรูปที่ 4.50 อยู่ในสถานะที่ 1 ซึ่งใช้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าตลอดทั้งช่วงหาแรงดันเบรกดาวน และที่ระยะห่างน้อยกว่า 35% และมากกว่า 95% ของระยะห่าง ความเครียดสนามไฟฟ้าของกรณีก้านยึดทรงกลมมีขนาด 180% จะน้อยกว่าที่ก้านยึดทรงกลมขนาดปกติส่วนบริเวณที่เหลือมีค่ามากกว่า แต่ที่ระยะห่างมากๆ ดังรูปที่ 4.51 ซึ่งอยู่ในสถานะที่ 3 จะใช้ความเครียดสนามไฟฟ้าเฉพาะช่วงใกล้ลูกแรงสูงหาแรงดันเบรกดาวน ซึ่งมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของกรณีก้านยึดทรงกลม 180% จะน้อยกว่าตลอด ดังนั้นจากตารางที่ 4.7 แสดง  $\%U_b$  ที่เทียบกับการคำนวณที่ระยะห่างมากที่สุดของทรงกลมทุกขนาดตั้งแต่ขนาดก้านยึดทรงกลม 120 ถึง 200% พบว่า  $\%U_b$  มีค่ามากที่สุดไม่เกิน 0.5% และ  $\%U_b$  ของทรงกลมทุกขนาดในรูปที่ 3.3 ที่ระยะห่างมากที่สุดมีค่าไม่เกิน 2% ดังนั้นเมื่อนำมารวมกันจะได้  $\%U_b$  เทียบกับมาตรฐาน IEC52 มีค่าไม่เกิน 2.5% จึงทำให้ก้านยึดทรงกลมขนาด 200% ของ 0.2D หรือ 0.4 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลมเป็นขอบเขตของขนาดก้านยึดทรงกลมที่ใหญ่ที่สุดที่ยังสามารถใช้ค่าใน IEC52 ได้

### 4.2.3 สรุปผลการจำลอง

ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณก้านยึดทรงกลมมีความไม่สม่ำเสมอสูงและมีค่าสูงมากโดยจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อก้านยึดทรงกลมมีขนาดเล็กลง มาตรฐาน IEC52 ได้กำหนดว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของก้านยึดทรงกลมต้อง  $\leq 20\%$  ของเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลม และจากการจำลองได้ขนาดก้านยึดทรงกลมเล็กที่สุดที่ไม่เกิดโคโรนาของทรงกลมขนาด 150 เซนติเมตร มีขนาดใหญ่ที่สุด คือ  $16\%$  ของเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลม และเมื่อก้านยึดทรงกลมมีขนาดใหญ่ขึ้น แรงดันเบรกดาวนีย์ของช่องว่างทรงกลมจะสูงขึ้นเล็กน้อย โดยที่ทรงกลม 150 เซนติเมตรซึ่งมีค่า  $\%U_b$  สูงที่สุดจะได้ค่า  $\%U_b$  ที่เทียบกับ IEC52 ที่ขนาดก้านยึดทรงกลมเป็น  $40\%$  ของเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลมเพิ่มขึ้นจากที่ขนาดก้านยึดทรงกลมปกติแต่ยังไม่เกิน  $2.5\%$  ดังนั้นขอบเขตของขนาดก้านยึดทรงกลมที่ยังสามารถใช้ตารางใน IEC52 ได้จะอยู่ในช่วง  $16$  ถึง  $40\%$  ของเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลม



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุป

การศึกษาวิจัยหาขอบเขตทางโครงสร้างของทรงกลมที่ยังสามารถใช้ค่าแรงดันเบรกดาว์นของตารางในIEC52ได้ โดยใช้วิธีการชิมมูลเพื่อหาความเครียดสนามไฟฟ้าซึ่งใช้เป็นข้อมูลหาแรงดันเริ่มเกิดหรือแรงดันเบรกดาว์นของช่องว่างทรงกลมที่มีลักษณะการผิดเพี้ยนต่างๆกัน จะได้ผลสรุปของการจำลองดังนี้

1. การเกิดรอยบวมที่จุดเกิดประกายไฟจะทำให้แรงดันเบรกดาว์นน้อยลง โดยการเกิดรอยบวมบนลูกต่อลงดินที่%S/Dน้อยที่สุดของทรงกลม25เซนติเมตรทำให้แรงดันเบรกดาว์นคลาดเคลื่อนมากที่สุด และการเกิดรอยบวมขนาดไม่เกิน 0.2% จะยังคงใช้ตารางในIEC52ได้

2. การผิดเพี้ยนเป็นทรงรีแนวนอนจะทำให้แรงดันเบรกดาว์นสูงขึ้นและการผิดเพี้ยนเป็นทรงรีแนวตั้งจะทำให้แรงดันเบรกดาว์นน้อยลง โดยการผิดเพี้ยนเป็นทรงรีบนทรงกลมลูกแรงสูงในช่วง%S/Dมากกว่า30%จะทำให้แรงดันเบรกดาว์นคลาดเคลื่อนมากที่สุด โดยขอบเขตการผิดเพี้ยนเป็นทรงรีทั้งแนวนอนและแนวตั้งคือ 3.5%

3. ขนาดก้านยึดทรงกลมเล็กๆจะมีโอกาสเกิดโคโรนาสูงขึ้น แรงดันเบรกดาว์นของช่องว่างทรงกลมที่ก้านยึดทรงกลมมีขนาดใหญ่จะสูงขึ้นเล็กน้อย ดังนั้นขนาดก้านยึดทรงกลมที่ไม่เล็กเกินไปจนเกิดโคโรนาและยังสามารถใช้ตารางในIEC52ได้ คือ 16ถึง40%ของเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลม

#### 5.2 ประโยชน์ที่ได้รับ

1) สามารถใช้ช่องว่างทรงกลมได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นดังนี้ เมื่อทรงกลมเกิดรอยบวมขนาดเล็กกว่า0.2%จะยังสามารถนำมาใช้ได้ ทรงกลมที่มีขนาดใหญ่ๆซึ่งสร้างยากและมีโอกาสเกิดความคลาดเคลื่อนของเส้นผ่านศูนย์กลางสูง จะสร้างได้ง่ายขึ้นเพราะขอบเขตความคลาดเคลื่อนของทรงกลมที่จำลองได้มีค่าเป็น3.5%ซึ่งมากกว่าที่ระบุในIEC และจากมาตรฐานที่ระบุว่าก้านยึดทรงกลมมีขนาดไม่เกิน20%ของเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลม แต่จากผลการจำลองพบว่าขนาดก้านเล็กเกิน 16%ของเส้นผ่านศูนย์กลาง จะมีโอกาสเกิดโคโรนาได้

2) ได้ข้อมูลที่ใช้ในการกำหนดขอบเขตทางโครงสร้างของช่องว่างทรงกลม ซึ่งอาจใช้ในการปรับปรุงมาตรฐาน IEC52 ต่อไปได้



### 5.3 ข้อเสนอแนะ

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเงื่อนไขการก่อสร้างและการใช้ช่องว่างทรงกลมที่ระบุใน IEC52: 1960 จากในบทที่3 กับเงื่อนไขขอบเขตทางโครงสร้างที่ได้จากการจำลองตามข้อสรุปข้างต้นจะได้ผลดังนี้

1. ในIECกล่าวว่าบริเวณจุดเกิดประกายไฟต้องไม่มีรอย เมื่อพิจารณากับการเกิดรอยบุบ จะได้ขอบเขตการเกิดรอยบุบเป็น  $\leq 0.2\%$  ของเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลม ดังนั้นควรแก้ไขมาตรฐานเป็นบริเวณจุดเกิดประกายไฟมีขนาดรอยบุบได้ไม่เกิน  $0.2\%$  ของเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลม

2. ในมาตรฐานกล่าวว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน  $2\%$  ของค่าที่ระบุ เมื่อพิจารณากับการบิดเบี้ยวเป็นทรงรีซึ่งได้ขอบเขตการบิดเบี้ยวเป็นทรงรีแนวนอนและแนวตั้งเป็น  $3.5\%$  ของค่าที่ระบุไว้ ดังนั้นควรแก้ไขมาตรฐานเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลมคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน  $3.5\%$  ของค่าที่ระบุ

3. ในIECกล่าวว่าขนาดก้านยึดทรงกลมต้องมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $\leq 20\%$  ของเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลม เมื่อพิจารณากับผลการจำลองจะได้ก้านยึดทรงกลมมีขนาดระหว่าง  $16$  ถึง  $40\%$  ของเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลม ดังนั้นจึงควรแก้ไขมาตรฐานเป็นขนาดก้านยึดทรงกลมต้องมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง  $16$  ถึง  $40\%$  ของเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลม

4. จากผลการจำลองพบว่าเมื่อพิจารณาความคลาดเคลื่อนของแรงดันเบรกดาวร์ โดยเทียบกับค่าจากการคำนวณ(ตารางที่ ข.2) จะได้ขอบเขตของขนาดรอยบุบบริเวณจุดเกิดประกายไฟเป็นขนาดไม่เกิน  $0.3\%$  ซึ่งมีขอบเขตที่มากกว่าที่เทียบกับมาตรฐาน IEC52 และเนื่องจากค่าแรงดันเบรกดาวร์จากตารางที่1ในIEC52หลายๆช่วงควรได้รับการแก้ไข ดังนั้นจึงควรปรับค่าแรงดันเบรกดาวร์ในมาตรฐาน IEC52 เป็นค่าแรงดันเบรกดาวร์ที่ได้จากการคำนวณตามตารางที่ ข.2 ซึ่งจะทำให้ขอบเขตทางโครงสร้างของทรงกลมมีค่ามากขึ้น

## รายการอ้างอิง

1. IEC Publication 52 (1960), Second Edition, "Recommendations for Voltage Measurement by Means of Sphere-gaps (One Sphere Earthed)".
2. Matthew N.O. SADIKU, "Numerical Techniques in Electromagnetics", CRC Press Ltd., 1992.
3. สำรวัย สังข์สะอาด, "วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง", ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2528.
4. K. Petcharaks, "Applicability of the streamer breakdown criterion to inhomogeneous gas gaps", Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, 1995.
5. K. Petcharaks and W.S. Zaengl, "Numerical Calculation of Breakdown Voltages of Standard Air Gaps (IEC52) Based on Streamer Breakdown Criteria", High Voltage Engineering Symposium "22-27 Aug.
6. คมสัน เพ็ชรรักษ์, "การคำนวณหาสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดแรงสูงด้วยวิธีไฟไนต์อีเลเมนต์", ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2529.
7. IEC Publication 60052, Third Edition, "Recommendations for Voltage Measurement by Means of Standard Air Gaps".
8. Ansoft, "Maxwell 2D Field Simulator Handbook", Ansoft Corporation, 1994
9. Constantine A. Balanis, "Advanced Engineering Electromagnetic", John Wiley & Sons, Inc., 1989.
10. E. Kuffel, W.S. Zaengl and J.Kuffel, "High Voltage Engineering", 2<sup>nd</sup> ed., Butterworth-Heinemann., 2000.
11. H. Raether, "Electron Avalanches and Breakdown in Gases", Butterworth&Co. (Publishers) Ltd., 1964.



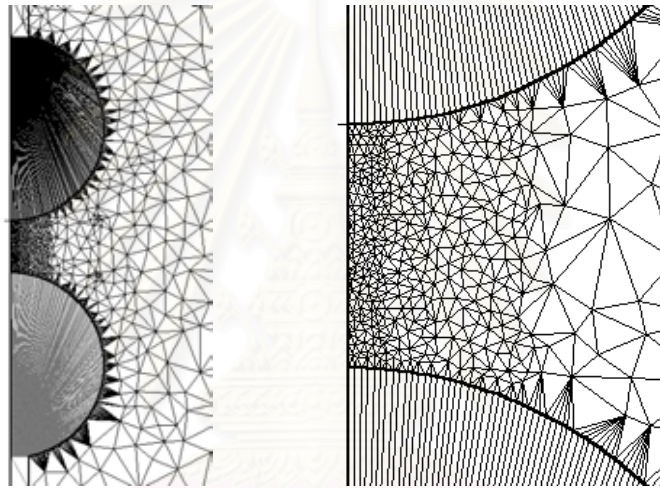
ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

### การวิเคราะห์ปัญหาสนามไฟฟ้าสถิตด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การแก้ปัญหาค่าสนามไฟฟ้า 3 มิติส่วนใหญ่สามารถแทนด้วยสนามไฟฟ้า 2 มิติ หากสนามไฟฟ้านั้นมีสภาพสมมาตรตามระยะทางหรือรอบแกนหมุน จากนั้นจึงแบ่งบริเวณที่สนามไฟฟ้าที่สนใจเป็นสามเหลี่ยมย่อยๆ (element) ดังรูปที่ ก.1 แสดงการแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลองช่องว่างทรงกลมที่มีสภาพสมมาตรรอบแกนหมุนจากโปรแกรม Maxwell 2D โดยประมาณค่าแรงดันที่ตำแหน่งต่างๆ ในสามเหลี่ยมเป็นฟังก์ชันพหุนามลำดับต่างๆ ในที่นี้จะยกตัวอย่างลำดับที่หนึ่งดังสมการที่ ก.1 และ ก.2



รูปที่ ก.1 แสดงการแบ่งสนามไฟฟ้าออกเป็นสามเหลี่ยมย่อยๆ ของแบบจำลองช่องว่างทรงกลม

$$V_e(x, y) = a + bx + cy \quad (\text{ก.1})$$

$$V_e(x, y) = \sum_{i=1}^3 \alpha_i(x, y) V_{ei} \quad (\text{ก.2})$$

โดยที่

$$\alpha_1 = \frac{1}{2A} [(x_2 y_3 - x_3 y_2) + (y_2 - y_3)x + (x_3 - x_2)y] \quad (\text{ก.3.a})$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{2A} [(x_3 y_1 - x_1 y_3) + (y_3 - y_1)x + (x_1 - x_3)y] \quad (\text{ก.3.b})$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{2A} [(x_1 y_2 - x_2 y_1) + (y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y] \quad (\text{ก.3.c})$$

$$A = \frac{1}{2} [(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)] \quad (\text{ก.4})$$

พลังงานศักย์สะสมต่อหน่วยความยาวในสามเหลี่ยมใดๆเป็นตามสมการที่ ก.5

$$W_e = \frac{1}{2} \int \epsilon |E|^2 ds = \frac{1}{2} \int \epsilon |\nabla V_e|^2 ds \quad (\text{ก.5})$$

โดยที่ผลรวมของพลังงานศักย์สะสมจะมีค่าน้อยที่สุดดังนั้นดิฟเฟอเรนเชียลของ  $W_e$  จะเท่ากับศูนย์ และใช้เงื่อนไขขอบเขตแบบDirichlet คือ กำหนดให้ศักย์ไฟฟ้าเป็นค่าคงที่บริเวณขอบเขต ส่วนศักย์ไฟฟ้าในตำแหน่งที่ไม่ทราบหาได้จากสมการที่ ก.6 ก็จะสามารถทราบค่าแรงดันในบริเวณที่ต้องการทั้งหมด

$$\frac{\partial W_e}{\partial V_k} = 0 \quad (\text{ก.6})$$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข

## แรงดันเบรกดาวนซ์ของช่องว่างทรงกลม

ตารางที่ ข.1 แรงดันเบรกดาวนซ์ของช่องว่างทรงกลมจากตารางที่ 1 ของ IEC-52: 1960

Gap, Cm	Sphere diameter, cm											
	2	5	6.25	10	12.5	15	25	50	75	100	150	200
0.50	2.8											
0.10	4.7											
0.15	6.4											
0.20	8.0	8.0										
0.25	9.6	9.6										
0.3	11.2	11.2										
0.4	14.4	14.3	14.2									
0.5	17.4	17.4	17.2	16.8	16.8	16.8						
0.6	20.4	20.4	20.2	19.9	19.9	19.9						
0.7	23.2	23.4	23.2	23.0	23.0	23.0						
0.8	25.8	26.3	26.2	26.0	26.0	26.0						
0.9	28.3	29.2	29.1	28.9	28.9	28.9						
1.0	30.7	32.0	31.9	31.7	31.7	31.7	31.7					
1.2		37.6	37.5	37.4	37.4	37.4	37.4					
1.4		42.9	42.9	42.9	42.9	42.9	42.9					
1.5		45.5	45.5	45.5	45.5	45.5	45.5					
1.6		48.1	48.1	48.1	48.1	48.1	48.1					
1.8		53.0	53.5	53.5	53.5	53.5	53.5					
2.0		57.5	58.5	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0			
2.2		61.5	63.0	64.5	64.5	64.5	64.5	64.5	64.5			
2.4		65.5	67.5	69.5	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0			
2.6			72.0	74.5	75.0	75.5	75.5	75.5	75.5			
2.8			76.0	79.5	80.0	80.5	81.0	81.0	81.0			
3.0			79.5	84.0	85.0	85.5	86.0	86.0	86.0	86.0		
3.5				95.0	97.0	98.0	99.0	99.0	99.0	99.0		
4.0				105	108	110	112	112	112	112		
4.5				115	119	122	125	125	125	125		
5.0				123	129	133	137	138	138	138	138	
5.5					138	143	149	151	151	151	151	
6.0					146	152	161	164	164	164	164	



ตารางที่ ข.2 แรงดันเบรกดาวนซ์ของช่องว่างทรงกลมจากการคำนวณ

Gap, Cm	Sphere diameter, cm							
	10	15	25	50	75	100	150	200
0.5	16.743	16.747						
0.6	19.573	19.577						
0.7	22.366	22.374						
0.8	25.134	25.145						
0.9	27.881	27.898						
1.0	30.610	30.632	30.646					
1.2	36.019	36.063	36.087					
1.4	41.377	41.447	41.488					
1.5	44.036	44.129	44.176					
1.6	46.684	46.803	46.861					
1.8	51.951	52.119	52.208					
2.0	57.184	57.416	57.535	57.587	57.598			
2.2	62.363	62.687	62.846	62.916	62.932			
2.4	67.438	67.935	68.139	68.239	68.248			
2.6	72.311	73.150	73.421	73.552	73.564			
2.8	76.988	78.437	78.682	78.841	78.865			
3.0	81.620	83.466	83.935	84.132	84.160	84.171		
3.5	92.280	95.744	97.016	97.327	97.376	97.419		
4.0	102.058	107.331	109.941	110.473	110.561	110.621		
4.5	111.148	118.383	122.442	123.608	123.722	123.813		
5.0	118.818	128.826	134.571	136.704	136.854	136.972	136.945	
5.5		138.639	146.386	149.766	149.982	150.099	150.112	
6.0		147.805	157.856	162.708	163.084	163.215	163.249	
6.5		156.335	168.910	175.364	176.188	176.291	176.386	
7.0		164.243	179.699	187.856	189.244	189.406	189.526	
7.5		171.364	190.051	200.187	202.143	202.427	202.642	
8.0			200.034	212.319	214.901	215.503	215.739	
9.0			219.006	236.124	240.043	241.424	241.955	
10.0			236.364	259.260	264.730	266.724	268.123	268.245
11.0			251.960	281.688	288.951	291.936	294.042	294.607
12.0			265.817	303.414	312.741	316.666	319.574	320.573

หมายเหตุ: ใช้โปรแกรม Maxwell2D หาค่าความเครียดสนามไฟฟ้า,  $K = 9.15$ ,

$\bar{\alpha}/P = f(E/p)$  จาก G. Friedrich และไม่คิดผลของความชื้น



ตารางที่ ข.2(ต่อ) แรงแดันเบรกดาวน์ของช่องว่างทรงกลมจากการคำนวณ

Gap, Cm	Sphere diameter, cm							
	10	15	25	50	75	100	150	200
13.0				324.605	336.148	341.066	344.947	346.435
14.0				344.919	359.123	365.123	370.093	372.117
15.0				364.460	381.678	388.859	395.016	397.591
16.0				383.202	403.793	412.277	419.719	422.900
17.0				401.197	425.327	435.395	444.161	448.052
18.0				417.963	446.407	458.195	468.390	473.042
19.0				434.281	467.137	480.672	492.407	497.807
20.0				449.273	487.387	502.856	516.211	522.412
22.0				477.525	526.422	546.215	563.297	571.164
24.0				502.287	563.306	588.001	609.545	619.281
26.0					597.898	628.670	654.906	666.808
28.0					629.970	667.634	699.417	713.704
30.0					659.030	704.961	743.315	759.957
32.0					685.893	740.487	785.790	805.585
34.0					710.690	774.114	827.583	850.582
36.0					734.196	805.747	868.400	894.945
38.0						835.177	908.162	938.595
40.0						862.876	946.851	981.586
45.0						925.979	1038.014	1086.103
50.0						981.449	1121.699	1186.082
55.0							1196.506	1281.410
60.0							1264.825	1369.720
65.0							1326.871	1452.197
70.0							1384.201	1528.213
75.0							1436.722	1599.231
80.0								1665.755
85.0								1732.798
90.0								1785.817
100.0								1890.810

หมายเหตุ: ใช้โปรแกรม Maxwell2D หาคความเครียดสนามไฟฟ้า,  $K = 9.15$ ,

$\alpha/P = f(E/p)$  จาก G. Friedrich และไม่คิดผลของความชื้น

## ภาคผนวก ค

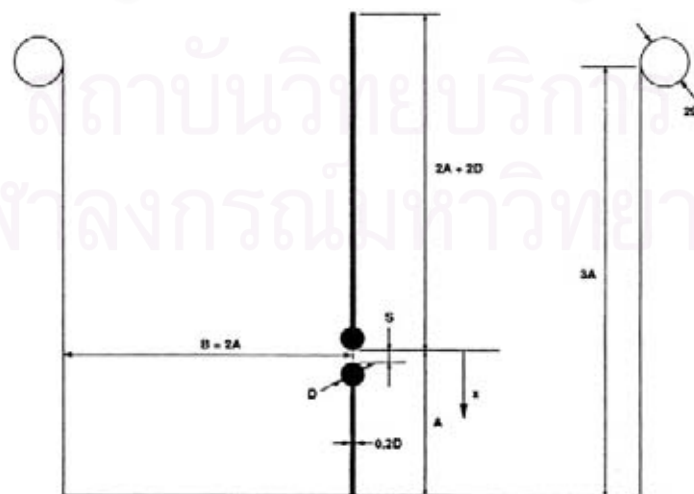
### การใช้โปรแกรม Maxwell 2D Field Simulator แก้ปัญหาช่องว่างทรงกลม

การแก้ปัญหาเกี่ยวกับช่องว่างทรงกลมโดยโปรแกรมMaxwell[8] จะใช้FEMในการแก้ปัญหาและมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. วาด 2D Model ในระนาบ r-z ดังในรูปที่ ค.1 ซึ่งมีภาชนะที่บรรจุช่องว่างทรงกลมเป็นภาชนะทรงกระบอก โดยค่าAดูได้จากตาราง ค.1 ค่าBกำหนดให้เป็น2เท่าของค่าA ค่าDคือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลม ส่วนขนาดของก้านทรงกลมและรูปร่างทรงกลมจะเป็นไปตามแบบจำลองที่จะทำการวิเคราะห์

ตารางที่ ค.1 ระยะห่างต่างๆในรูปที่ ค.1 (จากตารางในหัวข้อ 2.5 ของ IEC52)

Sphere diameter D,cm	Minimum value of "A"	Maximum value of "A"	Minimum value of "B"
up to 6.25	7D	9D	14S
10 – 15	6D	8D	12S
25	5D	7D	10S
50	4D	6D	8S
75	4D	6D	8S
100	3.5D	5D	7S
150	3D	4D	6S
200	3D	4D	6S



รูปที่ ค.1 แบบจำลองของช่องว่างทรงกลมตามมาตรฐานIEC

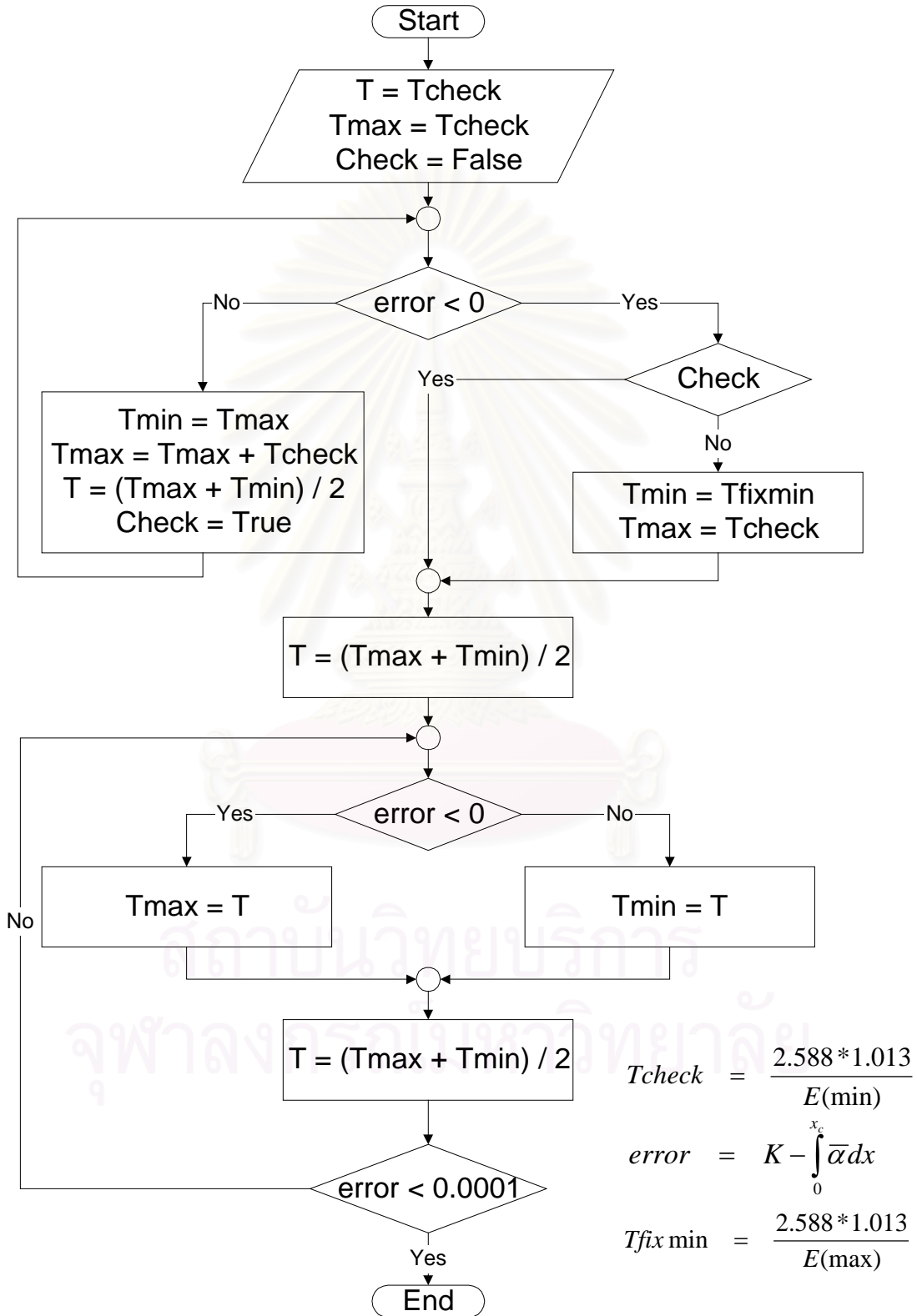
2. กำหนดชนิดของวัสดุและกำหนดเส้นแบ่งเขตและแหล่งจ่ายไฟ ให้ทรงกลมโดยให้ก้านทรงกลมเป็นทองแดงและภาชนะที่บรรจุเป็นเหล็ก และมีศักย์ไฟฟ้าที่ทรงกลมด้านแรงสูงเป็น100V และศักย์ไฟฟ้าที่ทรงกลมอีกลูกกับภาชนะที่บรรจุเป็น 0 V หรือต่อลงดิน
3. ทำการแก้ปัญหาโดยรันโปรแกรม สังเกตการลู่เข้าศูนย์ของพลังงานศักย์สะสมและบันทึกผลการจำลอง



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ง

## โปรแกรมคำนวณแรงดันเริ่มเกิด



รูปที่ ง.1 ขั้นตอนการคำนวณหาแรงดันเริ่มเกิด

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายคงศักดิ์ หล่อรุ่งโรจน์ เกิดวันที่ 16 เมษายน พ.ศ. 2519 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2539 จากนั้นทำงานที่บริษัท พาวเวอร์กริด คอนซัลแทนซ์ จำกัด ในตำแหน่งวิศวกรออกแบบสถานีไฟฟ้า และเข้าศึกษาต่อปริญญาโทในภาควิชาไฟฟ้า สาขาไฟฟ้ากำลัง ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาคปีการศึกษา 2542



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย