



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า

วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาค่าความเปราะเปื้อนของลูกถ้วยที่ก่อให้เกิดการวาวไฟตามผิวของลูกถ้วย
ฉนวนไฟฟ้าในระบบจำหน่ายแบบสายเปลือย

A Study of Equivalent Salt Deposit Density Causing Insulator Flashover
in Distribution System of Bare Conductor Type

نامผู้วิจัย นายอุดมศักดิ์ มาลัยวงศ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์วินัย พุกะวัน, Dr.Ing.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์เกียรติคุณ กวีญาณ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์มงคล รักษาพัชรวงศ์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาค่าความเปราะเปื้อนของลูกถ้วยที่ก่อให้เกิดการวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าใน
ระบบจำหน่ายแบบสายเปลือย

A Study of Equivalent Salt Deposit Density Causing Insulator Flashover in Distribution System
of Bare Conductor Type

โดย

นายอุดมศักดิ์ มาลัยวงศ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อุดมศักดิ์ มาลัยวงศ์ 2553: การศึกษาค่าความเปราะเปื้อนของลูกถ้วยที่ก่อให้เกิดการวาวไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าในระบบจำหน่ายแบบสายเปลือย วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์วินัย พงศ์ษวณ, Dr.Ing. 93 หน้า

ปัจจุบัน กฟภ.ได้ประสบปัญหายุ่งยากขึ้นในระบบจำหน่าย ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่อยู่ใกล้กับชายฝั่งทะเลและบริเวณโรงงานเสมอ คือ การเกิดวาวไฟ (Flashover) ตามผิวลูกถ้วยที่เปราะเปื้อน สิ่งเปราะเปื้อนที่อยู่บนผิวลูกถ้วยนั้น อาจมีสารประกอบของเกลือจากทะเล ผุ่น ขี้เถ้า หรือสิ่งอื่น ๆ ซึ่งมีผลทำให้คุณสมบัติของฉนวนเสื่อมลง ในสภาพแห้ง สิ่งเปราะเปื้อนเป็นฉนวนอยู่ จึงไม่อาจทำให้เกิดการวาวไฟบนผิวลูกถ้วยได้ แต่ในสภาพเปียก น้ำ จะรวมตัวกับสิ่งเปราะเปื้อนกลายเป็นสภาพเป็นตัวนำทำให้เกิดการวาวไฟตามผิวได้ นั่นคือในบริเวณที่มีระดับสิ่งเปราะเปื้อนสูง พบว่าแรงดันวาวไฟตามผิว (Flashover Voltage) ของลูกถ้วยเปราะเปื้อนที่เปียกจะลดลงมาก เมื่อเทียบกับแรงดันวาวไฟตามผิวของลูกถ้วยที่สะอาด สำหรับกรณีศึกษา นี้ เป็นการวิเคราะห์การเกิดวาวไฟในย่านโรงงานอุตสาหกรรมและเปรียบเทียบกับค่าต่างๆเพื่อใช้เป็นแนวทางในการบำรุงรักษาระบบไฟฟ้าไม่ให้เกิดผลกระทบต่อโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งแบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลอง ผลการทดลองที่ 1 พบว่าลูกถ้วยที่ติดตั้งแบบมีไฟจะมีค่าความเปราะเปื้อนมากกว่าลูกถ้วยที่ติดตั้งแบบไม่มีไฟ มีค่ามากกว่าประมาณ 3 เท่า ในระบบจำหน่าย 22 กิโลโวลต์ (kV) ผลการทดลองที่ 2 เมื่อนำน้ำที่มีสิ่งเปราะเปื้อนมาผสมกับเกลือแล้วพ่นใส่ในรางขนาดกว้าง 4 cm ยาว 84 cm เพื่อวัดค่า ESDD ในการเกิดวาวไฟ พบว่าผลที่ได้ออกมาเป็นค่า ESDD เฉลี่ย เท่ากับ 4.28 mg/cm^2 ในการทดลองพบว่าการหาค่าที่เกิดวาวไฟคำนวณออกมาจากกราฟคือ $y = 0.008e^{0.176x}$ คือ ควรมีการบำรุงรักษาภายในระยะเวลา 36 เดือน หลังการติดตั้งลูกถ้วย หากไม่มีการบำรุงรักษาลูกถ้วยจะเกิดวาวไฟ ผลการทดลองที่ 3 พบว่าพื้นที่ที่มีผลต่อการเกิดวาวไฟ เมื่อทดลองในรางขนาดต่างกัน ค่าที่ได้ออกมาแตกต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพื้นที่ส่วนหัวของลูกถ้วยที่รองสายอยู่กับพื้นที่ของรางที่รับการจ่ายไฟส่วนปลาย พบว่าค่าที่ใช้งานจริงคือ ESDD เท่ากับ 0.65 mg/cm^2 และควรบำรุงรักษาหลังติดตั้งภายใน 12-18 เดือน

Udomsak Malaiwong 2010: A Study of Equivalent Salt Deposit Density Causing Insulator Flashover in Distribution System of Bare Conductor Type. Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering. Thesis Advisor: Mr. Winai Plueksawan, Dr. Ing. 93 pages.

Nowadays, PEA is facing a problem in its distribution system located on the sea sides and industrial areas. The problem is flashover on the salt-deposited insulator surface. The contamination factors, for example, are salt, dust, ash or other things. These factors lead to the declination of insulation's property. In a dry condition, a contamination works normally as an insulator. Therefore, the flashover will not occur in this condition. However, in a wet condition, the combination of water and contaminator leads to flashover. This means that, at high salt-deposited area, flashover voltage of wet contaminated insulator decreases compared to that of a clean insulator. The experiment was divided into three sections. The results of the first. Found that units of insulator installation of lights will be more valuable fouling units of insulator installed without fire Greater than about 3 times in distribution system 22 kV (kV). The results of the second. When the water that is mixed with salt fouling and put in spray rails 4 cm wide and 84 cm length to measure the ESDD on the flash. The result showed that out is the average ESDD was 4.28 mg/cm^2 . It was found that the values that the flash is calculated from the graph. $y = 0.006x^{0.176}$ is. Maintenance should be within 36 months after installation units of insulator. Without maintenance, units of insulator to the flash. The results of the third. Found that the area affect the Flash. On trial in different size rails. Values that have come out differently. Comparison between the header area of secondary units of insulator in the area of the rail line at the end of the power. Found that the actual use is equal to 0.65 mg/cm^2 ESDD and maintenance should be within 12-18 months after installation.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ
ดร.วินัย พงศ์ษวณ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา โดยได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆของการทำ
วิทยานิพนธ์มาด้วยดีตลอด รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขจนสำเร็จเรียบร้อย

นอกจากนั้น ต้องขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย รอง
ศาสตราจารย์ เกียรติยุทธ กวีญาณ ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำในการทำ
วิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ขอมอบแต่บิดาและมารดา
ขอบคุณญาติพี่น้องทุกคน ขอบคุณเพื่อนร่วมงานทุกท่าน

อุดมศักดิ์ มัลัยวงศ์
มิถุนายน 2553

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	50
อุปกรณ์	50
วิธีการ	51
ผลและวิจารณ์	67
ผล	67
วิจารณ์	73
สรุปและข้อเสนอแนะ	75
สรุป	75
ข้อเสนอแนะ	77
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	78
ภาคผนวก	79
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	93

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	การเปรียบเทียบแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดและขนาดของแรงที่กระทำกับอนุภาคของ ฝุ่นที่จะเกิดการสะสมบนผิวลูกถ้วย	15
2	การแบ่งระดับความรุนแรงของสิ่งเปราะเปื้อน ตามค่า ESDD	28
3	การแบ่งระดับของสิ่งเปราะเปื้อนตามสภาพพื้นที่	30
4	ค่าตัวประกอบแก้ไขที่ใช้ในการหาค่า ความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตรที่อุณหภูมิต่าง ๆ	37
5	พื้นที่ผิวของลูกถ้วยประเภทต่าง ๆ	56
6	ค่าตัวประกอบ b ที่อุณหภูมิต่างๆ	57
7	แสดงค่า ESDD ที่ได้จากการจำลองด้วยอุปกรณ์ทดลอง และศึกษาการสะสมของสิ่งเปราะเปื้อนในการติดตั้ง	67
8	แสดงค่า ESDD กับการติดตั้งรายปีแบบมีไฟ และแบบไม่มีไฟ ในระยะเวลา 6 เดือน	69
9	แสดงค่า ESDD กับการติดตั้งรายปีแบบมีไฟ และแบบไม่มีไฟ ในระยะเวลา 9 เดือน	70
10	แสดงค่า ESDD กับการติดตั้งรายปีแบบมีไฟและแบบไม่มีไฟ ในระยะเวลา 12 เดือน	71
11	แสดงผลการเปรียบเทียบค่า ESDD ทั้งแบบมีไฟและไม่มีไฟ	72

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 ลูกถ้วยก้านตรง (Pin insulators)	8
2 ลูกถ้วยแขวน (Suspension insulators)	9
3 ลูกถ้วยฟอกไทพ์ (Fog type insulators)	10
4 ลูกถ้วยโพสไทพ์ (Post type insulators)	11
5 ลูกถ้วยสำหรับสายยึดโยง (Strain insulators)	12
6 ลูกถ้วยตุกรอก (Spool insulators)	13
7 ขั้นตอนแสดงการเกิดวาวไฟตามผิวเนื่องจากสิ่งเปราะเปื้อน	14
8 การอาร์กที่แถบแห้งของลูกถ้วยที่เปราะเปื้อน	18
9 การไหลของกระแสรั่วและการเกิดอาร์กบนผิวของลูกถ้วยเปราะเปื้อน รูปร่างใด ๆ	20
10 ลูกถ้วยทรงกระบอกที่มีความเทียบเท่าสำหรับแทนลูกถ้วยในภาพที่ 9	20
11 วงจรสมมูล สำหรับลูกถ้วยทรงกระบอกขณะใช้งาน	21
12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESDD และระยะทางจากทะเล	26
13 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESDD และระยะทางจากแหล่งผลิตควัน	27
14 วิธีการล้างลูกถ้วยเพื่อหาค่าสิ่งเปราะเปื้อน	34
15 แพลตฟอร์มการแก้ไขอุณหภูมิของสารละลายโซเดียมคลอไรด์	35
16 กราฟแสดงความเข้มข้นการนำไฟฟ้าของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (ที่ 20 องศา C)	36
17 สนามไฟฟ้า	40
18 ความสัมพันธ์ของแก๊ส	41
19 เส้นแรงไฟฟ้า	42
20 ค่าความยิบทางไฟฟ้าของวัสดุ	44
21 การเกิดวาวไฟบริเวณฉนวนลูกถ้วย	45
22 จำลองการเกิด Flashover บนฉนวนลูกถ้วย	46
23 การเกิด Flashover บนระบบจำหน่ายไฟฟ้า	49
24 จำลองการเกิด Flashover	49

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
25	มิเตอร์วัดความนำไฟฟ้า	50
26	การติดตั้งลูกถ้วย	51
27	วัดค่าลูกถ้วย	52
28	การนำลูกถ้วยลงจากเสา	52
29	การทำความสะอาดลูกถ้วย	53
30	การทำความสะอาดลูกถ้วย	53
31	การวัดความนำไฟฟ้า	54
32	การวัดค่าของสารละลาย	55
33	ค่าตัวประกอบ b ที่อุณหภูมิต่างๆ	57
34	ส่วนผสมของสารละลาย	60
35	ถ้วยตวงสารละลาย	61
36	วัดค่าความนำไฟฟ้า	61
37	วัดค่าความนำไฟฟ้า	62
38	ร่างพื้นสารละลาย	62
39	ร่างพื้นสารละลาย	63
40	ร่างพื้นสารละลาย	63
41	ร่างพื้นสารละลาย	64
42	หัวฉีดสารละลาย	64
43	ร่างพลาสติก	65
44	ค่าESDD แต่ละขนาด	65
45	ผลการเปรียบเทียบค่าESDDของผิวฉนวนลูกถ้วยในขณะที่จ่ายload	72
46	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบค่าESDD	74
47	น้ำที่มีความเปรอะเปื้อนต่าง ๆ กัน	75
48	กราฟแสดงสถิติการเกิดFlashoverของสถานีไฟฟ้ารัษฎบุรี ปี 2548	76

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
1 ไอคอนโปรแกรม COMSOL MULTIPHYSICS	80
2 หน้าต่าง Model Navigator	80
3 การสร้างชิ้นงานโดยใช้โหนดคำสั่ง Draw	81
4 การ Import ชิ้นงาน	82
5 การสร้างขอบเขตให้กับชิ้นงาน	82
6 การใช้คำสั่ง Copy ชิ้นงาน	83
7 การใช้คำสั่ง Difference	84
8 การสร้าง Polution บริเวณรอบลูกถ้วย	84
9 หน้าต่าง Subdomain Settings	85
10 หน้าต่าง Boundary Settings	86
11 หน้าต่าง Progress – Solve Problem	86
12 หน้าต่างการวิเคราะห์	87
13 หน้าต่าง Plot Parameter การเลือกรูปแบบของผลการวิเคราะห์	87
14 หน้าต่าง Plot Parameter การเลือกชนิดของผลการวิเคราะห์	88
15 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้า	89
16 ผลการกระจายของสนามไฟฟ้าลงลูกถ้วยแขวนแบบไม่มีมลภาวะ	90
17 ผลการกระจายของสนามไฟฟ้าลงลูกถ้วยแขวนแบบมีมลภาวะ	90
18 ผลการกระจายของสนามไฟฟ้าลงลูกถ้วยPin Post Type แบบไม่มีมลภาวะ	91
19 ผลการกระจายของสนามไฟฟ้าลงลูกถ้วยPin Post Type แบบมีมลภาวะ	91
20 ผลการกระจายของสนามไฟฟ้าลงลูกถ้วยLine Post Type แบบไม่มีมลภาวะ	92
21 ผลการกระจายของสนามไฟฟ้าลงลูกถ้วยLine Post Type แบบมีมลภาวะ	92

การศึกษาค่าความเปรอะเปื้อนของลูกถ้วยที่ก่อให้เกิดการวาวไฟตามผิวของลูกถ้วย ฉนวนไฟฟ้าในระบบจำหน่ายแบบสายเปลือย

A Study of Equivalent Salt Deposit Density Causing Insulator Flashover in Distribution System of Bare Conductor Type

คำนำ

สภาพภูมิอากาศของประเทศไทยในปัจจุบันมีฝุ่นละออง จี๊เล้า เขม่า และสิ่งปนเปื้อนที่ก่อให้เกิดโทษต่างๆ อย่างมาก ซึ่งสภาพแวดล้อมเหล่านี้เกิดจากฝีมือของมนุษย์ที่สร้างขึ้นมา อีกทั้งระดับและชนิดของสิ่งปนเปื้อนในแต่ละสถานที่จะมีความแตกต่างกันไป เช่น ที่ชายฝั่งทะเล จะพบสิ่งปนเปื้อนที่มาจากเกลือ หรือในบริเวณท้องถนน จะพบสิ่งปนเปื้อนที่มาจากฝุ่นละออง เขม่า และจี๊เล้าต่าง ๆ ซึ่งสิ่งปนเปื้อนเหล่านี้ เมื่อลอยผ่านลูกถ้วยฉนวนก็จะเกาะติดบนบริเวณผิวของลูกถ้วยฉนวน และสะสมเพิ่มมากขึ้น จนก่อให้เกิดอันตรายและก่อความเสียหายต่ออุปกรณ์การทำงานดังกล่าว

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าปัจจุบันได้เกิดปัญหาที่สำคัญประการหนึ่งกล่าวคือ มีการเกิดวาวไฟ (Flashover) ตามผิวลูกถ้วยฉนวนที่เปรอะ ทั้งนี้เมื่อฉนวนของลูกถ้วยมีคุณภาพเสื่อมลงหรืออยู่ในสภาพแห้ง สิ่งเปรอะเปื้อนเหล่านี้จะไม่ส่งผลต่อการเกิดวาวไฟ แต่เมื่อมีความชื้นหรือฝนตก ก่อให้เกิดสภาพเปียกน้ำ สิ่งเปรอะเปื้อนเหล่านี้จะรวมตัวกับน้ำกลายเป็นตัวนำ ทำให้เกิดวาวไฟตามผิวลูกถ้วยได้ อาจจะกล่าวได้ว่าบริเวณที่มีสิ่งเปรอะเปื้อนอยู่ในระดับสูงจะพบว่า แรงดันวาวไฟตามผิวของลูกถ้วยมีปริมาณลดลง ปัญหาดังกล่าวจะทำให้เกิดอันตรายต่ออุปกรณ์ต่างๆ ในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ทำให้ระบบขาดความน่าเชื่อถือ ไม่มีประสิทธิภาพ และสร้างปัญหาให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้าทั่วไป

ด้วยเหตุนี้ผู้ศึกษาในฐานะที่เป็นบุคลากรคนหนึ่งปฏิบัติงานในการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และทำหน้าที่ตรวจสอบความผิดปกติของลูกถ้วยฉนวน จึงสนใจที่จะศึกษาเรื่อง “การศึกษาค่าความเปรอะเปื้อนของลูกถ้วยที่ก่อให้เกิดความไวตามผิวของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าในระบบจำหน่ายแบบสายเปลือย” เพื่อศึกษาปัญหาและวิเคราะห์หาสาเหตุของการเกิดไฟดับ รวมทั้งนำเสนอแนวทางแก้ไขปัญหาลงให้ผู้สนใจทั่วไปได้มีความรู้ และนำความรู้ไปใช้ประโยชน์ได้

คำสำคัญ :: การวาวไฟ,มลภาวะ,ลูกถ้วย,สายเปลือย,สิ่งเปรอะเปื้อน

Key words :: Flashover , Pollution , Insulator, bare conductor type, Equivalent Salt Deposit Density

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาปัญหาและวิเคราะห์หาสาเหตุการเกิดไฟดับที่เกิดจากการวางไฟตามผิวของลูกถ้วยที่ เปรอะเปื้อนในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
2. เพื่อนำเสนอแนวทางแก้ไขปัญหการเกิดวางไฟตามผิวของลูกถ้วยที่เปรอะเปื้อนในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยเป็นแนวทางที่สามารถปฏิบัติได้อีกทั้งเสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุดหรืออาจจะไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายเลย
3. เพื่อช่วยให้การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคประหยัดงบประมาณในการจัดซื้อลูกถ้วยและแทนลูกถ้วยเก่าที่ชำรุดอันเกิดจากปัญหาสิ่งเปรอะเปื้อน

การตรวจเอกสาร

ผู้ศึกษาเรื่อง การศึกษาค่าความเปราะเปื้อนของลูกถ้วยที่ก่อให้เกิดความไวตามผิวของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าในระบบจำหน่ายแบบสายเปลือย มีแนวคิด และศึกษาเอกสารต่าง ๆ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

นรเศรษฐ (2545) เสนอผลการศึกษาเกี่ยวกับลักษณะสมบัติทางวิศวกรรมของลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับ แบบเคลือบธรรมดา ในระบบ 33 kV ศึกษาเปรียบเทียบกับพวงลูกถ้วยแขวน (ANSI C1 52-4) 4 ลูก และกับลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบสารกึ่งตัวนำ การวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือการหาค่าแรงดันความไวตามผิวของลูกถ้วยผิวสะอาด และลูกถ้วยเปราะเปื้อนตามธรรมชาติ ผลการทดสอบลูกถ้วยผิวแห้งสะอาดพบว่า ค่าแรงดันความไวตามผิว 50 Hz ของลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบธรรมดา มีค่าต่ำกว่าพวงลูกถ้วยแขวนประมาณ 17% แต่ค่าแรงดันความไวตามผิวแห้งอิมพัลส์วิกฤตชั่วพลของลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบธรรมดา มีค่าสูงกว่าพวงลูกถ้วยแขวนประมาณ 6% ส่วนการทดสอบลูกถ้วยเปราะเปื้อน ได้นำตัวอย่างลูกถ้วยฉนวนไปติดตั้งโดยไม่ได้รับแรงดันที่สถานีไฟฟ้าบางปู เพื่อรองรับสิ่งเปราะเปื้อนเป็นเวลา 12 เดือน แล้วนำมาทดสอบตามระยะเวลาที่กำหนด เพื่อหาค่าแรงดันความไวตามผิวตามข้อกำหนด IEC 507:1991 และกระแสรั่วไหล ผลการทดสอบพบว่าค่าแรงดันความไวตามผิวของลูกถ้วยคอตันยาวปีก สลับเคลือบธรรมดาลดลงอย่างเห็นได้ชัดตามปริมาณการสะสมสิ่งเปราะเปื้อนที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับเคลือบสารกึ่งตัวนำมีค่าแรงดันความไวตามผิว ก่อนข้างคังที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณสิ่งเปราะเปื้อนและมีค่าสูงกว่าลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับแบบเคลือบธรรมดา โดยที่กระแสรั่วไหลของลูกถ้วยคอตันยาวปีกสลับทั้งสองแบบที่ระดับแรงดันปกติ มีค่าน้อยกว่า 1 mA

กมล (2552) เปรียบเทียบปริมาณสิ่งเปราะเปื้อนของสิ่งแวดล้อมบริเวณถนนเพชรเกษมและถนนกาญจนาภิเษก และอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนผิวของลูกถ้วยในสภาวะจ่ายไฟในระบบสายส่งอากาศ 69kV และ 115kV ของการไฟฟ้านครหลวงและวิเคราะห์ข้อมูลอ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบ ANSI C29.1-1988(R2002) มอก.354-2523 ปรากฏว่าสิ่งเปราะเปื้อนที่ผิวลูกถ้วยในสภาวะจ่ายไฟ 69kV จะมีค่า 2 เท่าของสภาวะไม่จ่ายไฟและต้องใช้เวลาในการบำรุงรักษาสายส่งด้วยการฉีดน้ำล้างลูกถ้วยประมาณ 6 เดือนต่อครั้ง สำหรับระบบสายส่ง 115 kV ค่าปริมาณสิ่งเปราะเปื้อนที่บริเวณผิวลูกถ้วยในสภาวะจ่ายไฟมีค่าประมาณ 3 เท่าของสภาวะไม่จ่ายไฟและต้องบำรุงรักษาด้วยการฉีดน้ำล้างลูกถ้วยประมาณ 3-5 เดือนต่อครั้ง

โตมร (2544) ลูกถ้วยฉนวนที่ใช้ในระบบไฟฟ้าแบบจึงสายในอากาศกลางแจ้ง มีโอกาสได้รับแรงดันเกิน เสริมฟ้าผ่าที่มีค่ายอดสูงและความชันหน้าคลื่นสูง จัดเป็นแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน ปกติแรงดัน อิมพัลส์หน้าคลื่นชันมีค่าความชันระหว่าง 200-2500 kV/microsecond ซึ่งมีผลทำให้ลูกถ้วยฉนวนเกิดการ เจาะทะลุได้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้รายงานการศึกษาวิจัย เพื่อแก้ปัญหาการเจาะทะลุอันเนื่องจากแรงดัน อิมพัลส์หน้าคลื่นชัน ทำการออกแบบและสร้างลูกถ้วยแขวนคู่คอดันให้มีลักษณะมิติองสมนัยกับ ลูกถ้วยแขวนธรรมดาสองลูกมาต่อกันมีลักษณะคอดัน โดยใช้มาตรฐาน IEC Publ. No. 815 อ้างอิง ในการออกแบบ และทำการจำลองแบบลูกถ้วยด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อให้ได้รูปแบบและมิติที่ เหมาะสม ใช้ลูกถ้วยแขวนธรรมดา ANSI Class 52-4 เป็นลูกถ้วยฉนวนในการศึกษาวิจัยนี้ เพื่อความเชื่อมั่นในการนำลูกถ้วยไปใช้งานในระบบ ลูกถ้วยที่ใช้ศึกษาวิจัยทั้งหมดจะนำมาทดสอบความคงทนต่อการเจาะทะลุ (Puncture test) ด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน ตามมาตรฐาน AS-2947.1-1989 และ CAN/CSA-C411.1-M89-1989 ได้กำหนดค่าความชันหน้าคลื่นแรงดันทดสอบ 2500 kV/microsecond รวมทั้ง ทำการทดสอบหาคุณลักษณะทางไฟฟ้า ทางกล และเปรียบเทียบผลกับลูกถ้วยแขวนธรรมดา ผลการทดสอบพบว่า ลูกถ้วยแขวนธรรมดาส่งเกิดการเจาะทะลุได้ด้วยแรงดันอิมพัลส์ที่มีความชัน หน้าคลื่น 2500 kV/microsecond แต่ลูกถ้วยแขวนคู่คอดันสามารถทนต่อแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันได้ถึง 10000 kV/microsecond จึงอาจกล่าวสรุปได้ว่าลูกถ้วยแขวนคู่คอดันสามารถแก้ปัญหาการเจาะทะลุได้

บุญเรือง (2541) ลูกถ้วยฉนวนที่ติดตั้งใช้งานอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีสิ่งเปราะเปื้อน ก็จะมีผลกระทบจากสิ่งเปราะเปื้อนต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวน อาจทำให้เกิดวาวไฟตามผิวเปราะเปื้อน ซึ่งเป็นต้นเหตุให้เกิดความผิดปกติในระบบส่งจ่าย ทำให้การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าต้องหยุดชะงัก งานวิจัยนี้ศึกษาลักษณะสมบัติของลูกถ้วยฉนวนเปราะเปื้อน โดยใช้ลูกถ้วยฉนวนแบบคอดันยาว สำหรับระบบแรงดัน 33 kV ชนิดพอร์ซเลนเคลือบธรรมดา ชนิดพอร์ซเลนเคลือบสารกึ่งตัวนำ และลูกถ้วยยางซิลิโคน ซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 507:1991 การวิจัยแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ การหาค่าแรงดันวาวไฟตามผิวของลูกถ้วยเปราะเปื้อนจำลอง และการหาค่าแรงดันวาวไฟตามผิวของลูกถ้วยเปราะเปื้อน ตามธรรมชาติหลังจากติดตั้งโดยไม่ต้องรับแรงดันเป็นเวลาหนึ่งปี และทดสอบตามเวลาที่กำหนด จากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า ลูกถ้วยฉนวนแบบเคลือบสารกึ่งตัวนำมีค่าแรงดันวาวไฟ ตามผิวเปราะเปื้อนสูงกว่าลูกถ้วยฉนวนแบบเคลือบธรรมดา 2-3 เท่า และยังสูงกว่าลูกถ้วยยางซิลิโคนเล็กน้อย

ประจักษ์ (2545) สิ่งเปรอะเปื้อนมีหลายชนิดอาจจะเกิดขึ้นตามธรรมชาติหรือมนุษย์สร้าง ขึ้น ระดับความเปรอะเปื้อน ชนิด และส่วนประกอบในแต่ละสถานที่จะแตกต่างกัน สิ่งเปรอะเปื้อน เมื่อเคลื่อนที่ผ่านลูกถ้วย ก็จะสะสมบนผิวลูกถ้วย ถ้ามีจำนวนมากและอยู่ในสภาวะเหมาะสมก็จะทำให้เกิดความไวไฟตามผิวได้โดยปกติสิ่งเปรอะเปื้อนในสภาพแห้งจะเป็นฉนวนแต่ในสภาพเปียกน้ำจะ รวมตัวกับสิ่งเปรอะเปื้อนกลายสภาพเป็นตัวนำทำให้เกิดความไวไฟตามผิวซึ่งพบว่าบริเวณที่มีสิ่ง เปรอะเปื้อนสูง แรงดันความไวไฟตามผิวของลูกถ้วยจะลดลงมาก วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อ ศึกษาถึงสาเหตุและหาแนวทางการแก้ปัญหาดังกล่าว โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 กรณี กรณีแรก ทำการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ทดลองและศึกษาการสะสมของสิ่งเปรอะเปื้อนแล้วจำลองและหา ค่าการสะสมสิ่งเปรอะเปื้อนบนผิวลูกถ้วยที่ระดับความชื้นต่างๆ ส่วนกรณีที่นำลูกถ้วยตัวอย่างไป ติดตั้งที่สถานที่จริงที่มีปัญหาการเกิดไฟดับเนื่องจากสิ่งเปรอะเปื้อน จากผลทดสอบทั้งสองกรณี สามารถสรุปได้ว่า ลูกถ้วยที่มีรูปทรงที่มีปีกยื่นออกมาหลายๆ และมีส่วนของพื้นที่ผิวของลูกถ้วยที่ ระบายอากาศได้ยากแล้ว เมื่อนำไปใช้กับสถานที่ที่มีสิ่งเปรอะเปื้อนชนิด คราบเกลือ และมีสภาพ ภูมิอากาศที่ฝนตกมาก ความเร็วลมมากและความชื้นสูงแล้ว อัตราการสะสมสิ่งเปรอะเปื้อนจะ เพิ่มขึ้นมากกว่าปกติ

ฉนวนลูกถ้วยเป็นอุปกรณ์ที่ใช้รองรับสายไฟ ทำหน้าที่เป็นฉนวนและป้องกันมิให้กระแสไฟฟ้ารั่วลงดินหรือลัดวงจรลงดิน เพราะถ้าปริมาณกระแส ที่รั่วไหลมีจำนวนมาก อุปกรณ์ป้องกันที่ติดตั้งในระบบจำหน่ายก็จะตัดวงจรออก ทำให้การจ่ายไฟหยุดชะงัก ดังนั้นลูกถ้วยจึงมีความสำคัญราบใดที่ยังมีการจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปตามสายเหนือดิน (Over head line) ทั้งสายส่งแรงสูง (Transmission line) และสายระบบจำหน่าย (Distribution line)

ลูกถ้วยที่ใช้ในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคมีหลายแบบได้แก่

1. ลูกถ้วยก้านตรง (Pin insulators)
2. ลูกถ้วยแขวน (Suspension insulators)
3. ลูกถ้วยฟอกไทป์ (Fog type insulators)
4. ลูกถ้วยโพสท์ไทป์ (Post type insulators)
5. ลูกถ้วยสำหรับสายยึดโยง (Strain insulators)
6. ลูกถ้วยตุกรอก (Spool insulators)

ลูกถ้วยก้านตรง (Pin insulators)

ที่มีใช้ในปัจจุบันส่วนใหญ่จะเป็นพิกัด 22 และ 33 KV ตามมาตรฐาน EEI-NEMA ของสหรัฐอเมริกา เนื่องจากเหมาะสมกับ สภาพภูมิอากาศในบ้านเรา ลูกถ้วยที่ใช้กับแรงดันสูงจะต้องเคลือบสารกึ่งตัวนำ (Semi-conductor) ไว้ที่บริเวณรองรับสายไฟ ที่อยู่ด้านบนของลูกถ้วย เพื่อป้องกันมิให้เกิดคลื่นวิทยุไปรบกวนระบบสื่อสารที่อยู่ใกล้เคียง



ภาพที่ 1 ลูกถ้วยก้านตรง (Pin insulators)

ลูกถ้วยแขวน (Suspension insulators)

มีลักษณะดังรูป โดยด้านบนและล่างของจานลูกถ้วยจะมีข้อต่อห้วงโลหะสำหรับเกี่ยวยึดกันเป็นชั้นๆ สายตัวนำจะถูกยึดไว้ด้วย Suspension clamp ลูกถ้วยแขวนสามารถใช้กับเสาต้น dead end เพื่อรับสายไฟที่มีแรงดึงสูง จำนวนชั้นของลูกถ้วย ขึ้นอยู่กับระดับแรงดัน ยิ่งแรงดันสูงจำนวนชั้นก็ยิ่งมาก กรณีที่ลูกถ้วยชำรุดสามารถถอดเปลี่ยนเฉพาะตัวที่ชำรุดได้ นิยมใช้มากในระบบแรงสูง โดยการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคใช้ลูกถ้วยแขวน 2 ขนาดคือเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 และ 10 นิ้ว มีทั้งแบบธรรมดาและแบบ anti – pollution



ภาพที่ 2 ลูกถ้วยแขวน (Suspension insulators)

ลูกถ้วยฟอกไทพ์ (Fog type insulators)

รูปร่างโดยทั่วไปคล้ายกับลูกถ้วยก้านตรงแบบแรงสูงแต่มีครีบน้ำมันมากกว่าและระยะสูงกว่า ลูกถ้วยชนิดนี้ออกแบบไว้ใช้ แถบชายทะเลที่มีมลภาวะไอเกลือจากทะเลสูงมากรวมทั้งป้องกันการเกิด Flashover หรือเกิด leak ซึ่งลูกถ้วยก้านตรงทั่วไป ไม่สามารถป้องกันคราบเกลือเกาะตามลูกถ้วยได้ ถ้าหากใช้ลูกถ้วยก้านตรงทั่วไปในบริเวณดังกล่าวต้องทาครีบลูกถ้วย ด้วย silicon compound เพื่อป้องกันคราบเกลือเกาะ แต่ต้นทุนจะสูงกว่าการใช้ลูกถ้วยฟอกไทพ์



ภาพที่ 3 ลูกถ้วยฟอกไทพ์ (Fog type insulators)

ลูกถ้วยโพลีไทพ์ (Post type insulators)

สำหรับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคแล้วจะใช้ลูกถ้วยชนิดนี้ไม่มากนักและส่วนใหญ่ใช้ที่ภาคใต้ บริเวณที่เป็นทางโค้งหรือทางแคบๆ แทนการใช้ลูกถ้วยก้านตรงขนาด 33 kV. หรือลูกถ้วยแขวน เพราะมีความปลอดภัยมากกว่า การติดตั้งลูกถ้วยในระบบจำหน่าย อาจเป็นแนวนอนหรือแนวตั้งก็ได้ แต่ส่วนใหญ่ติดตั้งในแนวนอนและสลักด้านซ้าย-ขวาของเสา โดยมี Clamp ที่ด้านปลายลูกถ้วยเป็นตัวยึดสายไฟ



ภาพที่ 4 ลูกถ้วยโพลีไทพ์ (Post type insulators)

ลูกถ้วยสำหรับสายยึดโยง (Strain insulators)

สายยึดโยงในระบบจำหน่าย มีหน้าที่รับแรงดึงของสายไฟที่มีต่อเสาไฟฟ้า เพื่อให้เสาอยู่ในสภาพสมดุล โดยสายยึดโยงนั้นใช้ลวดเหล็กตีเกลียวขนาดตามความเหมาะสม ยึดกับเสาไฟด้วยสลักเกลียวหัวแบบธรรมดาเดี่ยว 45 องศา ประกอบที่จุดสำหรับทำสายยึดโยงที่หัวเสา ส่วนปลายยึดกับหัวรองก้านสมอบก แต่เนื่องจากลวดเหล็กตีเกลียวติดตั้งไว้สูง ใกล้กับสายไฟแรงสูง จึงต้องมีฉนวนป้องกันกระแสรั่วไหลจากหัวเสาผ่านมาตามสายยึดโยง และอาจเป็นอันตรายต่อผู้ที่อยู่ใกล้เคียงหรือสัมผัสกับสายยึดโยง และเนื่องจากฉนวนนี้อยู่แนวเดียวกับสายยึดโยงซึ่งมีแรงดึงมาก ดังนั้นฉนวนหรือลูกถ้วยสำหรับสายยึดโยงจึงต้องมีความสามารถในการเป็นฉนวนที่ตีรวมทั้งทนแรงดึงหรือแรงกดได้สูงอีกด้วย และเนื่องจากวัสดุประเภทกระเบื้องเคลือบจะทนแรงกดได้ดีกว่าแรงดึงมาก ดังนั้นลูกถ้วยจึงถูกออกแบบมาให้รับแรงยึดโยง ในลักษณะแรงกด



ภาพที่ 5 ลูกถ้วยสำหรับสายยึดโยง (Strain insulators)

ลูกถ้วยลู่กรอก (Spool insulators)

ใช้รองรับสายในระบบจำหน่ายแรงต่ำ มีลักษณะดังรูป ใช้ประกอบกับ Rack โดยสายไฟจะพาดผ่านร่องกลางของลูกถ้วย สามารถติดตั้งได้ทั้งแนวนอนและแนวตั้งขึ้นอยู่กับสภาพของพื้นที่ที่จะติดตั้ง



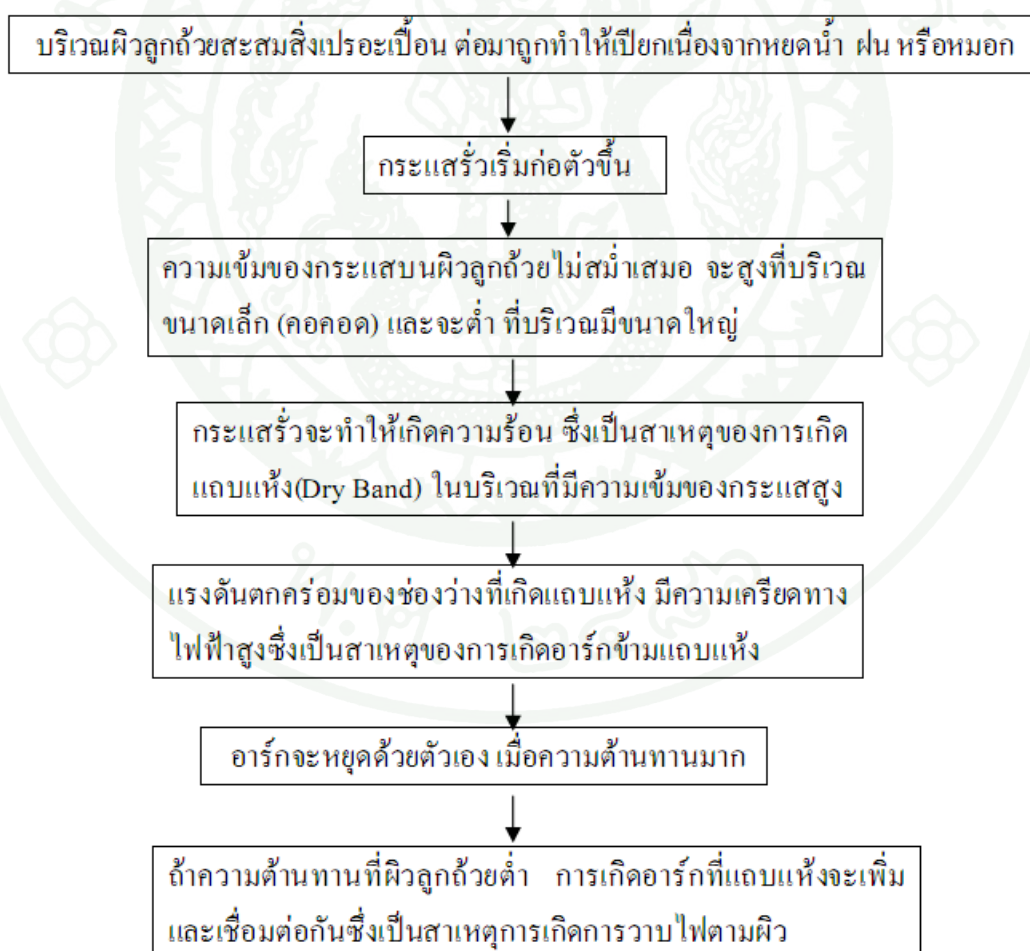
ภาพที่ 6 ลูกถ้วยลู่กรอก (Spool insulators)

ปรากฏการณ์การเกิดวาวไฟตามผิวเนื่องจากสิ่งเปื้อน

การศึกษาในอดีต

การศึกษากลไกการเกิดวาวไฟตามผิวของลูกถ้วยที่เปื้อนได้มีการศึกษามานานกว่า 40 ปี เพื่อให้เกิดความเข้าใจ อย่างท่องแท้ ได้มีความพยายามที่จะทำความเข้าใจในเรื่องดังกล่าวจากอดีตที่ผ่านมา เริ่มต้นจากการวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงกายภาพของการเกิดวาวไฟตามผิวของลูกถ้วย และได้มีความพยายามที่จะเสนอรูปแบบของสมการและแบบจำลองขึ้นมาเพื่อที่จะใช้อธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าว (Holtzhausen and Swift, 1999)

ขั้นตอนแสดงการเกิดวาวไฟตามผิวเนื่องจากสิ่งเปื้อน



ภาพที่ 7 ขั้นตอนแสดงการเกิดวาวไฟตามผิวเนื่องจากสิ่งเปื้อน
การสะสมสิ่งเปื้อน (Accumulation of Contamination)

แรงโน้มถ่วง ลม และ สนามไฟฟ้า เป็นแฟกเตอร์ที่มีบทบาทมากต่อการสะสมของสิ่งเปรอะเปื้อนที่อยู่บริเวณใกล้เคียงกับลูกถ้วยขณะใช้งาน แรงที่เกิดจากสนามไฟฟ้ากระทำกับอนุภาคของสิ่งเปรอะเปื้อน จะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ แรงที่เกิดจากความเครียดไฟฟ้า (E) และแรงที่เกิดจากการแผ่ของสนามไฟฟ้า (E^2) สำหรับลูกถ้วยที่ใช้งานในระบบไฟกระแสดับ แรงที่เกิดจากความเครียดไฟฟ้าจะเป็นศูนย์ เพราะการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน แต่แรงที่เกิดจากการแผ่ของสนามไฟฟ้า จะเป็นแรงบวก ซึ่งขนาดจะเพิ่มขึ้นตามขนาดของสนามไฟฟ้าลูกถ้วยที่ใช้งานในระบบไฟกระแสดับ แรงที่เกิดจากความเครียดไฟฟ้าและแรงที่เกิดจากการแผ่ของสนามไฟฟ้าจะเป็นแรงบวก ดังนั้นการสะสมของสิ่งเปรอะเปื้อนบนผิวลูกถ้วยชนิดนี้ จะเห็นได้ชัดเจนมากกว่าลูกถ้วยที่ใช้งานในระบบไฟกระแสดับ

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดและขนาดของแรงที่กระทำกับอนุภาคของฝุ่นที่จะเกิดการสะสมบนผิวลูกถ้วย

ชนิดของแรง	ความสัมพันธ์กับขนาด
แรงโน้มถ่วง	1 PU (อ้างอิง)
ความเครียดไฟฟ้า ($E = 2 \text{ KV/cm DC}$)	10
การแผ่ของสนามไฟฟ้า ($E^2 = 0.2 \text{ KV}^2/\text{cm}^2$)	0.0001
ลม (ความเร็ว = 2 m/s)	1,000
ลม (ความเร็ว = 5 m/s)	2,000
ลม (ความเร็ว = 10 m/s)	3,000

ปัจจัยที่สำคัญของแรงที่กระทำกับสิ่งเปรอะเปื้อนที่ไปจับเกาะลูกถ้วย คือ ลม รองลงมาคือ ความเครียดไฟฟ้า (กระแสดับ) ซึ่งสนามไฟฟ้าจะเป็นแบบไม่สม่ำเสมอทั้งลูกถ้วยที่ใช้กับระบบไฟกระแสดับและกระแสดำ และจะมีจำนวนมากที่บริเวณหัวแรงดันสูง ซึ่งสิ่งเปรอะเปื้อนที่ส่วนนี้จะพบจำนวนมากกว่าส่วนอื่นของลูกถ้วย ในสถานที่ติดตั้งระบบไฟฟ้าจะมีสิ่งเปรอะเปื้อนอยู่หลายชนิด ซึ่งชนิดและจำนวน การสะสมของสิ่งเปรอะเปื้อนบนผิวลูกถ้วยจะขึ้นอยู่กับพื้นที่นั้นๆ ลูกถ้วยที่ติดตั้งใช้งานอยู่บริเวณชายทะเล โดยมากสิ่งเปรอะเปื้อนจะเป็นทราย (SiO_2) คราบเกลือ (NaCl) ซึ่งเป็นปัญหาสำหรับการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าในแนวสายบริเวณนั้น ส่วนลูกถ้วยที่ ติดตั้งอยู่บนแผ่นดินสิ่งเปรอะเปื้อนจะเป็น ยิปซัม (CaSO_4) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) ซึ่งเป็นเกลือที่ใช้ในบริเวณพื้นที่ที่มีอากาศเย็น เพื่อป้องกันไม่ให้ เกิดน้ำแข็งบนถนน หลังจากหิมะ

ตก เมื่อมีการสัญจรของขบวนพาหนะที่ผ่านไปผ่านมา และลมที่พัดไปมาได้พัดนำเอาแคลเซียมคลอไรด์จากพื้นถนนไปสะสมบนผิวลูกถ้วยได้นอกจากนี้ในพื้นที่ที่มีการทำเกษตรจะมีสิ่งประกอบเป็นชนิดฟอสเฟสและไนโตรเจนของไนโตรเจนและแอมโมเนียไปสะสมบนผิว ลูกถ้วยได้

การเปียกน้ำของลูกถ้วย (Insulator Wetting)

ลูกถ้วยจะเปียกน้ำระหว่างการใช้งาน เนื่องจาก ฝน ลม (พัดเม็ดฝนกระทบกับผิวลูกถ้วยเหมือนการพ่น) และหยดน้ำ หรือหมอก สำหรับการเปียกน้ำจาก ฝน และลมที่พัดเม็ดฝนเป็นวิธีที่ผิวลูกถ้วยได้รับน้ำซึ่งมีขนาดเล็ก ๆ กระทบกับผิวลูกถ้วย รูปทรงของลูกถ้วยที่เปิดออกรับฝนหรือมีลมที่พัดเม็ดฝนมากระทบที่ผิว จะทำให้ผิวของลูกถ้วยง่ายต่อการเปียกน้ำมากกว่าผิวของลูกถ้วยส่วนที่ป้องกัน (Protective Leakage Distance) แต่ถ้าฝนตกต่อเนื่องเป็นเวลานานแล้วส่วนต่าง ๆ ของลูกถ้วยก็อาจจะเปียกน้ำทั้งหมด ส่วนการเปียกน้ำ ที่เกิดจากขบวนการควบแน่นของหยดน้ำและหมอกซึ่งขึ้นอยู่กับความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวของลูกถ้วยกับสิ่งแวดล้อม ถ้าหากอุณหภูมิที่ผิวลูกถ้วยต่ำกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ขบวนการควบแน่นบนผิวลูกถ้วยจะเกิดเป็นระยะเวลานาน แต่เมื่อไม่มีความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างสิ่งแวดล้อมกับผิวลูกถ้วย ขบวนการควบแน่นก็จะหยุด ซึ่งผลจากการทดลองรูปทรงภายนอกของลูกถ้วยจะมีผลน้อยมากกับการเปียกน้ำเนื่องจากขบวนการควบแน่น

วัสดุที่ใช้ทำลูกถ้วยจะเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการเปียกน้ำของผิวลูกถ้วยในขณะใช้งานสารอินทรีย์ ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ทำลูกถ้วยปอร์ซเลนและลูกถ้วยแก้ว จะมีความสามารถในการเปียกน้ำที่แตกต่างกันมากเมื่อเทียบกับสารอินทรีย์ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ทำลูกถ้วย Composite พันธะทางไฟฟ้าที่แข็งแรงในปอร์ซเลนและแก้วมีส่วนทำให้พลังงานอิสระที่ผิวลูกถ้วยมีค่าสูงขึ้น ซึ่งเป็นปริมาณทางไดนามิกส์ที่เสริมความแข็งแรงของการจับเกาะระหว่างผิวลูกถ้วยกับน้ำ ดังนั้น ลูกถ้วยปอร์ซเลนและลูกถ้วยแก้วจะมีความสามารถในการเปียกน้ำได้ง่าย ในทำนองเดียวกัน ลูกถ้วยComposite ซึ่งทำมาจากวัสดุจำพวกสารอินทรีย์ พันธะทางไฟฟ้าไม่แข็งแรงและจะมีค่าพลังงานอิสระที่ผิวดำ ซึ่งคุณสมบัติส่วนนี้ของลูกถ้วย Composite จะทำให้เกิดการต้านทานการก่อตัวของผิวน้ำไม่ให้อ่อนแอได้ดีกว่าลูกถ้วยปอร์ซเลนและลูกถ้วยแก้วเป็นอย่างมาก ซึ่งคุณสมบัตินี้ก็คือคุณสมบัติการไล่น้ำ (Hydrophobicity) นั่นเอง

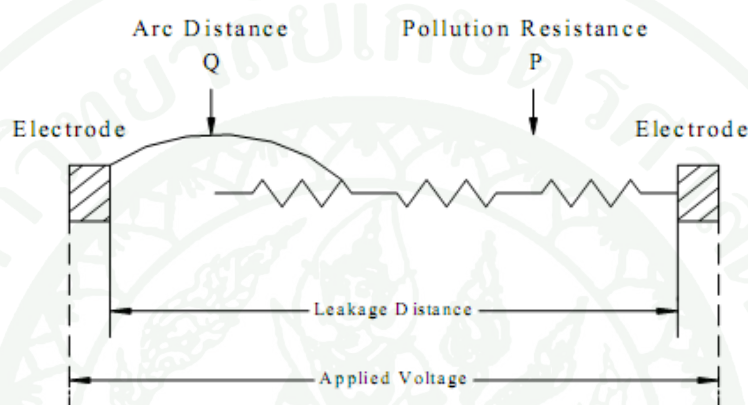
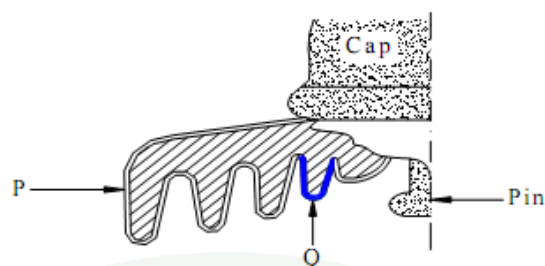
ความต้านทานที่ผิวของลูกถ้วยจะลดต่ำลงอย่างมากเนื่องจากการเปียกน้ำโดยขบวนการควบแน่น เมื่อเปรียบเทียบกับ การเปียกน้ำจากฝน ซึ่งการเปียกน้ำเนื่องจากการควบแน่น จะมี

ลักษณะกระจายที่สม่ำเสมอของหยดน้ำเล็ก ๆ ต่างจากการเปียกน้ำจากฝน ซึ่งมีจะมีลักษณะเป็นหยดน้ำขนาดใหญ่ๆ แต่ผิวลูกถ้วยที่เปียกน้ำโดยลมที่พัดเมื่อดฝนมากระทบกับผิวลูกถ้วย รูปแบบที่เกิดขึ้นจะคล้ายกับการเปียกน้ำเนื่องจากขบวนการควบแน่น แต่ก็ขึ้นอยู่กับความเร็วของลม

ภายใต้เงื่อนไขการเปียกน้ำ การลดลงของความต้านทานที่ผิวของลูกถ้วย จะเป็นฟังก์ชันของความสามารถในการละลายน้ำของสิ่งประกอบเป็น ในบรรดาเกลือทั้งหมด โซเดียมคลอไรด์เป็นเกลือที่สามารถละลายน้ำได้ดี แต่ก็ไม่ได้เป็นสิ่งประกอบที่เจอบ่อย ๆ (ยกเว้นบริเวณใกล้กับมหาสมุทร) ดังนั้นเกลือโซเดียมคลอไรด์จะเป็นสิ่งประกอบชนิดที่มีค่ากระแสรั่วสูงส่วนเกลือชนิดอื่น ๆ ซึ่งบ่อย ๆ ที่พบบนผิวลูกถ้วยจะมีความสามารถที่จะละลายน้ำที่ระดับต่าง ๆ กัน สำหรับยิปซัม และทรายจะเป็นสิ่งประกอบที่ไม่ละลายน้ำ

การอาร์กที่แถบแห้ง (Dry Band Arcing)

น้ำที่อยู่ในฟิล์มสิ่งประกอบบนผิวลูกถ้วยเมื่อนำไฟฟ้า จะมีกระแสรั่วไหลซึ่งทำให้ร้อนและกลายเป็นไอ บนฟิล์มสิ่งประกอบ การกระจายของกำลังไฟฟ้าซึ่งเป็นฟังก์ชันของความเข้มข้นของกระแส จะสูงในบริเวณส่วนที่แคบของลูกถ้วย เช่น ที่ใกล้ ๆ กับ Pin ของลูกถ้วยแก้วและลูกถ้วยพอร์ซเลน และ ที่ก้านของลูกถ้วย Composit บริเวณที่เป็นแถบวงแหวนเล็ก ๆ เรียกว่าแถบแห้ง (Dry Band) การเกิดแถบแห้งเป็นสาเหตุการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญในการกระจายของแรงดันตามผิวลูกถ้วย แรงดันนี้จะคร่อมแถบแห้งที่แคบ เพราะฉะนั้น ความเครียดไฟฟ้าที่ข้ามแถบแห้งจะสูงกว่าค่าแรงดันคงทนอยู่ได้ของแถบแห้ง เป็นเหตุให้อาร์กพัฒนาข้ามแถบแห้งนี้กระแสอาร์กจะถูกจำกัดโดยความต้านทานของชั้นผิวตัวนำที่อนุกรมกันของแถบแห้ง ซึ่งแสดงตามภาพที่ 8



ภาพที่ 8 การอาร์กที่แถบแห้งของลูกถ้วยที่เปราะเปื้อน

อาร์กที่แถบแห้งโดยปกติจะหยุดด้วยตัวมันเอง กระแสอาร์กที่แถบแห้งจะมีขนาดเล็กไม่มากนักที่มีลิแอมป์ ทำให้ต้องการแรงดันจำนวนมาก ในกรณีที่ความต้านทานที่ผิวมีมาก อาร์กที่แถบแห้งจะหยุดหรือถูกกำจัด อย่างไรก็ตาม ภายใต้เงื่อนไขบางอย่าง เช่น ความต้านทานต่ำมีสาเหตุจากระดับสิ่งเปราะเปื้อนสูง แรงดันเสิร์จ หรือปรากฏการณ์ไอออไนซ์ ที่บริเวณใกล้เคียงกับลูกถ้วย นอกจากนี้ลมก็ช่วยในการเคลื่อนที่ของอาร์ก แถบแห้งสามารถที่ยืดยาวเพียงพอที่จะเชื่อมต่อช่องว่างระหว่างขั้วของลูกถ้วยซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดการวบไฟตามผิวได้

เงื่อนไขบางอย่างสำหรับแถบแห้งซึ่งเป็นสาเหตุการวบไฟตามผิวยังไม่เป็นที่เข้าใจอย่างถ่องแท้ อย่างไรก็ตาม นักวิจัยเป็นส่วนใหญ่ กล่าวว่า สภาพที่จำเป็นสำหรับการแพร่ของอาร์ก คือ สนามไฟฟ้าในฟิล์มของสิ่งเปราะเปื้อนที่อนุกรมกันกับอาร์ก ต้องมากกว่าสนามไฟฟ้าที่ส่วนปลายของอาร์ก ถ้าอาร์กที่แถบแห้งเกิดขึ้นแล้วสามารถเชื่อมต่อประมาณ 2/3 ของความยาวลูกถ้วย การเกิดวบไฟตามผิวที่ถาวรจะปรากฏขึ้น

แบบจำลองของการเกิดวาบไฟตามผิวเนื่องจากสิ่งเปราะเปื้อนสำหรับลูกถ้วยที่ไม่เจาะจงรูปร่าง (Flashover Models for Insulators with Arbitrary Shapes)

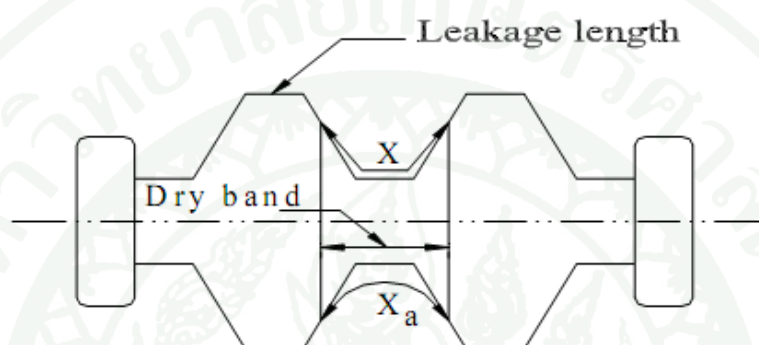
ขบวนการเกิดการวาบไฟตามผิวเนื่องจากสิ่งเปราะเปื้อนสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองของการเกิดวาบไฟตามผิวที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะอาร์กที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Arc) กับความต้านทานที่เป็นเชิงเส้น (Linear Resistance) ของฟิล์มสิ่งเปราะเปื้อน ซึ่งปัจจัยหลักได้แก่ แรงดัน ความยาวของลูกถ้วย และความสามารถในการนำไฟฟ้าที่บริเวณพื้นผิวลูกถ้วย โดยทั่วไป แบบจำลองเหล่านี้ มักจะมีพื้นฐานมาจากการตั้งสมมุติฐานให้มีความง่าย เช่น มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกทั่วไป หรือมีการกระจายของความต้านทานที่ผิวของลูกถ้วยเป็นรูปแบบเดียวกันอย่างสม่ำเสมอ (Holtzhausen and Swift, 1999) อย่างไรก็ตาม ในความเป็นจริงแล้ว ลูกถ้วยจะมีรูปร่างที่ซับซ้อน ซึ่งต้องใช้หลักการของ Form Factor ในการแปลงลูกถ้วยที่มีความซับซ้อนให้เป็นรูปทรงกระบอกทั่ว ๆ ไป โดยมีคุณสมบัติเท่าเทียมกัน ทรงกระบอกที่มีคุณสมบัติเท่าเทียมกันนี้ จะมีความยาวเท่ากับความยาวของลูกถ้วยจริง และในการแปลงนี้มีสมมุติฐานว่าในความเป็นจริง อาร์กจะไหลไปตามรูปร่างของลูกถ้วย แต่อย่างไรก็ตามก็ยังมีสาเหตุหลายประการที่ทำให้อาร์กไม่จำเป็นต้องไหลไปตามรูปร่างของลูกถ้วย เช่น

ลูกถ้วยที่มีระดับสิ่งเปราะเปื้อนเพียงเล็กน้อย จึงต้องการความเครียดไฟฟ้าที่สูงขึ้น เพื่อให้เกิดการวาบไฟตามผิวเนื่องจากสิ่งเปราะเปื้อน ดังนั้นจึงสามารถมองภาพได้ว่าระหว่างการก่อตัวของขบวนการ การเกิดวาบไฟตามผิวอาจจะเกิด Inter-Disc หรือ Inter-Rib Air Breakdown ขึ้นด้วย ดังนั้นความยาวของอาร์กจะสั้นลงและทำให้ขบวนการเกิดการวาบไฟตามผิวเร็วขึ้น ในทางกลับกัน ลูกถ้วยที่มีระดับสิ่งเปราะเปื้อนมาก จึงต้องการความเครียดต่ำเพื่อให้เกิดการวาบไฟตามผิวระดับกระแสไฟฟ้าซึ่งเกี่ยวข้องกับระดับสิ่งเปราะเปื้อนจึงมีค่าสูง และอาร์กจะถูกผลักร่อนไปในแนวรัศมีโดยผลของเทอร์โมไดนามิกส์ หรือ เข้าสู่ภายในเนื่องจากผลของอิเล็กโตรไดนามิกส์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรอกแบบลูกถ้วย

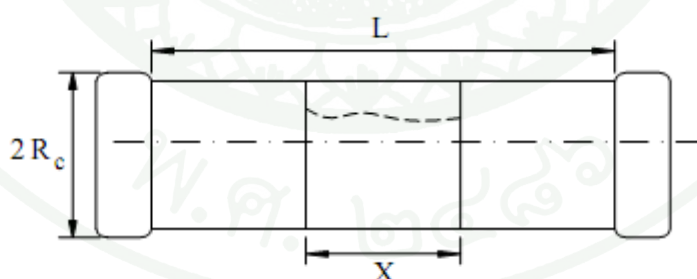
ตามที่ได้พิจารณาขั้นตอนการเกิดวาบไฟตามผิวเนื่องจากสิ่งเปราะเปื้อนของลูกถ้วยอย่างละเอียดที่กล่าวมาแล้ว ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะที่เกี่ยวข้องกับ ช่วงสั้น ๆ ของการเกิดอาร์กจะพิจารณา ลูกถ้วยขณะใช้งาน ที่แสดงไว้ในภาพที่ 11 ซึ่งสมมุติว่าแถบแห้งได้ก่อตัวขึ้นมาแล้วในพื้นที่ที่แน่นอนของลูกถ้วย โดยกระแสเริ่มต้นไหล ผิวของลูกถ้วยถูกปกคลุมด้วยชั้นของสิ่งเปราะเปื้อนซึ่งนำไฟฟ้า ยกเว้นในพื้นที่ของแถบแห้ง เมื่อความเครียดทางไฟฟ้า ที่ตกคร่อมแถบแห้งมีค่ามากเกินไปก็จะเกิดอาร์กคร่อมแถบนั่น ถ้าความยาวของเส้นทางรั้วไหล เป็น L และความกว้างของ แถบแห้งเป็น X ดังนั้นความยาวของเส้นทางนำไฟฟ้า จะเป็น $L \times$ ที่จุดซึ่งอาร์กสิ้นสุดลงบนชั้นผิวของ

สิ่งประกอบอื่น รากของอาร์ก หรือความหนาแน่นของกระแส จะสูงขึ้น อย่างไรก็ตามเนื่องจากพื้นที่ซึ่งมีความเข้มของกระแสเหล่านี้ที่บริเวณรากของอาร์ก ซึ่งเป็นพื้นที่เล็กๆ

เมื่อเทียบกับความยาวของลูกถ้วย จึงมักจะไม่ต้องคำนึงถึงพื้นที่เหล่านี้ ดังนั้นลูกถ้วยที่แสดงไว้ในภาพที่ 8 จึงสามารถแปลงเป็นลูกถ้วยทรงกระบอกที่เทียบเท่ากันได้ตามที่แสดงไว้ในภาพที่ 9 โดยใช้หลักการของ Form Factor



ภาพที่ 9 การไหลของกระแสรั่วและการเกิดอาร์กบนผิวของลูกถ้วยประกอบอื่น
รูปร่างใดๆ



ภาพที่ 10 ลูกถ้วยทรงกระบอกที่มีความเทียบเท่าสำหรับแทนลูกถ้วยในภาพที่ 9

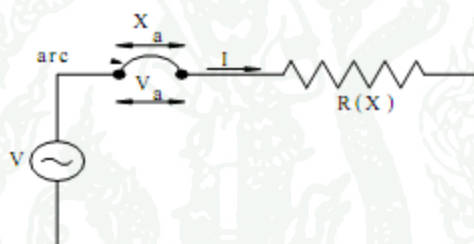
ดังนั้นรัศมีของทรงกระบอกเทียบเท่าที่แทนด้วยลูกถ้วยต้นแบบจึงเขียนได้เป็น

$$R_c = \frac{L}{2\pi F} \quad (1)$$

โดย F คือ Form Factor และ L คือ ความยาวของการรั่วไหล ที่วัดไปตามผิวของลูกถ้วยในภาพที่ 9 เช่นเดียวกัน

$$F = \int_0^L \frac{1}{2\pi r(s)} ds \quad (2)$$

โดย $r(s)$ เป็นรัศมีที่ตำแหน่ง s ตลอดไปตามผิวของลูกถ้วย



ภาพที่ 11 วงจรสมมูล สำหรับลูกถ้วยทรงกระบอกขณะใช้งาน

การวิเคราะห์ทางทฤษฎีดังกล่าวจะใช้วิธีการ Quasi-Steady State โดยตั้งสมมุติฐานว่า แถบแห้งต่าง ๆ จะเกิดการวาวไฟตามผิวในแต่ละวงรอบ ในช่วงเวลาอันสั้นก่อนที่แรงดันที่ป้อนเข้าไปจะถึงจุดสูงสุด จุดยอดของพัลส์กระแสรั่ว ที่เกิดขึ้นตามมาจึงตรงกันกับจุดยอดของแรงดันโดยประมาณ เนื่องจากทั้งแรงดันและกระแสรั่วมีอัตราการเปลี่ยนแปลงต่ำบริเวณใกล้จุดยอด ดังนั้นจึงไม่ต้องคำนึงถึงผลของ Capacitive และ Inductive ดังนั้น ลูกถ้วยขณะใช้งานจึงสามารถแทนได้ด้วยวงจรเทียบเท่าที่แสดงไว้ในภาพที่ 11 อาร์กคร่อมแถบแห้งเป็นอนุกรมกับความต้านทานเป็นเส้นตรง $R(X)$ ซึ่งแสดงถึง ฟิล์มนำไฟฟ้า

Kirchhoff Voltage Equation สำหรับวงจรนี้คือ

$$V = V_a + R(X)I \quad (3)$$

อาร์กมีลักษณะเป็น ความต้านทานลบ แบบ ไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งสามารถแทนได้ด้วยสมการ ต่อไปนี้

$$V_a = AX_a I^a \quad (4)$$

โดย

V_a คือ แรงดันอาร์ก (หน่วยเป็น โวลต์)

A และ a เป็นค่าคงที่ของอาร์ก

X_a เป็นความยาวอาร์ก (หน่วย เป็นเมตร)

I เป็นกระแส อาร์ก (หน่วยเป็นแอมป์)

ตามที่อธิบายไว้แล้ว ความยาวอาร์ก (X_a) ไม่จำเป็นต้องเท่ากับ ความยาวของแถบแห้ง (X) ดังนั้น ความสัมพันธ์ระหว่าง X_a และ X จึงสามารถเขียนได้เป็น

$$X_a = k_a X \quad (5)$$

โดย K_a คือแฟกเตอร์ความยาวอาร์ก ซึ่ง $0 < k_a < 1$

ค่าแฟกเตอร์นี้ใช้สำหรับการอาร์กข้าม ระหว่างร่องหรือ ครีบ ในลูกถ้วยที่ใช้งานจริงทั่วไป และมีความเป็นไปได้ที่ k_a จะมากกว่า 1 ภายใต้สภาวะที่แน่นอนเช่น ขอบของการอาร์ก ค่าความต้านทาน $R(X)$ ขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. รูปร่างของลูกถ้วยตามที่แสดงไว้ด้วย Form Factor
2. การกระจายตัวของสิ่งเปราะเปื้อนและความชื้นบนผิวของลูกถ้วย
3. ความเข้มข้นของกระแสที่รากของอาร์ก

ในทางปฏิบัติฟังก์ชัน $R(X)$ เป็น แบบไม่เป็นเส้นตรง อย่างไรก็ตาม ตามที่ได้อธิบายไว้แล้ว โดยมากจะมีความเป็นไปได้ที่จะประมาณฟังก์ชันนี้ด้วยความสัมพันธ์แบบเป็นเชิงเส้น เช่น

$$R(X) = \frac{L - X}{2\pi R_e \sigma_s} = \frac{(L - X)F}{L \sigma_s} \quad (6)$$

โดย

F คือ Form Factor

σ_s เป็นค่าเฉลี่ยของผิวตัวนำ

ดังนั้น รวมสมการ (1) กับ (6) จะได้

$$V = AK_a XI^{-a} + \frac{(L - X)IF}{L\sigma} \quad (7)$$

การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ ของ V , I , X และ σ_s แสดงให้เห็นว่า I และ X เพิ่มขึ้น โดยปราศจากข้อจำกัดเมื่อถึงเงื่อนไขวิกฤติ ดังนี้

$$\sigma_s = F \left(\frac{S_e}{817} \right)^{\frac{a+1}{a}} \frac{(K_a A)^{\frac{1}{a}}}{L} \quad (8)$$

ในสมการนี้ S_e ในหน่วย mm/kv (แรงดันระหว่างสาย) เป็น คุณสมบัติความยาว Creepage เขียนสมการได้ดังนี้

$$S_e = \frac{1000\sqrt{2L}}{\sqrt{3V}} = \frac{817L}{V} \quad (9)$$

ทฤษฎีตามพื้นฐานสำคัญตามสมการ (8) ได้คาดคะเนระบบกระแสตรงไวต์ว่งหน้าเพิ่มเติมเข้าไปในการประมาณการที่กล่าวไว้ข้างต้น โดยมากมักจะใช้กับระบบกระแสสลับ และดังนั้นแรงดัน (V) จึงแทนค่าแรงดันสูงสุด ในกรณีนี้ค่าของ ค่าคงที่ของการอาร์ก (A) ได้มีการคำนึงถึง ผลจากความร้อนที่ไม่สมบูรณ์ ของอาร์กแล้ว (คือยอมให้เกิดผลจากความร้อนที่ไม่สมบูรณ์ของอาร์กได้) และดังนั้นค่า A จึงเป็นค่าที่มีประสิทธิผล และยังแสดงถึง แฟคเตอร์ต่าง ๆ ในทางปฏิบัติตามที่กล่าวมาแล้ว

แบบจำลองของการจุดประกายซ้ำด้วยระบบไฟกระแสสลับ (AC Re-Ignition Model) วิธีการที่แม่นยำยิ่งขึ้นสำหรับถูกด้วยขณะใช้งานระบบไฟกระแสสลับ ได้แก่ การรวมคุณสมบัติที่เกี่ยวกับการ การจุดประกายซ้ำของอาร์กไว้ในแบบจำลองด้านบน นอกเหนือจากในสมการ (7) แล้วยังจะต้องคำนึงถึงสิ่งที่เป็นข้อจำกัดของการ การจุดประกายซ้ำ ดังต่อไปนี้ด้วย เช่น ค่าสูงสุดของแรงดันที่ป้อนเข้าไปต้องเกินค่าแรงดันซึ่งเขียน เป็นสมการได้ดังนี้

$$V = NX_a I^{-a} \quad (10)$$

ในกรณีนี้มีการปรับแต่งให้เป็น

$$\sigma_x = \frac{Fn}{Lk_a(N-A)} \left(\frac{k_a NS_e}{817(a+1)} \right)^{\frac{n+1}{n}} \quad (11)$$

สมการ (8) และ (11) มีรูปแบบเดียวกัน และตามที่ได้พิจารณาถึงความตึงเครียดจากการ วาบไฟตามผิวมานั้น สมการทั้งสองจึงเทียบเท่ากัน โดยมีข้อแม้ว่าจะต้องใช้ค่าตัวเลขของค่าคงที่ที่ ถูกต้อง มีข้อสังเกตที่น่าสนใจคือ ในสมการทั้งสองนี้ แฟลคเตอร์ k_a จะปรากฏอยู่ถัดจาก A หรือ N เสมอ อิทธิพลของ ช่วงสั้น ๆ ของการอาร์ก จึงเป็นผลทำให้เกิดค่าปรับแต่ง ของ A และ N เช่น $A_m = k_a A$ และ $N_m = k_a N$ ในสมการเหล่านี้ค่า k_a ควรจะมีอยู่ก็ต่อเมื่อถึงเงื่อนไขการวาบไฟ ตามผิววิกฤติ เท่านั้น

นอกจากนั้น ยังแสดงให้เห็นว่า กระแสวิกฤติ ที่เกี่ยวข้องกับ เงื่อนไขวิกฤติในสมการ (11) สามารถเขียนได้เป็นสมการดังนี้

$$I_c = \left(\frac{k_a NS_e}{817(n+1)} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (12)$$

ประเภทของสิ่งเปื้อน

สิ่งเปื้อนในแต่ละท้องถิ่นอาจจะไม่เหมือนกัน ขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดของสิ่งเปื้อน ว่าอยู่ใกล้บริเวณใด ดังนั้น จึงสามารถแบ่งประเภทของสิ่งเปื้อนตามแหล่งกำเนิดของสิ่งเปื้อนได้ 4 ชนิดหลัก ๆ (นิรนาม, 2536) ดังนี้

1. สิ่งเปื้อนบริเวณชายทะเล

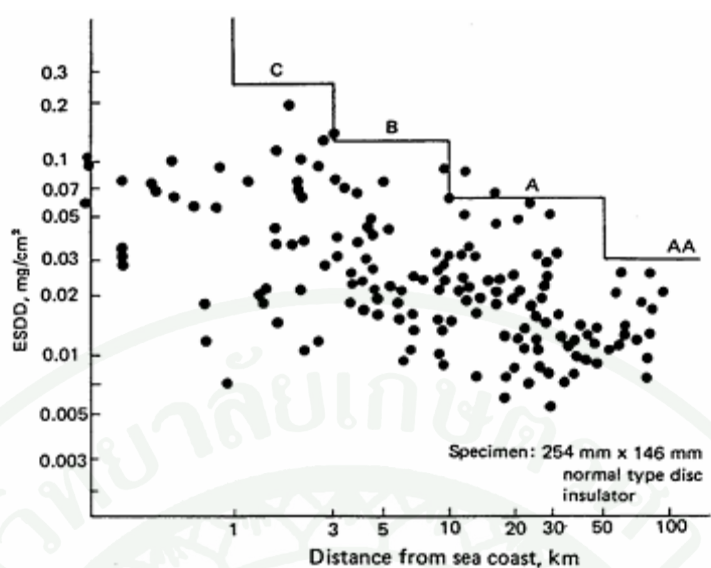
สิ่งเปื้อนบริเวณชายทะเล (Marine Contamination) ได้แก่ สิ่งเปื้อนที่มีส่วนผสมของเกลือทะเล (NaCl) ซึ่งแบ่งได้ตามลักษณะการสะสมบนผิวลูกถ้วยได้เป็น 2 ชนิดคือ

1.1 สิ่งเปื้อนบริเวณชายทะเลชนิดสะสมแบบธรรมดา

สิ่งเปื้อนบริเวณชายทะเลชนิดสะสมแบบธรรมดา (Ordinary Salt Contamination) เกิดจากการสะสมสิ่งเปื้อนที่ใช้เวลาค่อนข้างนาน ในบริเวณที่มีลมปกติที่พัดตามฤดูกาล ตามชายฝั่งทะเล

1.2 สิ่งเปื้อนบริเวณชายทะเลชนิดสะสมแบบรวดเร็ว

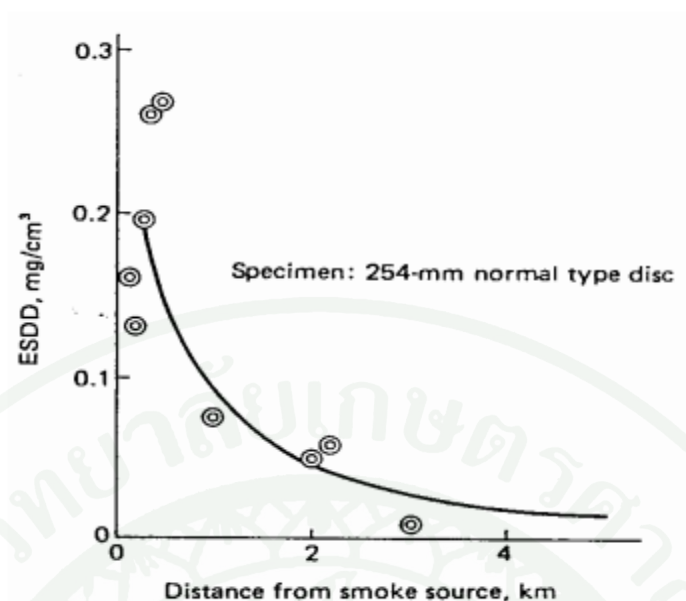
สิ่งเปื้อนบริเวณชายทะเลชนิดสะสมแบบรวดเร็ว (Rapid Salt Contamination) เกิดจากการสะสมของสิ่งเปื้อนตามชายฝั่งทะเลที่มีลมแรง ในสภาพนี้ลูกถ้วยจะสกปรกมากและรวดเร็ว ปรากฏการณ์การเกิดวาบไฟตามผิวจะเกิดมากขึ้นทันที ในบริเวณที่มีหมอกหรือฝนตกบ่อย ๆ หรือ มีน้ำค้าง เป็นต้น ความเร็วลมที่ทำให้สิ่งเปื้อนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วนี้ปกติมีค่าประมาณ 5-10 เมตร/วินาที และ ยังขึ้นกับสภาพภูมิประเทศด้วย สภาพลมแรงอาจเป็นพายุลมได้ฝุ่น หรือ ลมมรสุมต่าง ๆ ก็ได้ ตามปกติแล้วระดับของสิ่งเปื้อนจะลดลงไปเมื่อลึกลงไปจากชายฝั่งทะเล อย่างไรก็ดีตาม อิทธิพลของสิ่งเปื้อนแถบชายทะเลนี้เคยพบห่างไกลออกไปเป็น 100 กม. จากชายฝั่ง



ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESDD และระยะทางจากทะเล

2. สิ่งเปื้อนจากโรงงานอุตสาหกรรม

สิ่งเปื้อนจากโรงงานอุตสาหกรรม (Industrial Contamination) เกิดจากการพัฒนาของอุตสาหกรรม เมื่อมีแหล่งอุตสาหกรรมขนาดใหญ่เพิ่มขึ้น ก็ทำให้มีแหล่งกำเนิดสิ่งเปื้อนมากขึ้นด้วย สิ่งเปื้อนประเภทนี้ จะมีผลต่อลูกถ้วยในระบบส่งและจำหน่ายที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงกัน ซึ่งบางครั้งเป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโรงงานเหล่านั้นเอง แต่โดยปกติโรงงานอุตสาหกรรมจะตั้งอยู่ในบริเวณที่จำกัด และตัวโรงงานก็มักติดตั้ง เครื่องกรองควัน และฝุ่นทำให้ลดความรุนแรงได้ นอกจากนี้แล้ว ระดับของสิ่งเปื้อนชนิดนี้จะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อห่างไกลจากโรงงานมากขึ้น ระดับของสิ่งเปื้อนชนิดนี้จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อห่างจากแหล่งกำเนิดสิ่งเปื้อนมากขึ้น สิ่งเปื้อนจากโรงงานอุตสาหกรรมมีหลายชนิด ขึ้นกับประเภทของอุตสาหกรรมนั้น ๆ (เช่น อุตสาหกรรมถลุงแร่ เคมี ปิโตรเคมี หรือโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ เป็นต้น) สิ่งเปื้อนบางชนิด ล้างออกได้ง่ายเหมือนสิ่งเปื้อนจากทะเล แต่สิ่งเปื้อนบางชนิด ติดผิวลูกถ้วยได้อย่างแน่นหนา เช่น ฝุ่นจากซีเมนต์ โรงงานอุตสาหกรรมที่ตั้งอยู่ชายฝั่งทะเล จะทำให้เกิดสิ่งเปื้อนแบบผสมในบริเวณนั้นได้



ภาพที่ 13 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESDD และระยะทางจากแหล่งผลิตควัน

3. สิ่งเปื้อนจากฝุ่น

สิ่งเปื้อนจากฝุ่น (Dust Contamination) สิ่งเปื้อนที่เกิดการสะสมบนผิวลูกถ้วยจำพวกเศษดินละเอียดเป็นฝุ่น และถูกพัดมาโดยลม สารละลายเกลือของฝุ่นชนิดนี้ ส่วนใหญ่ประกอบด้วยแคลเซียมซัลเฟต (Calcium Sulphate) และโซเดียมคลอไรด์ (Sodium Chloride) องค์ประกอบของสารละลายเหล่านี้ เปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งที่ตั้ง ในบางครั้งสารละลายของเกลือนั้นอาจมีแคลเซียมซัลเฟต เป็นส่วนประกอบประมาณ 30-70 % ส่วนสารละลายชนิดเกลือโซเดียมคลอไรด์เกิดขึ้นโดยทั่วไปในพื้นที่ต่าง ๆ นอกจากนี้ อาจเกิดขึ้นจากการฉีดพ่นปุ๋ย ให้กับต้นไม้ พืช ผัก หรือการเผาไหม้ของกากธัญพืชต่าง ๆ เมื่อมีลมพัดก็จะนำเอาสิ่งเหล่านั้นแพร่กระจายออกไป

4. สิ่งเปื้อนจากทะเลทราย

สิ่งเปื้อนจากทะเลทราย (Desert Contamination) สิ่งเปื้อนจากทะเลทรายจะสะสมบนผิวลูกถ้วยได้จำนวนมาก เพราะว่า การชะล้างด้วยฝนไม่เพียงพอ สิ่งเปื้อนส่วนใหญ่จะเป็น เศษดินหรือเศษทราย ในกรณีที่ทะเลทรายอยู่ใกล้ชายฝั่งสิ่งเปื้อนเหล่านั้นจะมีเกลือรวมอยู่ในเศษดินทรายนั้น

คุณลักษณะของระดับสิ่งเปื้อน

ในพื้นที่การติดตั้ง ถึงแม้ว่าจะมีสิ่งเปื้อนหลายชนิด แต่ผลกระทบที่มีต่อสมรรถนะของลูกถ้วย จะสามารถประเมินได้ 2 แฟกเตอร์คือ ความนำไฟฟ้าซึ่งเป็นส่วนที่เกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขการเปียกน้ำ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปริมาณของสิ่งเปื้อนที่ละลายในน้ำ และความสามารถที่จะเก็บความชื้นไว้ และขนาดของกระแสรั่ว ก็จะเป็นสัดส่วนกับความนำไฟฟ้า ดังนั้น สมรรถนะของลูกถ้วยที่เปื้อนสามารถที่จะถูกคาดหมายว่าจะเสื่อมลง จากความนำไฟฟ้าที่ผิวของลูกถ้วยที่เพิ่มขึ้น และช่วงเวลาของปฏิกิริยาเคมีสสารจะขึ้นอยู่กับจำนวนของความชื้นที่เกิดขึ้น สิ่งเปื้อนจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ สิ่งเปื้อนชนิดละลายน้ำได้ และละลายน้ำไม่ได้ สิ่งเปื้อนชนิดที่ละลายน้ำได้จะมีผลมากกับสมรรถนะของลูกถ้วยพารามิเตอร์นี้เรียกว่า ความเข้มข้นการสะสมเทียบเท่าเกลือ (Equivalent Salt Deposit Density,ESDD) ซึ่งได้มีการใช้สำหรับการพิจารณาคุณลักษณะระดับของสิ่งเปื้อน ค่า ESDD จะถูกจำกัดความจากจำนวนของโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ได้จากผลของการวัดความนำไฟฟ้าโดยนำเอาสิ่งเปื้อนบนผิวลูกถ้วยที่เกิดขึ้นจริง ๆ ออก ตามปริมาณของน้ำบริสุทธิ์ที่ถูกแบ่ง โดยพื้นผิวของผิวที่ถูกล้าง ดังนั้น ESDD จะทำให้เราถึงวิธีการโดยทั่วไปในการแสดงคุณลักษณะระดับความรุนแรงของสิ่งเปื้อนโดยไม่คำนึงถึงชนิดของสิ่งเปื้อนที่อาจเกิดขึ้นบนผิวลูกถ้วย วิธีสำหรับการวัดค่า ESDD เป็นไปตามมาตรฐาน IEC ANSI และมาตรฐานอื่น ๆ ค่า ESDD มีหน่วยเป็น mg/cm^2 ตารางที่ 3 แสดงค่าของ ESDD ซึ่งแบ่งตามระดับความรุนแรงของสิ่งเปื้อนตามค่า ESDD ซึ่งข้อมูลนี้ได้จากการวัดและหาค่าที่สถานที่ติดตั้ง(Gorur et al., 1986) และตารางที่ 2 แสดงการแบ่งระดับของสิ่งเปื้อนตามสภาพพื้นที่ (IEC 815, 1986)

ตารางที่ 2 การแบ่งระดับความรุนแรงของสิ่งเปื้อน ตามค่า ESDD

ค่า ESDD mg/cm^2	ระดับความรุนแรงของสิ่งเปื้อน
0-0.03	สะอาด หรือ น้อยมาก
0.03-0.06	เล็กน้อย
0.06-0.1	ปานกลาง
>0.1	รุนแรง

สิ่งเปราะเปื้อนชนิดที่ไม่ละลาย เรียกว่า ค่าความเข้มข้นของการสะสมสารละลายที่ไม่ละลายน้ำ (NSDD) จะมีผลกระทบไม่รุนแรงกับสมรรถนะของลูกถ้วยภายใต้เงื่อนไข ใช้งานในสภาวะมีสิ่งเปราะเปื้อน เมื่อเปรียบเทียบกับสิ่งเปราะเปื้อนชนิดละลายน้ำ NSDD แสดงค่าในหน่วยของ ปกติแล้วพื้นที่การติดตั้งที่อยู่นอกอาคาร สมรรถนะของลูกถ้วยที่เกิดจากสิ่งเปราะเปื้อนชนิดที่ไม่ละลายน้ำจะไม่พิจารณาเพราะมีผลน้อยมาก อย่างไรก็ตามใน บางพื้นที่ เช่นพื้นที่ที่มีลูกถ้วยติดตั้งอยู่ใกล้กับโรงงานอุตสาหกรรม มีขบวนการทางเคมี (เช่น ถลุงแร่ น้ำมัน กระจาย เป็นต้น) จะมีการสะสมของสิ่งเปราะเปื้อนชนิดที่ไม่ละลายน้ำอย่างรุนแรงจะทำให้แรงดันวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยที่ใช้งานในบริเวณนี้มีค่าลดลงประมาณ 25 % เมื่อเปรียบเทียบกับลูกถ้วยที่ติดตั้งในพื้นที่สะอาดในปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานที่จะพิจารณาเกี่ยวกับ NSDD การพิจารณาก็จะกระทำโดยการกรองสิ่งเปราะเปื้อนชนิดที่ไม่ละลายน้ำด้วยกระดาษกรอง แล้วปล่อยให้แห้ง แล้วชั่งน้ำหนักค่าของ NSDD จะแสดงในหน่วยของ ของพื้นที่ผิวของลูกถ้วยที่ล้างออกมา

ตารางที่ 3 การแบ่งระดับของสิ่งเปราะเปื้อนตามสภาพพื้นที่

ระดับของสิ่งเปราะเปื้อน	ตัวอย่าง
น้อยมาก	- บริเวณที่ปราศจากการประกอบอุตสาหกรรมและชุมชนที่มีอัตราการใช้เครื่องทำความร้อนปริมาณน้อย - บริเวณที่มีความหนาแน่นในการประกอบอุตสาหกรรมหรือที่อยู่อาศัยน้อยโดยที่จะต้องเป็นบริเวณที่มีลมพัดผ่านหรือมีฝนตกบ่อย - บริเวณเขตเกษตรกรรมหรือบริเวณที่อยู่ใกล้ ๆ ภูเขา โดยที่พื้นที่ทั้งหมดเหล่านี้ จะต้องอยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลไม่น้อยกว่า 10-20 กิโลเมตร และจะต้องไม่ได้รับลมทะเลโดยตรง
เล็กน้อย	- บริเวณเขตอุตสาหกรรมที่ไม่ได้มีการสร้างฝุ่นหรือควันออกมาและอาจเป็นบริเวณย่านชุมชนที่มีอัตราการใช้เครื่องทำความร้อนปานกลาง - บริเวณย่านชุมชนหรือเขตอุตสาหกรรมหนาแน่นแต่จะต้องมีลมพัดผ่านหรือฝนตกปรอย ๆ - บริเวณที่มีลมทะเลพัดผ่าน ซึ่งจะต้องอยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลพอสมควร (ควรจะห่างหลาย ๆ กิโลเมตร)
ปานกลาง	- เขตอุตสาหกรรมหนาแน่นหรือบริเวณชานเมืองของเมืองใหญ่ ที่มีอัตราการใช้เครื่องทำความร้อนสูง
รุนแรง	- บริเวณที่ได้รับลมทะเลที่รุนแรงโดยตรงหรือชายฝั่งทะเล - บริเวณที่เป็นเขตรับฝุ่นควันจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยตรง - บริเวณที่อยู่ใกล้ชายฝั่งทะเลมาก ๆ ซึ่งมีการรับเอาสิ่งเปราะเปื้อนที่พัดมาจากทะเลโดยตรง - ทะเลทรายที่มีโอกาสฝนตกน้อยมาก จะต้องรับลมที่นำเอาทรายและไอเกลือเข้ามา

ตารางที่ 3 (ต่อ)

- หมายเหตุ
1. บริเวณเกษตรกรรมในบริเวณที่ระดับสิ่งประอะเปื้อนเล็กน้อย ถ้ามีการใช้ปุ๋ยโดยการฉีดพ่นหรือ มีการเผาไหม้ของกากธัญพืชต่าง ๆ เมื่อมีลมพัดนำเอาสิ่งเหล่านั้นแพร่กระจายออกไป ระดับของสิ่งประอะเปื้อนอาจจะอยู่ในระดับสูง
 2. บริเวณที่อยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลหรืออยู่ใกล้ชายฝั่งทะเลในบริเวณที่ระดับสิ่งประอะเปื้อนปานกลาง หรือสูง ระยะทางที่พิจารณาจะต้องขึ้นอยู่กับลักษณะภูมิประเทศของชายฝั่งทะเล และลักษณะของลมทะเลที่เกิดขึ้นด้วย

การวัดสิ่งเปราะเปื้อน

ในทางอุดมคติการวัดระดับของสิ่งเปราะเปื้อน ที่สถานที่ติดตั้ง ควรจะใช้ข้อมูลทุกอย่างที่จำเป็นในการคำนวณค่าความน่าจะเป็น ที่จะทำให้เกิดการวาบไฟตามผิว เนื่องจากสิ่งเปราะเปื้อนกับลูกถ้วยทุกชนิดที่ติดตั้งที่สถานที่ติดตั้งนั้น ๆ และใช้งานที่แรงดันที่กำหนดไว้ แล้วจะต้องคำนึงถึงสภาวะแวดล้อมทุกชนิดที่สถานที่ติดตั้ง ซึ่งจะมีผลต่อขั้นตอนต่าง ๆ ของขบวนการเกิดการวาบไฟตามผิว เนื่องจากสิ่งเปราะเปื้อน รวมถึงการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่เป็นสถิติ ที่เกี่ยวข้องในแต่ละขั้นตอนด้วย วิธีการที่ใช้วัดระดับสิ่งเปราะเปื้อนที่สถานที่ติดตั้ง (IEC 815, 1986) มีหลายวิธีคือ

1) การวัดหาค่าความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตรของสิ่งเปราะเปื้อนที่รวบรวมโดยวิธี

Directionalgauges

2) การวัดหาค่าปริมาณการสะสมของสิ่งเปราะเปื้อนบนผิวลูกถ้วยเทียบเท่ากับปริมาณเกลือ (NaCl) ซึ่งจะหาค่าความนำไฟฟ้าเท่ากับค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายที่ได้จากการนำสิ่งเปราะเปื้อนมาละลายน้ำที่มีปริมาณเท่ากันซึ่งจะเรียกวิธีนี้ว่าการหาค่า ESDD (Equivalent Salt Deposit Density)

3) การนำเอาข้อมูลทางสถิติจำนวนครั้งของการเกิดวาบไฟตามผิวของพวงลูกถ้วยที่มีความยาวแตกต่างกันมาทำการวิเคราะห์

4) การวัดค่าความนำไฟฟ้าเชิงผิวของลูกถ้วยตัวอย่าง

5) การวัดค่ากระแสรั่วไหลของลูกถ้วยขณะที่ได้รับแรงดันใช้งานปกติ (เป็นการหาค่ากระแสรั่วไหลสูงสุดที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่พิจารณา)

การวัดระดับสิ่งเปราะเปื้อนแต่ละวิธีจะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันกล่าวคือ วิธีที่ 1 และ 2 สามารถทำได้โดยง่ายและไม่จำเป็นที่จะต้องใช้เครื่องมือที่มีราคาแพง แต่วิธีที่ 1 นั้นไม่ได้ให้ข้อมูลลักษณะช่วงเวลาการสะสมและระดับของความเปราะเปื้อนออกมาโดยตรง วิธี 2 ข้อมูลที่ได้จะเป็นระดับของความเปราะเปื้อนที่เกิดขึ้นในสภาวะที่ผิวลูกถ้วยมีความเปียกชื้น ความถูกต้องของการวัดทั้ง 2 วิธีนี้ จะขึ้นอยู่กับความถี่ในการวัด ถ้าการสะสมของสิ่งเปราะเปื้อนเกิดขึ้นไม่เรื้อรัง ก็

อาจจะวัดเดือนละครั้ง หรือ เว้นระยะห่างกว่านี้ แต่ถ้าวัดการสะสมของสิ่งเปรอะเปื้อนเกิดขึ้นรวดเร็วก็จะต้องทำการวัดถี่ขึ้น สำหรับวิธีที่ 3 นั้นจำเป็นที่จะต้องใช้อุปกรณ์ทดสอบที่มีราคาแพง ข้อมูลที่ได้จะถูกต้องเฉพาะลูกถ้วยที่มีความยาวใกล้เคียงกับลูกถ้วยที่พิจารณา และใช้งานที่ระดับแรงดันใกล้เคียงกัน สองวิธีสุดท้ายต้องการแหล่งพลังงานและอุปกรณ์เก็บบันทึกข้อมูลต่อเนื่อง วิธีการประเมินค่าระดับของสิ่งเปรอะเปื้อนที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ได้แก่ การวัดค่า ESDD การวัดค่าความต้านทานของผิว และการวัดหาค่ากระแสรั่วไหล

การหาค่าระดับสิ่งเปรอะเปื้อนนั้นเพื่อให้ข้อมูลที่ได้มีความถูกต้องน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น IEC 815 ได้แนะนำให้พิจารณาองค์ประกอบต่าง ๆ ต่อไปนี้เพิ่มเติมคือ ลักษณะของพื้นที่แต่ละแห่งที่สัมพันธ์กับระดับความเปรอะเปื้อน และข้อมูลของเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในขณะที่ใช้งานของลูกถ้วย ซึ่งจำเป็นจะต้องให้ผู้เชี่ยวชาญมาทำการวิเคราะห์

แต่ละวิธีจะเกี่ยวข้องกับขั้นตอนต่าง ๆ ของขบวนการเกิดการวางไฟตามผิว เนื่องจากสิ่งเปรอะเปื้อนบางวิธีการเกี่ยวข้องกับขบวนการนี้เพียงขั้นตอนเดียว แต่บางวิธีเกี่ยวข้องกับขบวนการนี้หลายขั้นตอน แต่ในเอกสารนี้จะกล่าวเฉพาะวิธีการวัดค่า ความเข้มข้นสะสมเทียบเท่าเกลือ (วิธี ESDD) สาเหตุที่เลือกวิธีนี้ เป็นวิธีที่ใช้มาก เพราะไม่ต้องใช้อุปกรณ์ที่มีความสลับซับซ้อน และไม่ต้องใช้แหล่งจ่ายไฟที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำ ซึ่งต้องลงทุนสูง และนำไปติดตั้งในจุดที่ยังไม่มีไฟฟ้าใช้ไม่ได้ เทคนิคและการวัดที่ทันสมัยเหมาะที่จะนำมาใช้กับระบบส่งกำลังไฟฟ้าขนาดใหญ่ ระดับแรงดันสูง ๆ และต้องการระบบที่มีความน่าเชื่อถือได้สูง

การวัดสิ่งเปรอะเปื้อนโดยวิธีหาค่า ESDD มีดังนี้

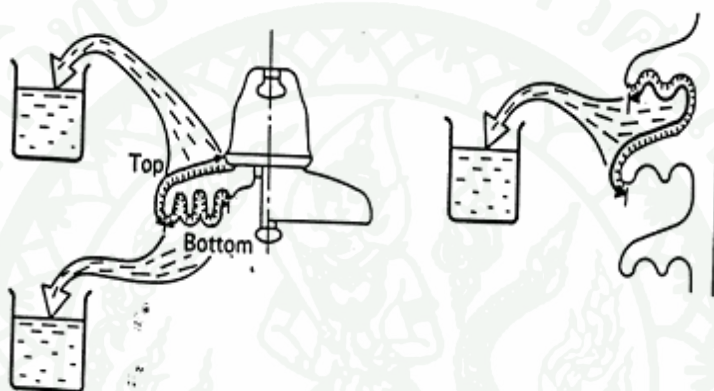
สำหรับวิธีการวัดสิ่งเปรอะเปื้อนโดยวิธีหาค่า ESDD จะแบ่งสิ่งเปรอะเปื้อนออกเป็น 2 ชนิด คือสิ่งเปรอะเปื้อนที่ละลายน้ำได้ และสิ่งเปรอะเปื้อนที่ละลายน้ำไม่ได้ (นิรนาม, 2536) สำหรับรายละเอียดและวิธีการวัดมีดังนี้

1. การวัดจำนวนของสิ่งเปรอะเปื้อนที่ละลายน้ำได้

โดยทั่วไปจำนวนของสิ่งเปรอะเปื้อนที่ละลายน้ำได้ จะแสดงค่าโดย ค่าความเข้มข้นการสะสมเทียบเท่าเกลือ (Equivalent Salt Deposit Density, ESDD) ค่า ESDD จะหาค่าได้โดยการวัดค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายที่เป็นสิ่งเปรอะเปื้อนที่นำมาจากผิวลูกถ้วยและคำนวณค่าเทียบเท่ากับจำนวนของเกลือ (NaCl) ที่มีค่าความนำไฟฟ้าเท่ากัน

วิธีในการวัดค่า ESDD มีดังนี้

ขั้นตอนการเก็บสิ่งเปราะเปื้อน โดยนำน้ำกลั่นที่จำนวนที่แน่นอนใส่ลงไปใน Beaker นำสิ่งเปราะเปื้อนจากผิวลูกถ้วยโดยการเช็ดด้วยผ้าที่ดูดความชื้นหรือใช้แปรง นำผ้าที่ใช้เช็ดผิวลูกถ้วยใส่ใน Beaker ดังแสดงตามภาพ 13 สิ่งเปราะเปื้อนจะถูกทำให้ละลายในน้ำโดยการเขย่าและบิดผ้าที่ใช้เช็ดอยู่ในน้ำที่ Beaker การเช็ดผิวลูกถ้วยจะถูกกระทำซ้ำจนกระทั่งไม่เหลือสิ่งเปราะเปื้อนบนผิวลูกถ้วย



ภาพที่ 14 วิธีการล้างลูกถ้วยเพื่อหาค่าสิ่งเปราะเปื้อน

จำนวนน้ำกลั่นที่จะใช้ขึ้นอยู่กับพื้นผิวและระดับสิ่งเปราะเปื้อน โดยทั่วไป จะใช้ประมาณ 100-500 ซีซี แต่อาจจะใช้ ถึง 1000-2000 ซีซี ในกรณีของสิ่งเปราะเปื้อนมีขนาดใหญ่เป็นชนิดละลายน้ำได้น้อย ปกติแล้วค่านำไฟฟ้าของน้ำกลั่นจะน้อยกว่า $5 \mu\text{s/cm}$ ถ้าความนำไฟฟ้าของน้ำกลั่นสูง ก็จะใช้ตัวประกอบแก้ไขสำหรับความนำไฟฟ้าเริ่มต้นของน้ำ

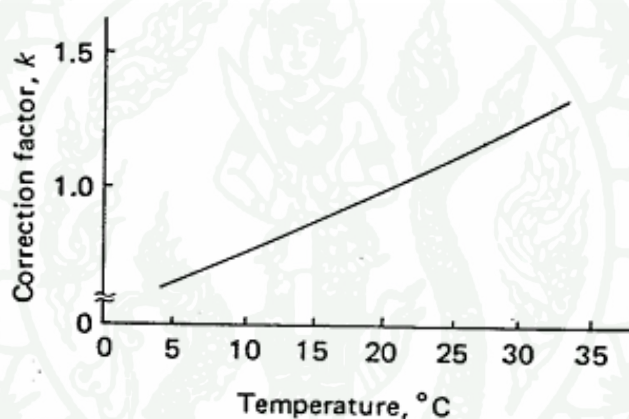
การคำนวณและวิเคราะห์หาค่า ESDD สามารถทำได้หลายวิธี ขึ้นอยู่กับระดับความต้องการความถูกต้องของค่า ESDD แต่วิธีที่นิยมมี 2 วิธีคือ การคำนวณและวิเคราะห์หาค่า ESDD ตามคำแนะนำในวารสาร NGK (นิรนาม, 2536) และการคำนวณและวิเคราะห์หาค่า ESDD ตามมาตรฐาน (IEC 507, 1991)

2. การคำนวณและวิเคราะห์หาค่า ESDD ตามคำแนะนำในวารสาร NGK มีวิธีการ ดังนี้

2.1 หลังจากทำการวัดความนำไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำที่มีส่วนผสมของสิ่งเปื้อนจะเป็น การวัดความนำไฟฟ้าของน้ำจะถูกต้องจะต้องเป็นความนำไฟฟ้าที่ อุณหภูมิ 20 องศา C โดยความสัมพันธ์ตาม Correction factor (k)

$$\sigma_{20} = \frac{\sigma_t}{k} \quad (13)$$

เมื่อ ค่า k คือ ตัวประกอบแก้ไขตามภาพที่ 15



ภาพที่ 15 แฟกเตอร์การแก้ไขอุณหภูมิของสารละลายโซเดียมคลอไรด์

สามารถคำนวณจากกราฟ จะได้สมการ

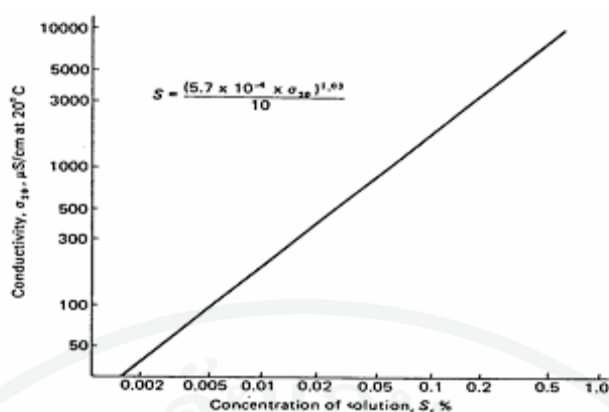
เมื่อ

σ_2 = ค่าความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตรที่อุณหภูมิ 20 องศา C ($\mu\text{s}/\text{cm}$)

σ_t = ค่าความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตรที่อุณหภูมิ t องศา C ($\mu\text{s}/\text{cm}$)

t = อุณหภูมิของสารละลาย (องศา C)

2.2 คำนวณค่า ความเป็นเกลือของสารละลาย ตามภาพที่ 15



ภาพที่ 16 กราฟแสดงความเข้มข้นการนำไฟฟ้าของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (ที่ 20 องศา C)

สามารถคำนวณจากกราฟ จะได้สมการ

$$D = \frac{(5.7 \times 10^{-4} \times \sigma_{20})^{1.03}}{10} \quad (14)$$

เมื่อ

D = ความเข้มข้นของสารละลาย
(Concentration of Solution (%))

2.3 คำนวณหาค่า ESDD ที่ผิวลูกถ้วยตามสมการ

$$ESDD = \frac{10 \times V \times (D_A - D_B)}{S} \quad (15)$$

เมื่อ

ESDD = Equivalent Salt Deposit Density, mg/cm²

V = ปริมาตรของน้ำกลั่นที่ใช้ (ml)

D_A = ความเข้มข้นของสารละลายเปอร์อะซิโตนเทียบเท่าเกลือ(%)

D_B = ความเข้มข้นของน้ำกลั่นรวมกับแปรงเทียบเท่าเกลือ(%)

S = พื้นที่ผิวของลูกถ้วยที่พิจารณา, (cm²)

3 การคำนวณหาค่า ESDD ตามมาตรฐาน IEC 507 มีวิธีการดังนี้

3.1 คำนวณค่าความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตร ที่อุณหภูมิ 20 องศา C ตามสมการดังนี้

$$\sigma_{20} = \sigma_{\theta} - [1 - \sigma(\theta - 20)] \quad (16)$$

เมื่อ

θ = อุณหภูมิของสารละลาย (องศา C)

σ_{θ} = ค่าความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตร ที่อุณหภูมิ θ องศา C (s/m)

σ_{20} = ค่าความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตร ที่อุณหภูมิ 20 องศา C (s/m)

σ = ค่าตัวประกอบแก้ไขแปรตาม อุณหภูมิของสารละลาย แสดงตาม ตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าตัวประกอบแก้ไขที่ใช้ในการหาค่า ความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตรที่อุณหภูมิต่าง ๆ

θ (องศา)	σ
5	0.03156
10	0.02817
20	0.02277
30	0.01905

ข้อสังเกต ในกรณีที่ค่าอุณหภูมิของสารละลายไม่ได้ระบุไว้ในตารางแต่ค่าอุณหภูมิดังกล่าวยังอยู่ในช่วง 5 องศา C-30 องศา C ค่าตัวประกอบแก้ไข σ สามารถหาได้โดยวิธีการประมาณในช่วง (Interpolation)

3.2 คำนวณค่าความเป็นเกลือ (Salinity ; Sa) (kg/m³) ของสารละลายเมื่อ σ_{20} มีค่าอยู่ในช่วง 0.004-0.4 s/m ตามสมการข้างล่าง

$$Sa = (5.7 \sigma_{20})^{1.03} \text{ (kg/m)}^3 \quad (17)$$

3.3 คำนวณค่า ESDD (Equivalent Salt Deposit Density) (mg/m²) ตามสมการข้างล่าง

$$ESDD = \frac{S_a \times V}{A} \quad (\text{mg/cm}^2) \quad (18)$$

เมื่อ

S_a = ค่าความเป็นเกลือของสารละลาย (kg/m³)

V = ปริมาตร สารละลาย (cm³)

A = พื้นที่ผิวลูกถ้วยที่พิจารณา (cm²)

ชนิดของสิ่งเปราะเปื้อนที่ละลายน้ำได้ แรงดันไฟฟ้าตามผิวเนื่องจากสิ่งเปราะเปื้อนจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายน้ำของสิ่งเปราะเปื้อนที่ละลายน้ำได้ ถึงแม้ว่าจำนวนของสิ่งเปราะเปื้อนบนผิวลูกถ้วยจะเหมือนกัน ชนิดของส่วนประกอบที่ละลายน้ำได้สามารถถูกประมาณตามขั้นตอน

สาเหตุที่ทำให้เกิด Pollution Flashover

ความต้านทานที่ผิว (Surface Resistance) ของลูกถ้วย ถ้าถูกพอกด้วยฝุ่นผงแห้งจะไม่ค่อยมีผลต่อลูกถ้วยนัก แต่จะมีผลเป็น Conducting Layer เมื่อลูกถ้วยเปียก กระแส Leakage จะไหลในชั้นนี้และน้ำจะเป็นไอจากบริเวณนี้ เมื่อผลคูณของ Current Density และ Surface Resistivity มีค่ามากพอซึ่งจะนำไปสู่การ Form ตัวของ Dry Circular Insulating Bands ให้มีความกว้างเพิ่มขึ้นจนกระทั่งกระแส Leakage ลดลงไปถึงค่าที่จะไม่ทำให้เกิดเป็นไอ

Pollution Flashover จะเกิดขึ้นได้บ่อยในเงื่อนไขของการเกิดหมอกและการฉีดน้ำเกลือหรือลูกถ้วยเคลือบด้วย Film ซึ่งเป็น Polluted Water บางครั้งเงื่อนไขนี้เกิดจากการละลายของ Polluted Ice โดยกระแส Leakage

ปัญหาการใช้ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าในระบบส่งจ่าย

หากลูกถ้วยฉนวนที่ติดตั้งใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีสิ่งเปรอะเปื้อน (polluted environment) เช่น ฝุ่น ควัน สารเคมี และเกลือ เป็นต้น ก็อาจมีผลกระทบมาจากสิ่งเปรอะเปื้อนต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนในระบบส่งจ่าย ทำให้เกิดการรบกวนไฟตามผิวลูกถ้วย ซึ่งมีสาเหตุมาจากความเปรอะเปื้อนทำให้เกิดความผิดปกติในระบบส่งจ่ายทำให้การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าต้องหยุดชะงัก

การไฟฟ้าเป็นผู้ใช้ลูกถ้วยฉนวนจำนวนมากจะประสบปัญหาที่ลูกถ้วยฉนวนที่ติดตั้งใช้งานในบริเวณที่เปรอะเปื้อนแล้วเกิดวาวไฟตามผิวขึ้น โดยเฉพาะเมื่อมีหมอกหรือความชื้นในอากาศ

การออกแบบและการเลือกใช้ลูกถ้วยฉนวนในบริเวณที่มีสิ่งเปรอะเปื้อนได้อย่างเหมาะสมจะเป็นการป้องกันมิให้เกิดความผิดปกติอันเนื่องมาจากสิ่งเปรอะเปื้อนได้ ปัญหาดังกล่าวของการไฟฟ้าที่ต้องการลูกถ้วยฉนวนที่มีคุณภาพเหมาะสมต่อสภาพอากาศที่มีสิ่งเปรอะเปื้อน นอกจากปัญหาความเปรอะเปื้อนจะทำให้เกิดวาวไฟตามผิวได้ง่ายแล้ว ความเปรอะเปื้อนประเภทสารเคมีและไอเกลือ ยังทำให้เกิดการกัดกร่อนส่วนที่เป็นโลหะและผิวของฉนวน

ปัญหาอีกประการหนึ่งที่สำคัญของการใช้ลูกถ้วยในระบบส่งจ่ายชนิดสายชิงอากาศ มีโอกาสจะถูกฟ้าผ่าโดยตรงบนสายส่งหรือแม้แต่ผ่าลงบนสายดิน จะทำให้ลูกถ้วยฉนวนได้รับแรงดันเกินเลิร์จ ซึ่งมีความชันสูงมาก (steep front) อาจทำให้ลูกถ้วยเกิดเจาะทะลุได้ (punctured) แทนที่จะเกิดวาวไฟตามผิวลูกถ้วย ส่งผลให้ลูกถ้วยเสียสภาพฉนวนอย่างถาวร นั่นหมายถึงจะมีผลกระทบต่อเสถียรภาพและความเชื่อถือได้ของระบบ

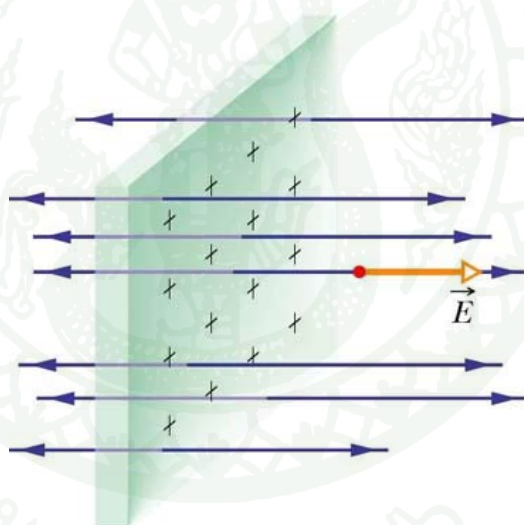
การเลือกใช้ลูกถ้วยฉนวนให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อม

ปัญหาการใช้ลูกถ้วยดังที่กล่าวมานั้น วิศวกรหรือผู้ที่มีหน้าที่ในการออกแบบการใช้ลูกถ้วยฉนวนจะต้องคำนึงถึงผลกระทบของสภาพแวดล้อมที่มีต่อลูกถ้วยฉนวน เลือกลูกถ้วยชนิดแบบที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมให้มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในสภาพเปรอะเปื้อนได้ดี เลือกรูปแบบที่มีระยะรั้วป้องกัน (Protection leakage distance) ยาวมากเป็นพิเศษ เช่น ลูกถ้วยแบบฟ็อก (fog type) เป็นต้น เลือกชนิดผิวเปียกยากเก็บสะสมความเปรอะเปื้อนได้ยาก หรือชะล้างโดยธรรมชาติเอง เช่น ใช้น้ำฝนและในย่านที่มีฟ้าผ่าหนาแน่นควรเลือกลูกถ้วยชนิดที่มีความคงทนของ

เนื่องจนวนต่อแรงดันอิมพัลส์คลื่นชั้นได้สูง หรือมีรูปแบบที่ไม่มีโอกาสจะทะลุได้แก่ ลูกถ้วยคอตันทั้งหลาย และลูกถ้วยแท่ง (line post)

สนามไฟฟ้าคืออะไร

สนามไฟฟ้า (Electric field) หมายถึง "บริเวณโดยรอบประจุไฟฟ้า ซึ่งประจุไฟฟ้าสามารถส่งอำนาจไปถึง" หรือ "บริเวณที่เมื่อนำประจุไฟฟ้าเข้าไปวางแล้วจะเกิดแรง กระทำบนประจุไฟฟ้านั้น" ตามจุดต่างๆ ในบริเวณสนามไฟฟ้า ย่อมมีความเข้มของ สนามไฟฟ้าต่างกัน จุดที่อยู่ใกล้ประจุไฟฟ้า จะมีความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงกว่าจุดที่อยู่ ห่างไกลออกไป นอกจากนั้น ณ จุดต่างๆ ในบริเวณสนามไฟฟ้าย่อมจะปรากฏศักย์ไฟฟ้า มีค่าต่างๆ กันด้วย ซึ่งเป็นศักย์ไฟฟ้า ชนิดเดียวกันกับ ศักย์ไฟฟ้าอัน เกิดจากประจุไฟฟ้า ที่เป็นเจ้าของสนามไฟฟ้า จุดที่อยู่ใกล้ประจุไฟฟ้าจะมีศักย์สูงกว่าจุดที่อยู่ไกลออกไป



ภาพที่ 17 สนามไฟฟ้า

กฎของเกาส์ (Gauss' law)

เส้นฟลักซ์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้านั้นมีแหล่งกำเนิดมาจากประจุไฟฟ้าใดๆ โดยฟาราเดย์ได้พบความสัมพันธ์ระหว่างประจุกับความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้านั้น โดยใช้ชื่อว่า กฎของเกาส์ (Guass' law) ซึ่งใช้เป็นทฤษฎีพื้นฐานเพื่อการคำนวณทางสนามไฟฟ้าสถิตดังนี้

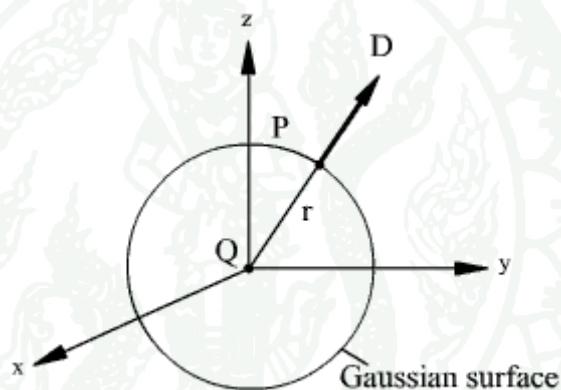
$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = Q = \int_V \rho_v dV \quad (19)$$

เมื่อ S คือเวกเตอร์พื้นที่ผิวปิดของการอินทิเกรตโดยมีหน่วยเป็น m^2

V คือปริมาตรในพื้นที่ผิวปิดนั้นๆ โดยมีหน่วยเป็น m^3

ρ_v คือความหนาแน่นของประจุต่อปริมาตรที่อยู่ภายในของพื้นที่ผิวปิดโดยมีหน่วยเป็น C/m^3

Q คือค่าประจุรวมภายในพื้นที่ผิวปิดโดยมีหน่วยเป็น C



ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์กฎของเกาส์

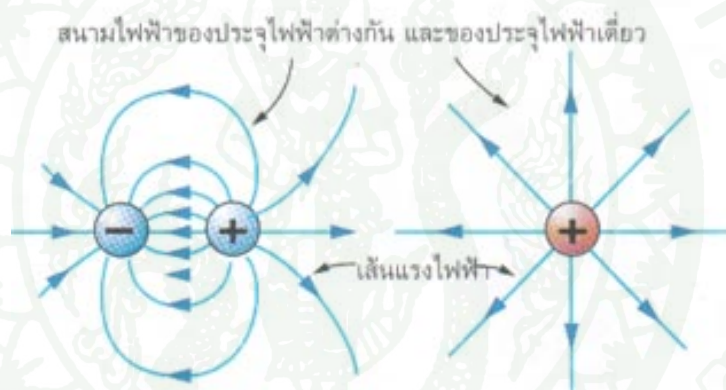
เพื่อความสะดวกในการเขียนสมการในการวิเคราะห์ โดยการอาศัยทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ของกรีนส์ (Greene's Theorem) ที่แปลงการอินทิเกรตสองมิติเชิงพื้นที่ผิวปิดให้เป็นการอินทิเกรตสามมิติเชิงปริมาตรในพื้นที่ผิวปิดนั้นๆ แล้วจะทำให้ได้ความสัมพันธ์ใหม่ที่สามารถเขียนกฎของเกาส์อยู่ในรูปแบบดังกล่าวเป็นนิยามของทฤษฎีไดเวอร์เจนซ์ (Divergence Theory) ซึ่งเป็นสมการอีกรูปแบบหนึ่งของกฎของเกาส์ที่นำไปใช้กันอย่างกว้างขวาง และยังเป็นสมการหนึ่งในชุดสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell Equations)

$$\int_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = \int_V \nabla \cdot \mathbf{D} dv = \int_V \rho_v dv$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v \quad (20)$$

เส้นแรงไฟฟ้า

เส้นแรงไฟฟ้า หมายถึง หมายถึงเส้นที่เราสมมติขึ้นเพื่อแสดงแรงที่ประจุหนึ่งกระทำกับประจุทดสอบ โดยมีลูกศรชี้ทิศของแรงที่เราใช้ในการอธิบายถึงสนามไฟฟ้า



ภาพที่ 19 เส้นแรงไฟฟ้า

สมบัติของเส้นแรงไฟฟ้า

1. มีทิศพุ่งออกจากประจุบวกและพุ่งเข้าสู่ประจุลบ
2. มีทิศตั้งฉากกับผิวของวัตถุเสมอ
3. ไม่ผ่านผิวตัวนำ แต่จะสิ้นสุดที่ผิวของตัวนำ
4. สามารถผ่านฉนวนไฟฟ้าได้
5. แต่ละเส้นไม่ตัดกัน

ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นแรงไฟฟ้ากับสนามไฟฟ้า

1. ถ้าเส้นแรงไฟฟ้าที่อยู่ชิดกันมาก แล้วสนามไฟฟ้าจะมีค่ามาก แต่ถ้าเส้นแรงไฟฟ้าอยู่ห่างกันมากแล้วสนามไฟฟ้าจะมีค่าน้อย
2. ถ้าเส้นแรงไฟฟ้าขนานและห่างกันสม่ำเสมอ แล้วสนามไฟฟ้าจะคงตัว เช่น สนามไฟฟ้าที่เกิดจากแผ่นโลหะคู่ขนานที่มีประจุไฟฟ้า
3. สำหรับวัตถุตัวนำทรงกลม 2 วงขนาดต่างกันซ้อนกัน ภายในทรงกลมกลวงไม่มีเส้นแรงไฟฟ้า เส้นแรงไฟฟ้าจะสิ้นสุดอยู่ที่ผิวนอกของทรงกลมกลวงเท่านั้น และเส้นแรงไฟฟ้าทุกเส้นมีแนวผ่านจุดศูนย์กลางของทรงกลม ในกรณีนี้ ภายในทรงกลมกลวงไม่มีสนามไฟฟ้า

คุณสมบัติของเนื้อสารที่มีต่อสนามไฟฟ้า

คุณสมบัติของเนื้อสารที่มีต่อสนามไฟฟ้าเรามักจะใช้ค่าพารามิเตอร์คือ ค่าความยินยอมทางไฟฟ้า (Electric permittivity , ϵ) ส่วนพารามิเตอร์ค่าต่อมาที่มักใช้กันในบางกรณีคือค่าสภาพการนำทางไฟฟ้า (Conductivity , σ) มีหน่วยเป็น S/m ค่าความนำนี้เป็นตัวชี้ให้เห็นว่าประจุหรืออิเล็กตรอนในสารนั้นๆ สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายหรือสละหรือไม่ สำหรับสารที่มีค่าสภาพการนำทางไฟฟ้าเป็นศูนย์ ($\sigma = 0$) แสดงว่าเป็นสารที่ไม่มีประจุอิสระที่เคลื่อนที่ได้ระหว่างอะตอมและจะเรียกสารประเภทนี้ว่าสารไดอิเล็กทริกสมบูรณ์ (Perfect dielectric) สำหรับสารตัวนำไฟฟ้าทั่วไปแล้วมักจะมีค่าสภาพการนำทางไฟฟ้ามากกว่าศูนย์ ($\sigma > 0$) โดยถ้าสารใดที่ค่าสภาพการนำทางไฟฟ้ามากจนกระทั่งอาจจะถือว่าเป็นค่าอนันต์ ($\sigma > \infty$) แล้วสารนั้นจะมีประจุอิสระจำนวนมากที่สามารถเคลื่อนที่ได้อยู่นอกอะตอมของเนื้อสารนั้นแล้วจะเรียกสารประเภทนี้ว่า ตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ (Perfect conductor)

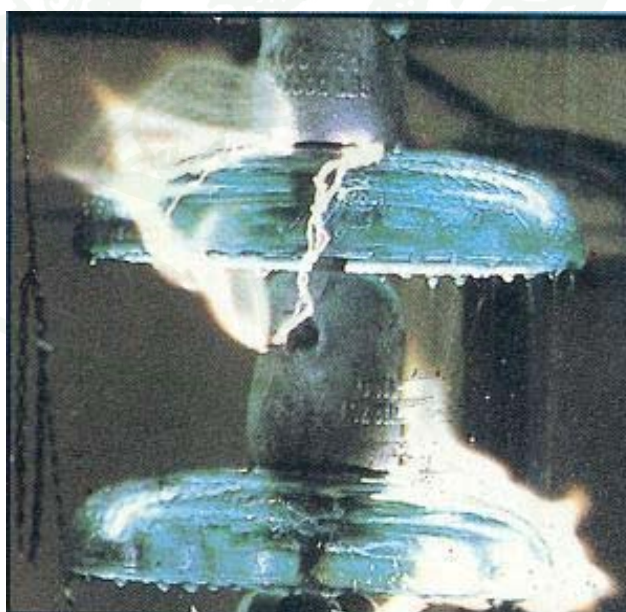
Material	ϵ_r
Aluminium (1 kHz)	$-1300 + j1.3 \times 10^{14}$ [2]
Silver (1 kHz)	$-85 + j8 \times 10^{12}$ [2]
Vacuum	1 (by definition)
Air	$1.00058986 \pm 0.00000050$ (at STP, for 0.9 MHz), [3]
Teflon	2.1
Polyethylene	2.25
Polystyrene	2.4–2.7
Carbon disulfide	2.6
Paper	3.5
Electroactive polymers	2–12
Silicon dioxide	4.5
Concrete	4.5
Pyrex (Glass)	4.7 (3.7–10)
Rubber	7
Diamond	5.5–10
Salt	3–15

ภาพที่ 20 ค่าความอินทางไฟฟ้าของวัสดุ

อุตสาหกรรม จากท่อไอเสีย ฝุ่นผงจากการเกษตร-อุตสาหกรรม หรือ แม้แต่ทะเลทราย เหล่านี้จะสะสมอยู่บนผิวของลูกถ้วยไฟฟ้ามาก หรือน้อย ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของการปนเปื้อน (Degree of contamination) ของสถานที่นั้น ๆ ความสกปรกดังกล่าวนี้ เป็นตัวการทำให้เกิดกระแสรั่วลงดิน (Leakage Current) และกลายเป็น Flashover ในที่สุด ลูกถ้วยไฟฟ้าที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไป นั้น สามารถใช้งานอยู่ในสถานที่ ที่มีความเข้มข้นของการปนเปื้อนในอากาศในระดับปานกลาง ความสกปรกที่เกิดบนลูกถ้วยในรอบปี จะถูกชะล้างออกโดยฝนประจำปี แต่หากสถานที่ใดก็ตามที่มีระดับความเข้มข้นของการปนเปื้อนสูง หรือสูงมาก ผลก็คือจะเกิด Leak และ Flashover ในที่สุด ซึ่งผลที่ตามมาคือ การเกิดไฟฟ้าขัดข้องบ่อย ๆ นั่นเอง

ความหมายของ Flashover

นับวันปัญหาไฟดับจากไฟแฟลชผ่านลูกถ้วยไฟฟ้า หรือเรียกทางภาษา ช่างไฟฟ้า ว่าแฟลชโอเวอร์ (Flashover) จะทวีความรุนแรงและความถี่ขึ้นเรื่อยๆ ทั้งนี้เพราะมลภาวะ (Pollution) ในอากาศสูงขึ้นเรื่อยๆ เช่น ไอสารเคมีจากโรงงานอุตสาหกรรม ละอองน้ำจากคูลลิ่งทาวเวอร์ (Cooling Tower), เขม่าจากท่อไอเสีย, ฝุ่นผงจากโรงงานทอผ้า, โรงงานปูนซีเมนต์, โรงงานเหล็ก, ตลอดจนห้องเย็น, การก่อสร้าง และการหมุนเวียนถ่ายเทของอากาศ ซึ่งวัดเป็นความเข้มข้นของการปนเปื้อน (Degree of contamination) ความปนเปื้อนหรือความสกปรกเหล่านี้เมื่อไปสะสมบนลูกถ้วย ก็จะทำให้ความเป็นฉนวน (Insulation) บนลูกถ้วยลดลง ยิ่งถ้ารวมกับความชื้นจากละอองน้ำ จากคูลลิ่งทาวเวอร์ หรือน้ำค้างหรือหมอก ก็ยังเป็นตัวเร่งให้มีกระแสรั่วผ่านลูกถ้วยมากขึ้น (Leakage current) หนักเข้าและกลายเป็น Flashover ในที่สุดโดยปรกติความเป็นฉนวนของลูกถ้วย(เซรามิก หรือ แก้ว) ไม่ว่าจะส่วนของโครงสร้างผิวหรือเนื้อในของฉนวนจะออกแบบและถูกสร้างออกมาให้ทนต่อสภาวะต่างๆ ทางธรรมชาติพร้อมทั้ง ให้ทนได้ต่อการตกของฝนในลักษณะต่างๆ รวมทั้งหมอกและน้ำค้าง ทนได้ต่อระดับแรงดันไฟฟ้าระดับสูง ที่อาจเกิดขึ้นได้ในลักษณะต่างๆ (เช่นเกิดฟ้าผ่าหรือการเกิดฟอลท์) ทนได้ต่อไอเกลือ ฝุ่นละอองที่สะสมเป็นปกติธรรมชาติ และจะถูกชะล้างออกไปโดยฝนประจำปี ฯลฯ ซึ่งกว่าจะกว่าจะออกแบบให้ได้ลูกถ้วยมาใช้ในระบบ ต้องเป็นที่แน่ใจว่า ได้ต้องถูกทดสอบตามมาตรฐานต่างๆจนเป็นที่ยอมรับซึ่งมีรายละเอียดทางวิศวกรรมมากมาย



ภาพที่ 21 การเกิดวาบไฟบริเวณฉนวนลูกถ้วย

ปัจจัยและขั้นตอนที่ทำให้เกิด Flashover

ปัจจัยที่ทำให้เกิด Flashover มี 2 ปัจจัย คือ ความชื้นและฝุ่นละอองปนเปื้อนบนลูกถ้วยแต่ขั้นตอนที่จะนำมาสู่การเกิด Flashover มี 3 ขั้นตอน

ขั้นตอนที่ 1 ฝุ่นละอองปนเปื้อนจะเกาะเป็นพื้นที่ต่อเนื่องทำให้เกิดกระแสรั่ว (Leakage Current)

ขั้นตอนที่ 2 ความร้อนจากกระแสรั่วจะสร้างพื้นที่แห้งถาวรขึ้น (Dry Band) ความต่างศักย์ระหว่าง Dry Band จะทำให้เกิดอาร์ค (Arc) ขึ้น

ขั้นตอนที่ 3 ความร้อนจาก Arc จะสูงมากทำให้เกิดร่อง (Tracking) ผิวลูกถ้วยที่ถูกความร้อนทำลาย ก็จะกลายเป็นคาร์บอนเกาะในร่อง ซึ่งคาร์บอนเป็นสื่อไฟฟ้าอย่างหนึ่ง ยิ่งระยะเวลาที่ยาวนานก็ยิ่งจะทำให้ขนาดของร่องใหญ่ขึ้น ทำให้ความต้านทานลูกถ้วยลดลงเรื่อยๆ เช่นกัน และเกิด Flashover ในที่สุด



ภาพที่ 22 จำลองการเกิด Flashover บนฉนวนลูกถ้วย

ผลกระทบจาก Flashover

หากไฟดับในบ้านเรือนความเสียหายเพียงเล็กน้อยหรือ แทบจะมองไม่เห็นความสูญเสีย แต่หากไฟดับในโรงงานอุตสาหกรรมหรือธุรกิจขนาดกลางและขนาดใหญ่ ความเสียหายจะยิ่งเพิ่มขึ้นอย่างมาก ปัญหา Flashover ไม่ค่อยเกิดในพื้นที่ ที่มีมลภาวะทางอากาศต่ำ แต่จะพบในพื้นที่ที่มีการจราจรคับคั่ง, พื้นที่โรงงานอุตสาหกรรม, พื้นที่ใกล้น้ำเค็มหรือชายทะเล พบน้อยในแรงดันระดับต่ำกว่า 1,000 โวลต์ (1 kV.) แต่จะพบมากในแรงระดับกลางและระดับสูงคือมากกว่า 1,000 โวลต์ ขึ้นไป ซึ่งแรงดันระดับสูงมักถูกใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมและห้างสรรพสินค้าใหญ่ ๆ ทั่วไป

หากถามว่าไฟดับเนื่องจาก Flashover มีผลต่อบ้านเรือนหรือไม่ เพราะบ้านใช้แรงดันต่ำ แต่ Flashover เกิดในแรงดันสูง? คำตอบคือมีผลกระทบแน่นอน และมีเป็นบริเวณกว้างด้วย เนื่องจากก่อนที่จะมาเป็นไฟแรงต่ำมาใช้ตามบ้านเรือนนั้น ต้องผ่านการปรับจากแรงดันสูงให้มาก่อน ดังนั้นเมื่อไฟฟ้าแรงดันสูงที่ดันทางดับ ย่อมส่งผลกระทบต่อสถานีไฟฟ้าย่อยหรือหม้อแปลงที่ใช้ปรับแรงดันไฟฟ้าให้เป็นแรงต่ำเพื่อจ่ายให้ผู้ใช้งาน ส่วนใหญ่คือบ้านเรือนดับเช่นกัน หากไฟดับ ในแรงดันสูงก็หมายความว่าสถานีไฟฟ้าย่อยนั้นจะไม่มีไฟฟ้าจ่ายในพื้นที่ (Zone) ของตนเลย โดยเฉพาะ ถ้าหากสถานีย่อยนั้นใช้ระบบ Inline คือมีไฟแรงสูงเข้าวงจรเรียบร้อยแล้วไฟฟ้าจะดับเป็นเวลานาน เพราะต้องรอให้แก้ไขจุดที่ Flashover ให้เสร็จก่อน การเกิด Flashover เนื่องจากมลภาวะในอากาศจะมีตัวแปร (Factor) สำคัญที่ทำให้เกิดอยู่ 2 ตัว คือ ความชื้น และ สารปนเปื้อนสะสมบนลูกถ้วย โดยปกติความชื้นจะประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำ (H_2O) ที่มีลักษณะเป็นประจุไฟฟ้าลบแบบอ่อนๆ เพราะมีอะตอมของออกซิเจนประกอบอยู่ ทำให้อากาศที่มีความชื้นมีความคงทนต่อแรงดันสูงได้ ทรายเท่าที่ความชื้นนี้ยังไม่กลั่นตัวเป็นหยดน้ำ (Cordon) หรือยังไม่ถึงจุดน้ำค้าง แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นความชื้นจะมีผลต่อค่าแรงดันเบรคดาวน์ (Break down Voltage) จะหมดค่าความเป็นฉนวนขึ้นมาทันที ถ้าหากอยู่ในสถานะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอที่เกิดดิสชาร์จก่อน (Discharge)

กล่าวโดยสรุปคือความชื้นจะมีค่าความเป็นฉนวนทรายเท่าที่มันยังไม่กลั่นตัวเป็นหยดน้ำ และทรายเท่าที่กระแสไฟฟ้าไม่ไหลผ่านฉนวนลูกถ้วยก่อน ถ้ามีกระแสไหลผ่านลูกถ้วยจะด้วยเหตุใดก็ตามความชื้นรอบๆ ลูกถ้วยก่อนจะเปลี่ยนสภาพจากฉนวนกลายเป็นสื่อทางไฟฟ้า ช่วยให้กระแสไหลได้มากยิ่งขึ้น ในเรื่องฉนวนจะทนได้ต่อความชื้นนี้จะต้องเป็นไปตามมาตรฐาน IEC (Pbl. No.60) โดยทั่วไปความชื้นในอากาศจะมีผลทำให้ความคงทนต่อการเกิด Flashover ลดลงอยู่

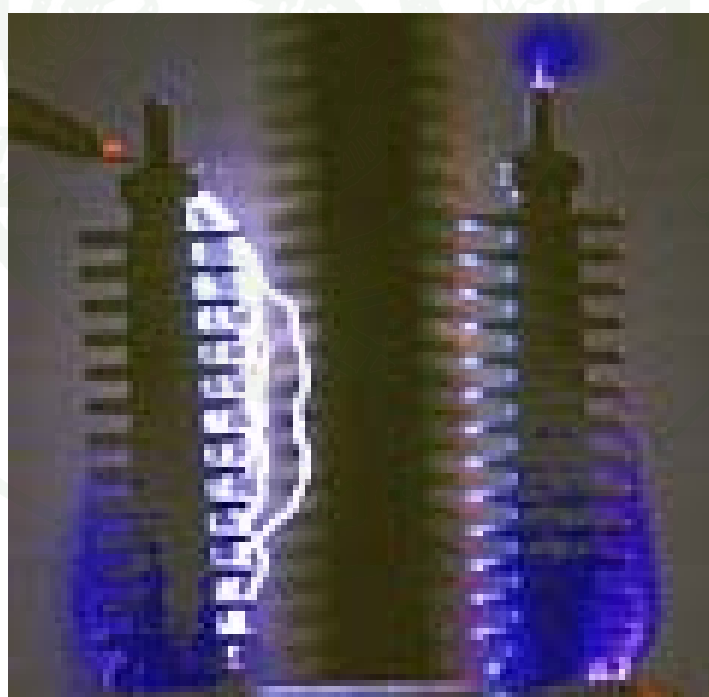
แล้วโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อกลิ่นตัวเป็นน้ำคั่งแต่ผลเหล่านี้จะมีมากขึ้นอีกเมื่อผิวหนังมีสิ่งเปราะเปื้อนเกาะอยู่ ซึ่งจากผลการวิจัยสามารถคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ในการทนต่อการเกิด Flashover ได้ดังนี้

- ผิวถูกด้วยเหงื่ออวด ความเป็นฉนวน 100 %
- น้ำคั่ง, หมอก ความเป็นฉนวน 25-50 %
- ฝนตก ความเป็นฉนวน 60-70 %
- สิ่งปนเปื้อนผสมน้ำคั่งหรือหมอก ความเป็นฉนวนน้อยกว่า 25%

จากเปอร์เซ็นต์ที่ทนได้ต่อการเกิด Flashover เราจะเห็นได้ว่าเพียงความชื้นก็ทำให้การคงทนต่อการเกิด Flashover ลดน้อยลงมาก และถ้ารวมกับสิ่งเปราะเปื้อนบนผิวหนังก็ยิ่งทำให้ความคงทนนั้นลดน้อยลงไปอีก แต่อย่างไรก็ตามพวกสิ่งเปราะเปื้อนธรรมดาๆ ที่สะสมนี้ก็จะถูกแรงลมพัดเป่าออกไปบ้าง ยังได้ฝนประจำปีชะล้างด้วยแล้วก็แทบจะหายไปทั้งหมดดังจะเห็นได้จากถูกด้วยมาตรฐานที่ใช้อยู่ทั่วไปแทบจะไม่เคยเกิด Flashover เลยอย่างมากก็จะได้ยินเสียงดังเหมือนเสียงจิ้งหรีดดังตามยอดเสาบ้างเป็นครั้งคราว แต่ถ้าเจอกับสิ่งเปราะเปื้อนที่ไม่ธรรมดา เช่น ไอเคมี, ฝุ่นละอองจากภาคอุตสาหกรรม, ละอองน้ำจากระบบหล่อเย็น (Cooling Tower) และขี้เถ้า ซึ่งทั้งความเป็นกรดและด่างมีความสามารถในการกัดกร่อนและเกาะตัวยึดติดได้สูง แรงลมหรือฝนประจำปีก็ไม่สามารถชะล้างออกไปได้ สิ่งเปราะเปื้อนเหล่านี้จึงถูกสะสมขึ้นเรื่อยๆ เมื่อถึงระดับหนึ่งก็เกิดการ Flashover ในที่สุด



ภาพที่ 23 การเกิด Flashover บนระบบจำหน่ายไฟฟ้า



ภาพที่ 24 จำลองการเกิด Flashover

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความประเอือนมีดังนี้

1. มิเตอร์วัดความนำไฟฟ้า และอุณหภูมิของน้ำ สามารถวัดความนำไฟฟ้าได้ต่ำถึง 1 $\mu\text{S}/\text{cm}$



ภาพที่ 25 มิเตอร์วัดความนำไฟฟ้า

2. น้ำบริสุทธิ์ มีค่าความนำไฟฟ้าต่ำกว่า 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$
3. ถ้วยตวง ขนาด 1000 cm^3
4. กระดาษ มีคุณสมบัติไม่เป็นฟุ้งขุย ไม่ทำให้ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำเปลี่ยนแปลงไปมาก

วิธีการ

การทดลองได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

การทดลองที่ 1 วัดค่าสิ่งแปรอะปรือนที่เกาะติดลูกถ้วย

1. ทำการติดตั้งลูกถ้วยแบบก้านตรงในนิคมอุตสาหกรรม เป็นระยะเวลา 6, 9 เดือน และ 12 เดือน โดยแยกออกเป็นมีสายไฟและไม่มี



ภาพที่ 26 การติดตั้งลูกถ้วย

2. วัดค่า ESDD ที่ได้จากลูกถ้วยมีไฟและไม่มีไฟ



ภาพที่ 27 วัดค่าลูกถ้วย

2.1. ขั้นตอนการวัดความเปรอะเปื้อนของลูกถ้วยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 2.1.1. นำลูกถ้วยที่จะตรวจวัดลงจากเสา โดยระวังไม่ให้เกิดการสัมผัสผิวของลูกถ้วย หรือสัมผัสให้น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้



ภาพที่ 28 การนำลูกถ้วยลงจากเสา

2.1.2. ล้างทำความสะอาดถ้วยตวงให้สะอาด



ภาพที่ 29 การทำความสะอาดถ้วยตวง

2.1.3. ใช้ถ้วยตวงเพื่อตวงน้ำปริมาตร 500 cm^3 แล้วนำกระดาษจุ่มลงไปใต้น้ำ



ภาพที่ 30 การทำความสะอาดถ้วยตวง

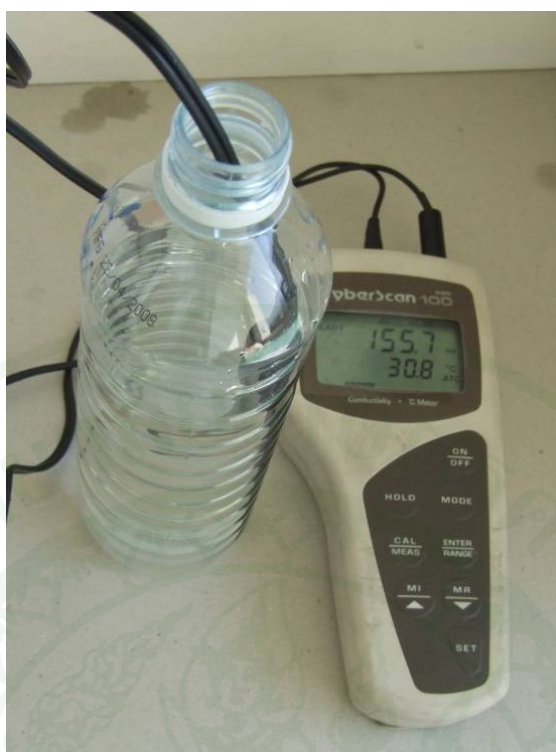
2.1.4. ใช้มิเตอร์วัดความนำไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำแล้วจดบันทึก โดยค่าความนำไฟฟ้าของน้ำต้องน้อยกว่า $10 \mu\text{S} / \text{cm}$



ภาพที่ 31 การวัดความนำไฟฟ้า

2.1.5. บีบน้ำออกจากกระดาษก่อนนำไปเช็ดลูกถ้วย นำกระดาษกลับไปจุ่มและเขย่าในน้ำแล้วบีบน้ำออกอีกครั้งก่อนนำไปเช็ดลูกถ้วยต่อ ทำเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนลูกถ้วยสะอาด ไม่มีสิ่งเปรอะเปื้อนเหลืออยู่บนพื้นผิวลูกถ้วย (ยกเว้นส่วนที่เป็นโลหะไม่ต้องเช็ดทำความสะอาด)

2.1.6. คนน้ำให้สิ่งเจือปนละลายก่อนใช้มิเตอร์วัดค่าความนำไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำอีกครั้งแล้วจดบันทึก



ภาพที่ 32 การวัดค่าของสารละลาย

2.1.7. ทำความสะอาดลูกถ้วยอีกครั้งด้วยน้ำสะอาดแล้วนำลูกถ้วยกลับขึ้นไปบนเสา
เช่นเดิม

หมายเหตุ ทำการวัดเดือนละครั้ง แต่ในช่วงฤดูมรสุมให้ทำการวัดสัปดาห์ละ 1 ครั้ง

3. คำนวณหาค่า ESDD ดังนี้

3.1. หาพื้นที่ผิวของลูกถ้วยที่ใช้จากตารางที่ 1

ตารางที่ 5 พื้นที่ผิวของลูกถ้วยประเภทต่าง ๆ

ชนิดของลูกถ้วย	พื้นที่ผิว (cm ²)
ลูกถ้วยแท่ง 57-3	2,133.9
ลูกถ้วยแท่ง 57-4	4,673.3
ลูกถ้วยแท่งก้านตรง 56/57-4	2,216.0
ลูกถ้วยก้านตรงแบบ Fog	5,474.2
ลูกถ้วยแขวน 52-4 (1 ลูก)	1,582.75

3.2. คำนวณค่าความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตร ที่อุณหภูมิ 20°C ใช้สมการ (16)

$$\sigma_{20} = \sigma_{\theta} [1 - b(\theta - 20)] \quad (21)$$

θ คือ อุณหภูมิของสารละลาย (°C)

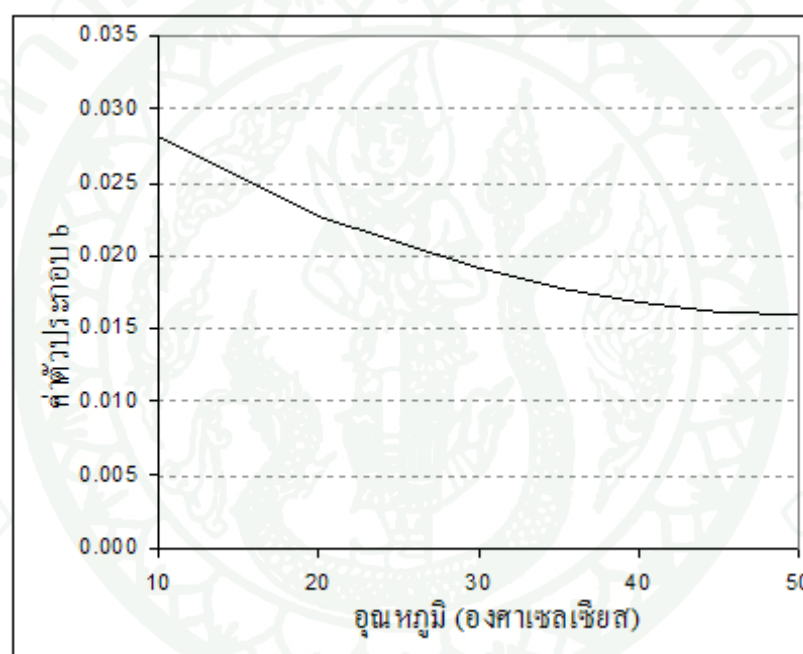
σ_{θ} คือ ค่าความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตร ที่อุณหภูมิ θ °C (S/m)

σ_{20} คือ ค่าความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตร ที่อุณหภูมิ 20°C (S/m)

b คือ ค่าตัวประกอบแปรตามอุณหภูมิของสารละลาย พิจารณาได้จากตารางที่ 1 หรือใช้สมการที่ (2)

ตารางที่ 6 ค่าตัวประกอบ b ที่อุณหภูมิต่างๆ

θ ($^{\circ}\text{C}$)	B
5	0.03156
10	0.02817
15	0.02277
20	0.1905



ภาพที่ 33 ค่าตัวประกอบ b ที่อุณหภูมิต่างๆ

สมการหาค่าตัวประกอบ b ที่อุณหภูมิต่างๆ

$$b = -3.200 \times 10^{-8} \theta^3 + 1.032 \times 10^{-5} \theta^2 - 8.272 \times 10^{-4} \theta + 3.544 \times 10^{-2} \quad (22)$$

3.3. คำนวณค่าความเข้มข้นของเกลือ (Salinity ; S_a)

ใช้สมการ (3) สำหรับค่า ที่อยู่ในช่วง 0.004 – 0.4 S/m

$$S_a = (5.7\theta_{20})^{1.03} \text{ kg/m}^3 \quad (23)$$

3.4. คำนวณค่า ESDD (Equivalent Salt Deposit Density)

ใช้สมการ (24)

$$ESDD = \frac{S_a V}{A} \text{ mg/cm}^2 \quad (24)$$

เมื่อ S_a คือ ค่าความเข้มข้นของสารละลายเกลือ (kg/m^3)

V คือ ปริมาตรสารละลาย (cm^3)

A คือ พื้นที่ผิวลูกถ้วย (cm^2)

ตัวอย่างการคำนวณค่า ESDD

ตัวอย่างข้อมูลของลูกถ้วยแท่ง 57-4 และข้อมูลความเปรอะเปื้อนที่วัดได้หลังจากการติดตั้งลูกถ้วยเป็นเวลา 1 เดือน มีดังนี้

พื้นที่ผิวของลูกถ้วย (A) $4,673.3 \text{ cm}^2$

ปริมาตรน้ำที่ใช้วัด (V) 500 cm^3

อุณหภูมิของน้ำ 29.8°C

ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำก่อนทำความสะอาดลูกถ้วย ($\sigma_{\theta \text{ before}}$) $4.04 \text{ }\mu\text{S/m}$

ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำหลังทำความสะอาดลูกถ้วย ($\sigma_{\theta \text{ after}}$) $50.2 \text{ }\mu\text{S/m}$

วิธีคำนวณ

1.) ค่าตัวประกอบ

$$b = -3.200 \times 10^{-8} \times 29.8^3 + 1.032 \times 10^{-5} \times 29.8^2 - 8.272 \times 10^{-4} \times 29.8 + -3.544 \times 10^{-2} \\ = 0.01911$$

2.) ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำก่อนล้างลูกถ้วย

$$\sigma_{20;before} = \sigma_{\theta;before} [1 - b(\theta - 20)] \\ = 4.04 \times 10^{-4} \times [1 - 0.01911(29.8 - 20)] \\ = 3.28 \times 10^{-4} \text{ S / m}$$

ค่าความเข้มข้นของเกลือในน้ำก่อนล้างลูกถ้วย

$$S_a = (5.7\theta_{20})^{1.03} \\ = (5.7 \times 0.000328)^{1.03} \\ = 1.55 \times 10^{-3} \text{ kg / m}^3$$

3.) ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำหลังล้างลูกถ้วย

$$\sigma_{20;after} = \sigma_{\theta;after} [1 - b(\theta - 20)] \\ = 50.2 \times 10^{-4} \times [1 - 0.01911(29.8 - 20)] \\ = 40.8 \times 10^{-4} \text{ S / m}$$

ค่าความเข้มข้นของเกลือในน้ำหลังล้างลูกถ้วย

$$S_a = (5.7\theta_{20})^{1.03} \\ = (5.7 \times 0.00408)^{1.03} \\ = 20.77 \times 10^{-3} \text{ kg / m}^3$$

4.) ปริมาณเกลือที่ติดอยู่บนผิวของลูกถ้วย

$$ESDD = \frac{(S_{a;after} - S_{a;before})V}{A} \\ = \frac{(20.77 - 1.55) \times 10^{-3} \times 500}{4673.3} \\ = 0.002056 \text{ mg / cm}^3$$

ที่มา : โครงการวิจัยเพื่อตรวจวัดระดับมลภาวะในระบบจำหน่ายไฟฟ้าพื้นที่ภาคใต้ของ กฟภ.
ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4. นำค่า ESDD ที่ได้มาเปรียบเทียบกับระหว่างลูกถ้วยมีไฟและไม่มีไฟ (6, 9 และ 12 เดือน)

การทดลองที่ 2 หาค่า ESDD ในการเกิดวาวไฟ

1. นำสิ่งเปราะเปื้อนที่ได้จากการล้างลูกถ้วยมาผสมกับน้ำกลั่นบริสุทธิ์ และเกลือ
ดังภาพที่ 34

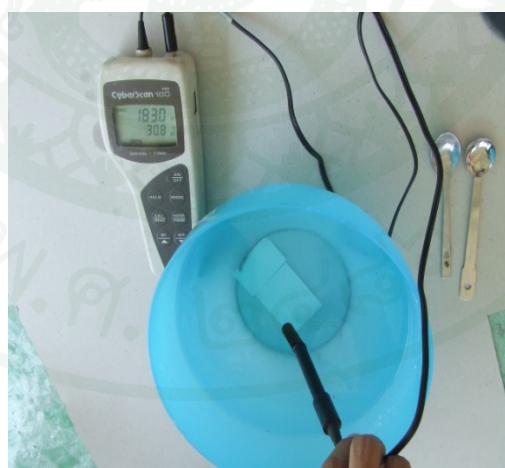
อุณหภูมิ น้ำกลั่น	ค่าความนำของ น้ำกลั่น	ปริมาณเกลือ (g)	อุณหภูมิ น้ำที่ผสม	ค่าความนำ น้ำที่ผสม	ค่า ESDD
25.7	3.24 μS	2.5	31.6	5.72 mS	0.11
25.7	3.24 μS	3.5	31.5	9.09 mS	0.19
25.7	3.24 μS	5	30.7	10.34 mS	0.22
25.7	3.24 μS	7	31.3	15.48 mS	0.33
25.7	3.24 μS	10	31.9	18.59 mS	0.39
25.7	3.24 μS	14	31.1	27.9 mS	0.61
25.7	3.24 μS	20	31	34.2 mS	0.75
25.7	3.24 μS	28	31	48.4 mS	1.08
25.7	3.24 μS	40	30.8	59.2 mS	1.34
25.7	3.24 μS	56	31.4	80.3 mS	1.81
25.7	3.24 μS	80	32.8	100.6 mS	2.22
25.7	3.24 μS	112	30.9	128 mS	2.96
25.7	3.24 μS	160	30.8	155.7 mS	3.62
25.7	3.24 μS	224	30.8	183 mS	4.28

ภาพที่ 34 ส่วนผสมของสารละลาย

2. นำสารละลายที่ผสมแล้วพ่นใส่ในรางวัดขนาด 100 cm^2 , 16 cm^2 และ 4 cm^2 จากนั้นปล่อยกระแสไฟให้ไหลผ่านรางวัดจนกว่าจะเกิดการวบไฟ เพื่อหาค่า ESDD ที่มีการเกิดการวบไฟ



ภาพที่ 35 ถ้วยตวงสารละลาย



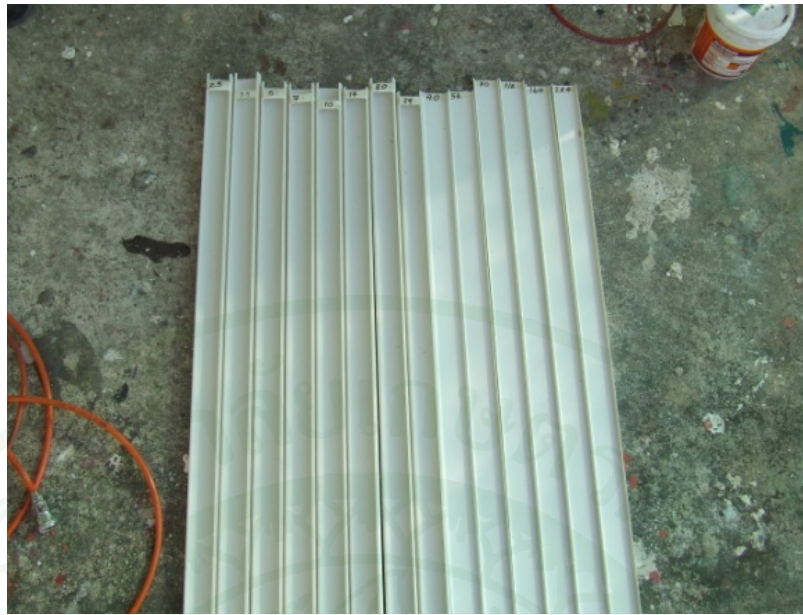
ภาพที่ 36 วัดค่าความนำไฟฟ้า



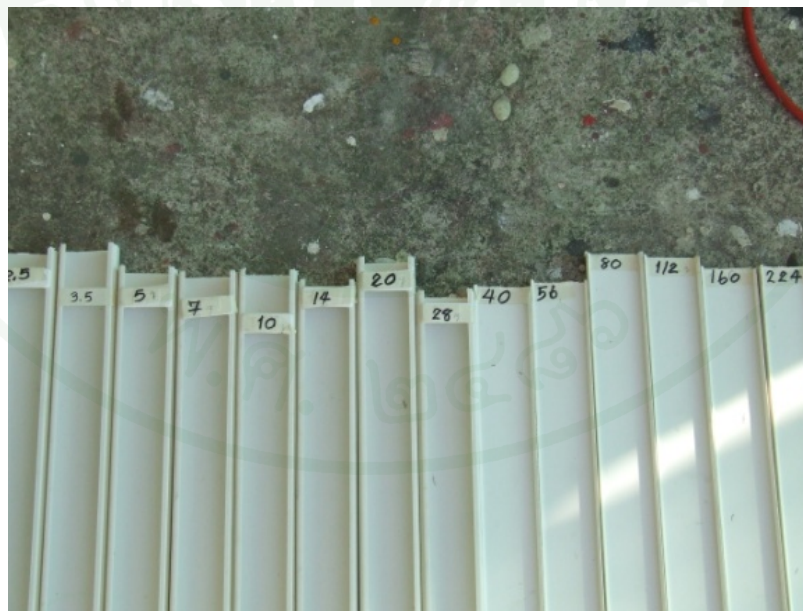
ภาพที่ 37 วัดค่าความนำไฟฟ้า



ภาพที่ 38 รางพ่นสารละลาย



ภาพที่ 39 รากฟันสารละลาย



ภาพที่ 40 รากฟันสารละลาย



ภาพที่ 41 รางพ่นสารละลาย



ภาพที่ 42 หัวฉีดสารละลาย

การทดลองที่ 3 หาค่าพื้นที่ที่มีผลต่อการเกิดวาบไฟ

1. หาค่าพื้นที่ที่ถูกฉนวนบริเวณที่มีการสัมผัสกับสายไฟฟ้าแรงสูง



ภาพที่ 43 รางพลาสติก

หาค่าพื้นที่ที่รองรับการจ่ายไฟ

ขนาดราง	ค่ากระแสรั่ว/mA	ค่าESDD
เล็ก	15.1	6.38
กลาง	15.1	4.28
ใหญ่	15.2	2.96

ภาพที่ 44 ค่า ESDD แต่ละขนาด

2. นำค่า ESDD ที่ยอมรับได้ มาคำนวณหาอายุการใช้งานของลูกถ้วย

วิธีคำนวณ

หาพื้นที่ลูกถ้วยที่จ่ายไฟ = พื้นที่ 104.3 ตร.ซม.

(ส่วนพื้นที่ใช้รางวัดขนาด 100 cm², 16 cm² และ 4 cm² ตามลำดับ)

เพราะฉะนั้นเราใช้รางขนาด 16 cm² = พื้นที่ของรางที่รับจ่ายไฟส่วนปลาย
 พื้นส่วนหัวของลูกถ้วยที่รองสายอยู่

$$= 104.3/16$$

$$= 6.5 \text{ เท่า}$$

ดังนั้นนำค่า 6.5 มาหารค่า ESDD ที่ได้

$$= 4.28/6.5$$

$$= 0.65 \text{ mg/cm}^2$$

ค่าที่ใช้งานจริงคือ ESDD

$$= 0.65 \text{ mg/cm}^2$$

นำค่าดังกล่าวมาดูในกราฟที่ได้ แบบมีไฟ

$$y = 0.0005x^{0.176x}$$

แทนค่าในสมการ y อายุการใช้งานของลูกถ้วยประมาณ

$$= 15 \text{ เดือน}$$

ผลและวิจารณ์

ผล

1. ผลการวัดค่า ESDD ที่เกิดจากการจำลองด้วยอุปกรณ์ทดลองและศึกษาการสะสมของสิ่งเปื้อน

ผลการวิเคราะห์และคำนวณค่า ESDD โดยละเอียดจากการทดสอบกับอุปกรณ์ทดลองและศึกษา สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 7 แสดงค่า ESDD ที่ได้จากการจำลองด้วยอุปกรณ์ทดลอง และศึกษาการสะสมของสิ่งเปื้อนในการติดตั้ง

อุณหภูมิ น้ำกลั่น	ค่าความนำของ น้ำกลั่น	ปริมาณเกลือ (g)	อุณหภูมิ น้ำที่ผสม	ค่าความนำ น้ำที่ผสม	ค่า ESDD
25.7	3.24 μ s	2.5	31.6	5.72	0.11
25.7	3.24 μ s	3.5	31.5	9.09	0.19
25.7	3.24 μ s	5	30.7	10.34	0.22
25.7	3.24 μ s	7	31.3	15.48	0.33
25.7	3.24 μ s	10	31.9	18.59	0.39
25.7	3.24 μ s	14	31.1	27.9	0.61
25.7	3.24 μ s	20	31	34.2	0.75
25.7	3.24 μ s	28	31	48.4	1.08
25.7	3.24 μ s	40	30.8	59.2	1.34
25.7	3.24 μ s	56	31.4	80.3	1.81
25.7	3.24 μ s	80	32.8	100.6	2.22
25.7	3.24 μ s	112	30.9	128	2.96
25.7	3.24 μ s	160	30.8	155.7	3.62
25.7	3.24 μ s	224	30.8	183	4.28

2. ผลการวัดค่า ESDD กับการติดตั้งรายปีแบบมีไฟ และแบบไม่มีไฟ

การพิจารณาค่า ESDD ของลูกถ้วย จะแบ่งออกเป็นการวัดอุณหภูมิก่อนล้าง อุณหภูมิหลังล้าง ค่าความนำก่อนล้าง ค่าความนำหลังล้าง และค่า ESDD ซึ่งมีทั้งแบบมีไฟ และแบบไม่มีไฟ ดังรายละเอียดต่อไปนี้



ตารางที่ 8 แสดงค่า ESDD กับการจัดตั้งรายปีแบบมีไฟ และแบบไม่มีไฟ ในระยะเวลา 6 เดือน

แบบ	ลูก้า	อุณหภูมิ		ค่าความนำ ก่อนล้าง	ค่าความนำ หลังล้าง	ค่า ESDD
		ก่อนล้าง	หลังล้าง			
แบบไม่มีไฟ	1	30.5	29.8	2.8	51.3	0.007
	2	30.5	29.8	2.8	50.8	0.007
	3	30.5	29.4	2.8	52	0.007
	4	30.5	28.5	2.8	60.3	0.007
	5	30.5	29.5	2.8	45.2	0.006
					เฉลี่ยรวม	0.007
แบบมีไฟ	1	30.5	28.1	2.8	168	0.03
	2	30.5	29.5	2.8	152	0.022
	3	30.5	28.7	2.8	164	0.024
					เฉลี่ยรวม	0.025

ตารางที่ 9 แสดงค่า ESDD จากการวัดครั้งรายปีแบบมีไฟ และแบบไม่มีไฟ ในระยะเวลา 9 เดือน

แบบ	ลูกที่	อุณหภูมิ		ค่าความนำ ก่อนล้าง	ค่าความนำ หลังล้าง	ค่า ESDD
		ก่อนล้าง	หลังล้าง			
แบบไม่มีไฟ	1	30	28.5	2.93	76.3	0.0111
	2	30	29.8	2.93	82	0.0117
	3	30	29.4	2.93	11.4	0.0163
	4	30	29.5	2.93	83.4	0.0163
	5	30	29.3	2.93	93.3	0.01364
					เฉลี่ยรวม	0.0129
แบบมีไฟ	1	30	29.4	2.93	270	0.0413
	2	30	29	2.93	282	0.0436
	3	30	28.8	2.93	268	0.0415
					เฉลี่ยรวม	0.0421

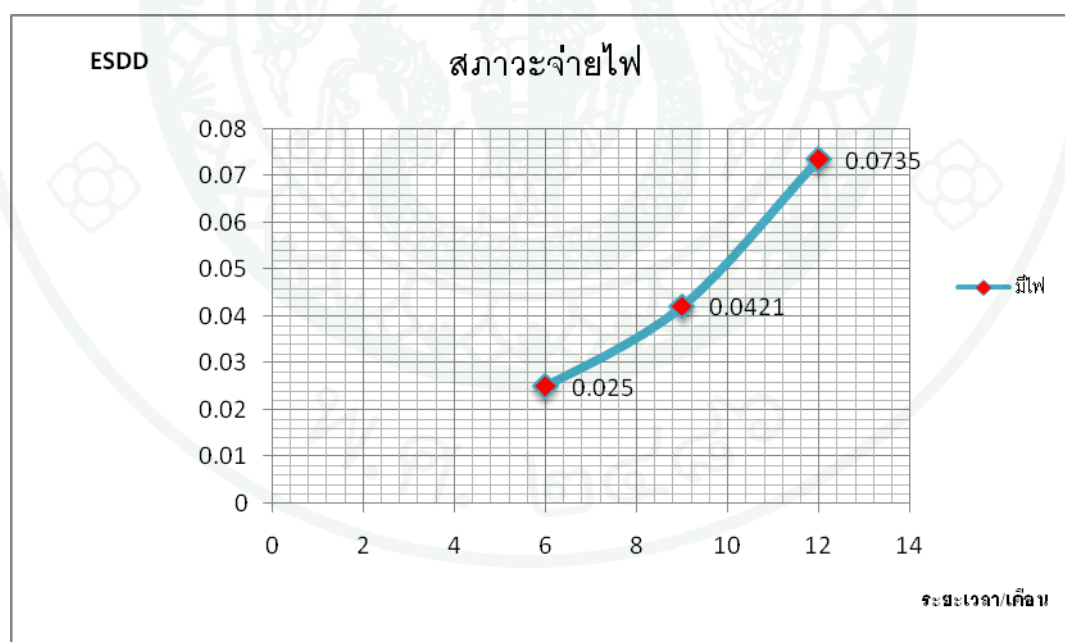
ตารางที่ 10 แสดงค่า ESDD จากการติดตั้งรายปีแบบมีไฟและแบบไม่มีไฟ ในระยะเวลา 12 เดือน

แบบ	ลูกที่	อุณหภูมิ		ค่าความน้ำ ก่อนล้าง	ค่าความน้ำ หลังล้าง	ค่า ESDD
		ก่อนล้าง	หลังล้าง			
แบบไม่มีไฟ	1	30.3	28.8	2.68	120	0.018
	2	30.3	29	2.68	111	0.016
	3	30.3	29.2	2.68	132	0.019
	4	30.3	28.5	2.68	136	0.02
	5	30.3	29.5	2.68	118	0.017
					เฉลี่ยรวม	0.018
แบบมีไฟ	1	30.3	29.3	2.68	468	0.0733
	2	30.3	28.7	2.68	419	0.0662
	3	30.3	29.4	2.68	516	0.081
					เฉลี่ยรวม	0.0735

ตารางที่ 11 แสดงผลการเปรียบเทียบค่า ESDD ทั้งแบบมีไฟและไม่มีไฟ

ระยะเวลา (เดือน)	ไม่มีไฟ	มีไฟ
3	-	-
6	0.007	0.025
9	0.013	0.0421
12	0.018	0.0735
18	-	0.2006
24	-	0.572
30	-	1.71189
36	-	5.031

ซึ่งสามารถแสดงกราฟผลการเปรียบเทียบค่า ESDD ทั้งแบบมีไฟและไม่มีไฟ ได้ดังนี้



ภาพที่ 45 ผลการเปรียบเทียบค่า ESDD ของฟิวลนนวนลูกถ้วยในขณะที่จ่าย load

วิจารณ์

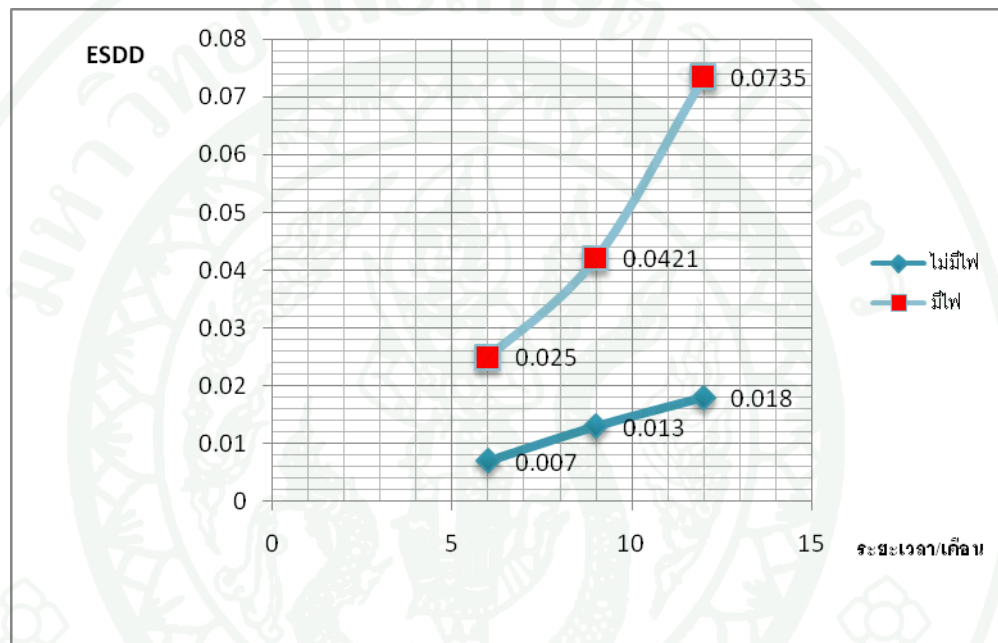
ทำการศึกษา เรื่อง การศึกษาการแก้ปัญหาลูกถ้วยและลูกถ้วยแยกสายที่เปราะเปื้อนในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ผู้ศึกษาสามารถวิจารณ์ผลการวิจัย ได้ดังต่อไปนี้

การพิจารณาค่า ESDD ของลูกถ้วย จะแบ่งออกเป็นการวัดอุณหภูมิก่อนล้าง อุณหภูมิหลังล้าง ค่าความนำก่อนล้าง ค่าความนำหลังล้าง และค่า ESDD ซึ่งมีทั้งแบบมีไฟ และแบบไม่มีไฟ สามารถสรุปผลการวิจัย ได้ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. ค่า ESDD กับการติดตั้งรายปีแบบมีไฟ และแบบไม่มีไฟ ในระยะเวลา 6 เดือน พบว่าแบบไม่มีไฟ มีค่าอุณหภูมิก่อนล้างเท่ากับ 30.5 อุณหภูมิหลังล้างเท่ากับ 29.8, 29.5, 29.4, 28.5 และ 29.5 ตามลำดับ ส่วนค่าความนำก่อนล้างมีค่าเท่ากับ 2.8 ส่วนค่าความนำหลังล้างเท่ากับ 51.3, 50.8, 52, 60.3 และ 45.2 ส่วนค่า ESDD มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.007 แบบมีไฟ พบว่า มีค่าอุณหภูมิก่อนล้างเท่ากับ 30.5 อุณหภูมิหลังล้างเท่ากับ 28.1, 29.5 และ 28.7 ตามลำดับ ส่วนค่าความนำก่อนล้างมีค่าเท่ากับ 2.8 ส่วนค่าความนำหลังล้างเท่ากับ 168, 152, 164 ส่วนค่า ESDD มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.025
2. ค่า ESDD กับการติดตั้งรายปีแบบมีไฟ และแบบไม่มีไฟ ในระยะเวลา 9 เดือน พบว่าแบบไม่มีไฟ มีค่าอุณหภูมิก่อนล้างเท่ากับ 30 อุณหภูมิหลังล้างเท่ากับ 28.5, 29.8, 29.4, 29.5 และ 29.3 ตามลำดับ ส่วนค่าความนำก่อนล้างมีค่าเท่ากับ 2.93 ส่วนค่าความนำหลังล้างเท่ากับ 76.3, 82, 11.4, 83.4 และ 93.3 ส่วนค่า ESDD มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0129 แบบมีไฟ พบว่า มีค่าอุณหภูมิก่อนล้างเท่ากับ 30 อุณหภูมิหลังล้างเท่ากับ 29.4, 29 และ 28.8 ตามลำดับ ส่วนค่าความนำก่อนล้างมีค่าเท่ากับ 2.93 ส่วนค่าความนำหลังล้างเท่ากับ 270, 282 และ 268 ส่วนค่า ESDD มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0421
3. ค่า ESDD กับการติดตั้งรายปีแบบมีไฟ และแบบไม่มีไฟ ในระยะเวลา 12 เดือน พบว่าแบบไม่มีไฟ มีค่าอุณหภูมิก่อนล้างเท่ากับ 30.3 อุณหภูมิหลังล้างเท่ากับ 28.8, 29, 29.2, 28.5 และ 29.5 ตามลำดับ ส่วนค่าความนำก่อนล้างมีค่าเท่ากับ 2.68 ส่วนค่าความนำหลังล้างเท่ากับ 120, 111, 132, 136 และ 118 ส่วนค่า ESDD มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.018 แบบมีไฟ พบว่า มีค่าอุณหภูมิก่อนล้างเท่ากับ 30.3 อุณหภูมิหลังล้างเท่ากับ 29.3, 28.7 และ 29.4 ตามลำดับ ส่วนค่าความนำก่อนล้างมีค่าเท่ากับ 2.68 ส่วนค่าความนำหลังล้างเท่ากับ 468, 419 และ 516 ส่วนค่า ESDD มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0735

4. สมการที่ได้จากกราฟ $y = 0.0008x^{0.176}$ ดังนั้นในการทดลองหาค่าที่ Flashover คือ 4.28 ถ้าคำนวณออกมาก็คือ ติดตั้งลูกถ้วยไว้ในนิคมประมาณ 36 เดือน ถ้าไม่มีการบำรุงรักษาลูกถ้วยก็จะแฟรช

5. จากการทดสอบนี้พบว่าลูกถ้วยที่ติดตั้งแบบมีไฟกับไม่มีไฟมีค่าESDDที่ต่างกันสมการที่ได้ก็แตกต่างกัน



ภาพที่ 46 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบค่า ESDD

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยเรื่อง การศึกษาค่าความเปรอะเปื้อนของลูกถ้วยที่ก่อให้เกิดความไวตามผิวของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าในระบบจำหน่ายแบบสายเปลือย ผู้ศึกษาสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

ผลการทดลองที่ 1

พบว่าลูกถ้วยที่ติดตั้งแบบมีไฟจะมีค่าความเปรอะเปื้อนมากกว่าลูกถ้วยที่ติดตั้งแบบไม่มีไฟ มีค่ามากกว่าประมาณ 3 เท่า ในระบบจำหน่าย 22 กิโลโวลต์ (kV) ผลที่คาดได้ว่าอาจเกิดขึ้นในระบบจำหน่าย 69 และ 115 กิโลโวลต์ (kV) สามารถคาดได้ว่าลูกถ้วยที่ติดตั้งแบบมีไฟจะมีค่าความเปรอะเปื้อนมากกว่าลูกถ้วยที่ติดตั้งแบบไม่มีไฟ มีค่ามากกว่าประมาณ 9.4 และ 15.6 เท่า



ภาพที่ 47 น้ำที่มีค่าความเปรอะเปื้อนต่าง ๆ กัน

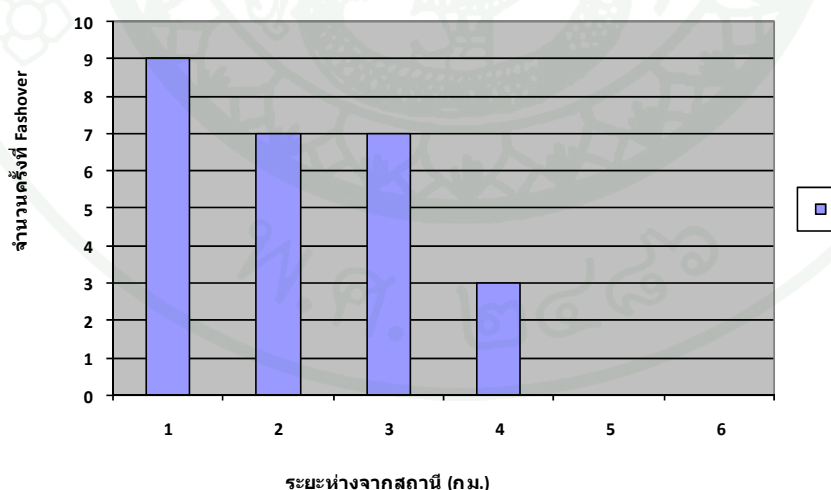
ผลการทดลองที่ 2

เมื่อนำน้ำที่มีสิ่งเปื้อนมาผสมกับเกลือแล้วพ่นใส่ในรางขนาดกว้าง 4 cm ยาว 84 cm เพื่อวัดค่า ESDD ในการเกิดวาบไฟ พบว่าผลที่ได้ออกมาเป็นค่า ESDD เฉลี่ย เท่ากับ 4.28 mg/cm^2

ในการทดลองพบว่าค่าที่เกิควาบไฟคำนวณออกมาจากกราฟคือ $y = 0.0086 + 0.176x$ คือ ควรมีการบำรุงรักษาภายในระยะเวลา 36 เดือน หลังการติดตั้งลูกถ้วย หากไม่มีการบำรุงรักษา ลูกถ้วยจะเกิดวาบไฟ

ผลการทดลองที่ 3

พบว่าพื้นที่มีผลต่อการเกิดวาบไฟ เมื่อทดลองในรางขนาดต่างกัน ค่าที่ได้ออกมาแตกต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพื้นที่ส่วนหัวของลูกถ้วยที่รองสายอยู่กับพื้นที่ของรางที่รับการจ่ายไฟ ส่วนปลาย พบว่าค่าที่ใช้งานจริงคือ ESDD เท่ากับ 0.65 mg/cm^2 และควรบำรุงรักษาหลังติดตั้งภายใน 12-18 เดือน



ภาพที่ 48 กราฟแสดงผลสถิติการเกิด Flashover

ข้อเสนอแนะ

การทำความสะอาดตู้ด้วยฉนวนหรือมีการเปลี่ยนตู้ด้วยก่อนเกิดการเสื่อมสภาพ สามารถลดค่าใช้จ่ายด้านกระแสไฟฟ้าที่สูญเสียไปในแต่ละเดือนได้อีกทางหนึ่ง เป็นการใช้พลังงานที่มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งในการที่จะแก้ไขปัญหาเกี่ยวกับระบบจำหน่ายให้กับ กฟภ. ได้เป็นอย่างดี



เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กองฝึกอบรม. 2544. มาตรฐานการก่อสร้างระบบจำหน่าย 22 และ 33 กิโลโวลต์.
การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, กรุงเทพฯ.

สำรวจ สังข์สะอาด. 2541. เทคโนโลยีการฉนวนในระบบการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงสูง.
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

นิรนาม. 2536. การจับเกาะของสิ่งประอะเปื้อนบนลูกถ้วยในเขต 3. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่ง
ประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

บุญเรือง มะรังศรี. 2541. ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนประอะเปื้อน. วิทยานิพนธ์
ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

นรเศรษฐ พัฒนเดช. 2545. ลักษณะสมบัติของลูกถ้วยคอตันยาวปีกกลับในระบบจำหน่าย.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ประจักษ์ พูลสวัสดิ์, นาวาตรี. 2545. การศึกษาการแก้ปัญหาลูกถ้วยที่ประอะเปื้อนในระบบ
จำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

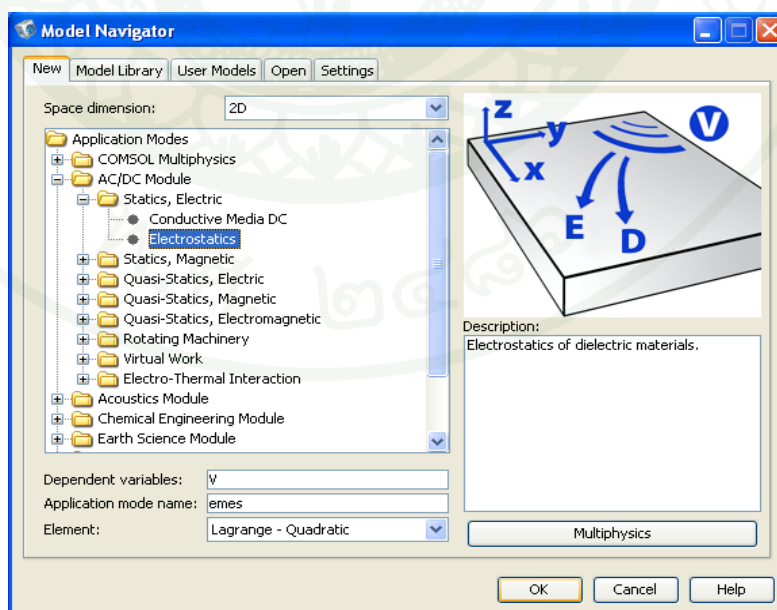


ขั้นตอนในการใช้โปรแกรม COMSOL เพื่อหาการกระจายตัวของศักย์และสนามไฟฟ้า
คลิกไอคอนของโปรแกรม COMSOL MULTIPHYSICS เพื่อเปิดโปรแกรม



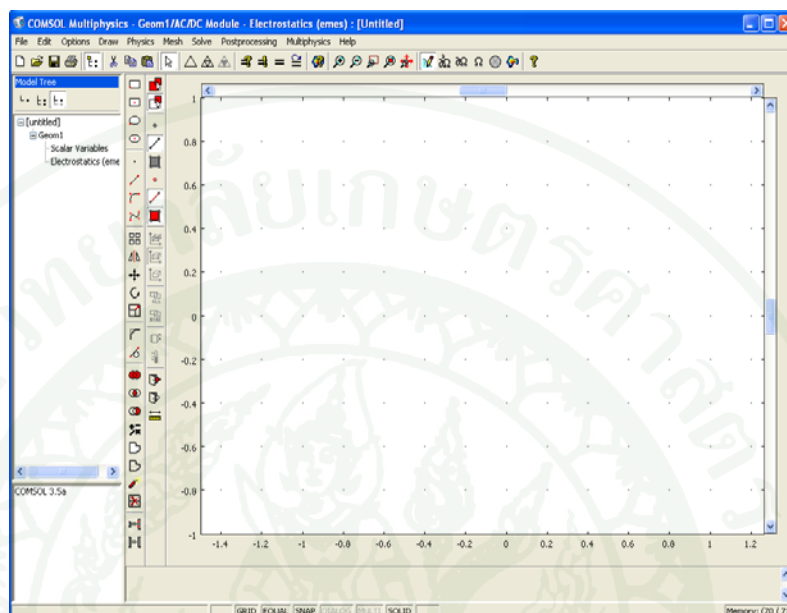
ภาพผนวกที่ 1 ไอคอนโปรแกรม COMSOL MULTIPHYSICS

เมื่อเปิดโปรแกรม COMSOL MULTIPHYSICS ขึ้นมาแล้ว ที่หน้าจอจะปรากฏ
หน้าต่าง Model Navigator ที่หน้าต่างนี้ เราสามารถเลือกชนิดของ Module ที่เราต้องการใช้
งาน โดยงานทางด้านไฟฟ้า นั้น เราจะเลือก Module ชนิด AC/DC Module โดยเลือก โหมด
Statics, Electric เพื่อใช้ในการดูศักย์และสนามไฟฟ้า หลังจากนั้นเลือกชนิด Electrostatics
แล้วคลิกที่ปุ่ม OK



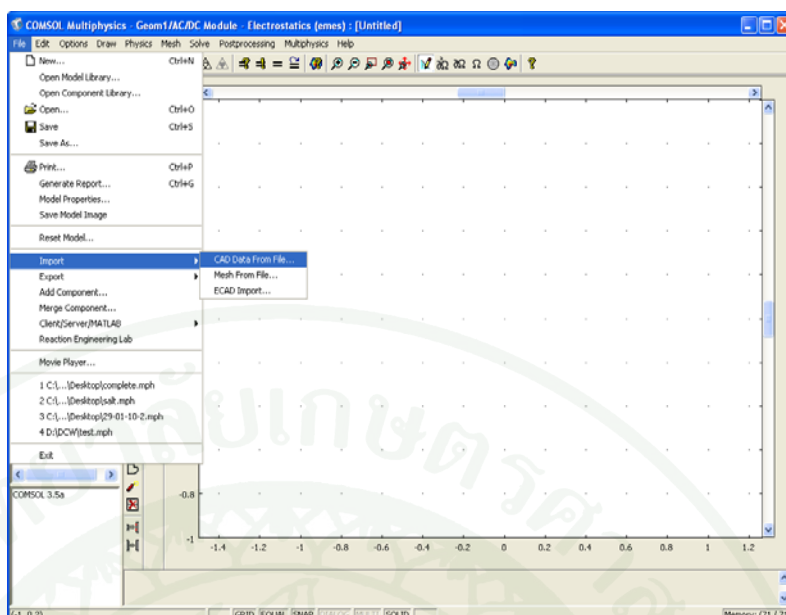
ภาพผนวกที่ 2 หน้าต่าง Model Navigator

เมื่อเลือกชนิดของ Module เรียบร้อยแล้ว จะโปรแกรมหน้าต่างดังรูป ที่หน้าต่างนี้เราสามารถสร้างชิ้นงานได้จาก โหมดคำสั่ง Draw โดยใช้แท็บเครื่องมือทางด้านซ้ายในการสร้างชิ้นงาน



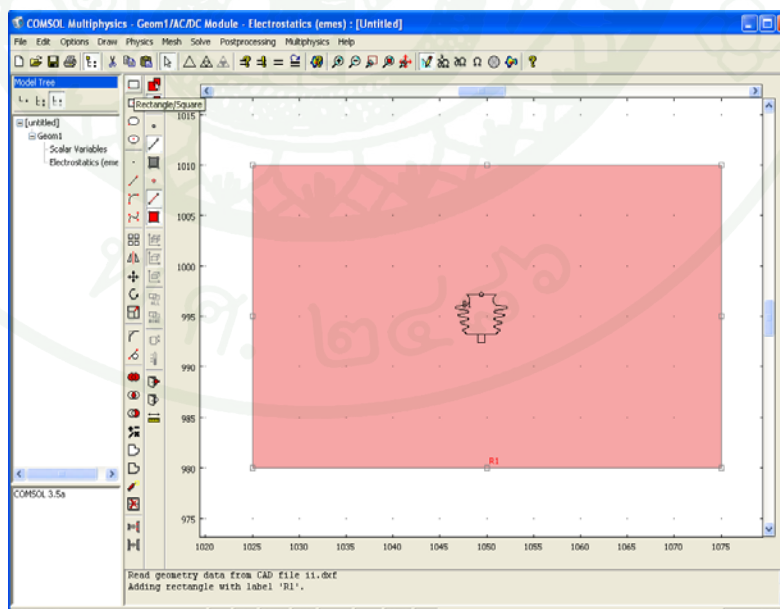
ภาพผนวกที่ 3 การสร้างชิ้นงานโดยใช้โหมดคำสั่ง Draw

นอกเหนือจากการสร้างชิ้นงานโดยใช้ โหมดคำสั่ง Draw แล้ว เรายังสามารถ Import ชิ้นงาน ไฟล์ CAD ต่างๆได้ด้วย โดยการเลือกคำสั่ง File ที่แท็บคำสั่งด้านบน หลังจากนั้นเลือกคำสั่ง Import และเลือกชนิด ของไฟล์ โดยเลือก CAD Data From File และทำการเลือกไฟล์ของชิ้นงานที่เราต้องการ



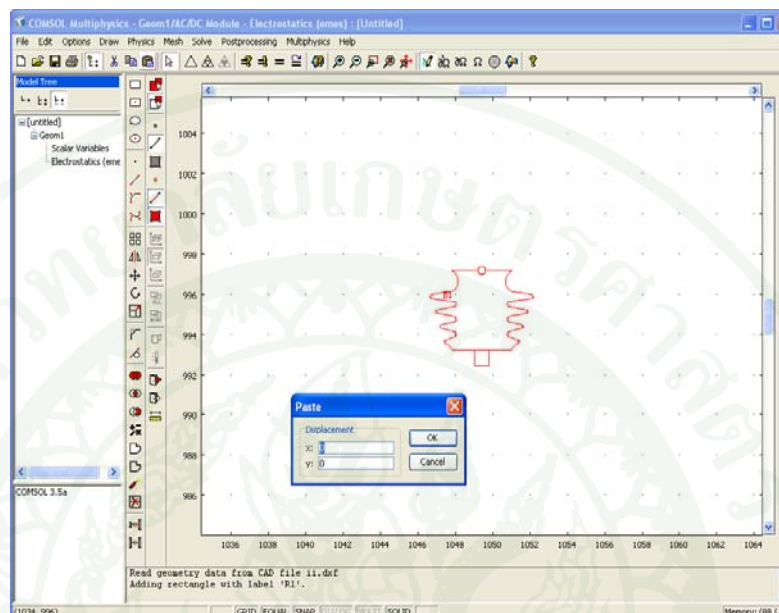
ภาพผนวกที่ 4 การ Import ชิ้นงาน

เราต้องสร้าง Boundary ให้กับชิ้นงานของเรา เพื่อแสดงถึงขอบเขตในการกระจายตัวของศักย์และสนามไฟฟ้า โดยเราจะสร้างขอบรูปสี่เหลี่ยมจากโหมดคำสั่ง Draw เราคลิกเลือกคำสั่ง Rectangle Square หลังจากนั้น คลิกพื้นที่ด้านนอกของชิ้นงานแล้วสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยมล้อมรอบชิ้นงานดังรูป



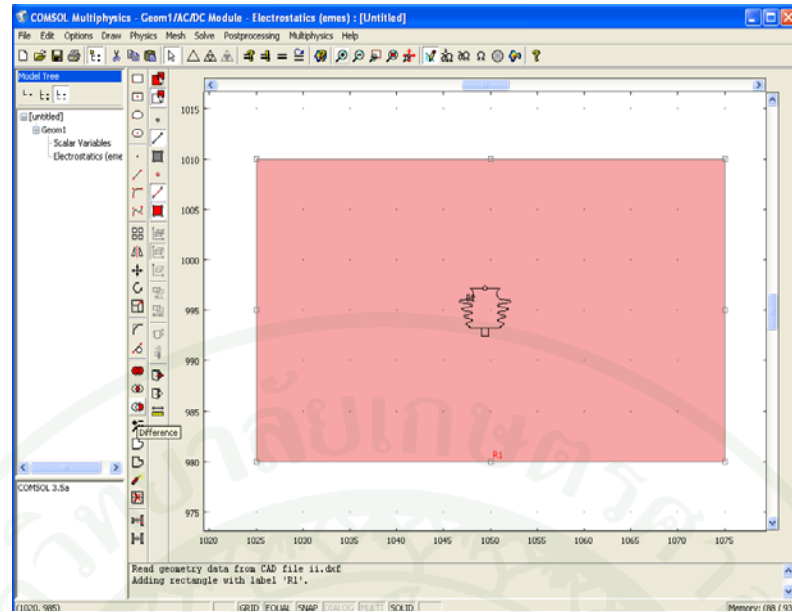
ภาพผนวกที่ 5 การสร้างขอบเขตให้กับชิ้นงาน

เมื่อสร้างขอบเขตให้กับชิ้นงานเรียบร้อยแล้ว ให้คลิกที่ตัวชิ้นงานและเลือกคำสั่ง Copy หลังจากนั้น เลือกคำสั่ง Paste จะปรากฏหน้าต่าง Paste ขึ้นที่หน้าจอ ที่ตำแหน่ง X และ Y ให้ใส่ค่า 0 หลังจากนั้นคลิกปุ่ม OK



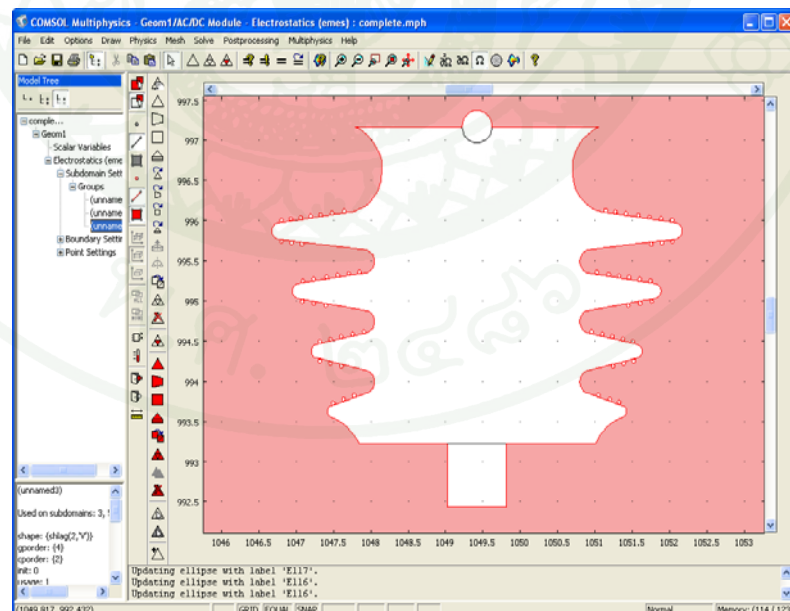
ภาพผนวกที่ 6 การใช้คำสั่ง Copy ชิ้นงาน

เมื่อทำการ Copy ชิ้นงานเรียบร้อยแล้ว ให้คลิกที่ตัวชิ้นงาน และพื้นที่ว่างภายในขอบเขตสี่เหลี่ยม หลังจากนั้นคลิก ที่คำสั่ง Difference เพื่อตัดพื้นที่ที่ทับชิ้นงานออกไป

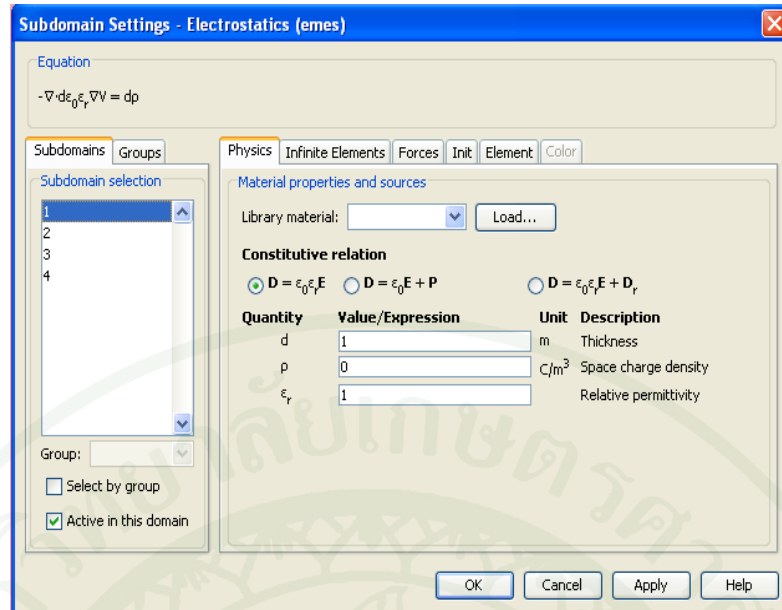


ภาพผนวกที่ 7 การใช้คำสั่ง Difference

กรณีต้องการสร้าง Polution บริเวณรอบลูกถ้วย ให้เลือกใช้คำสั่ง Circle ในโหมดคำสั่ง Draw เพื่อสร้างวงกลมรอบ ลูกถ้วย และต้องทำการ Copy และ Difference เช่นเดียวกับ 4ภาพที่ 6 และ 7



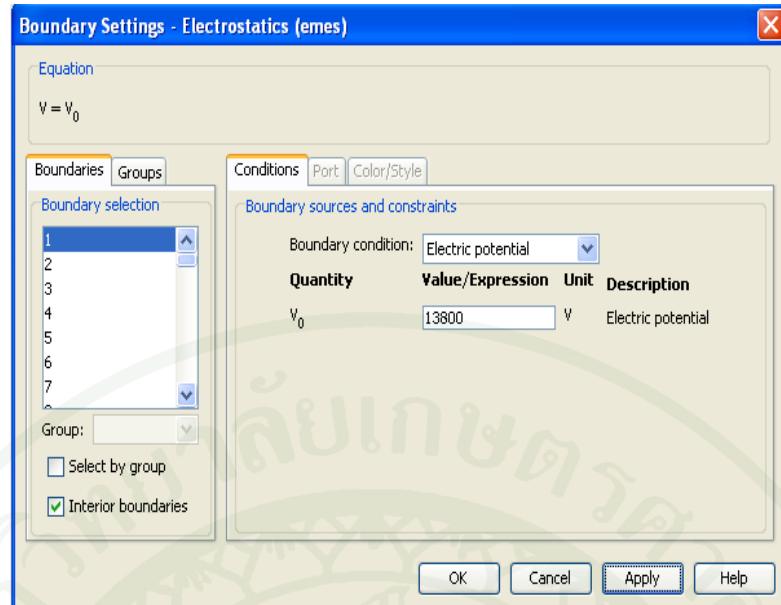
ภาพผนวกที่ 8 การสร้าง Polution บริเวณรอบลูกถ้วย



ภาพผนวกที่ 9 หน้าต่าง Subdomain Settings

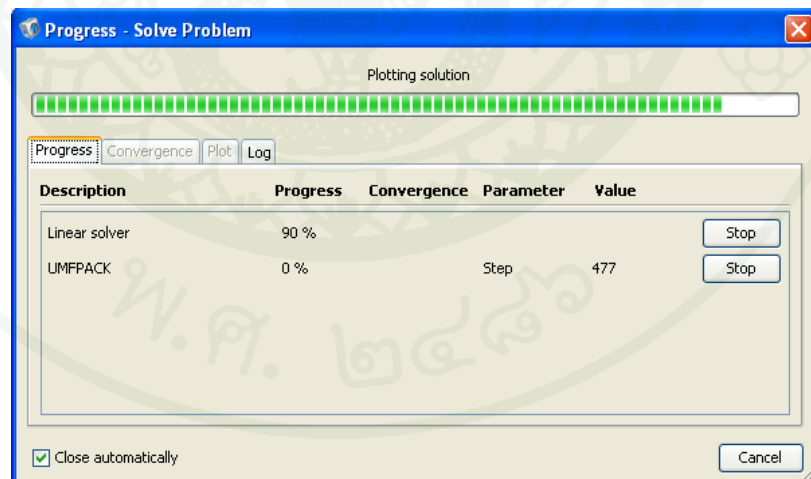
เลือกคำสั่ง Physics ที่แท็บคำสั่งด้านบน หลังจากนั้นเลือกคำสั่ง Subdomain Setting จะปรากฏหน้าต่าง Subdomain Settings ที่หน้าต่างนี้เราสามารถระบุ Subdomain ของชิ้นงานได้ โดยคลิกเลือกชิ้นส่วนของชิ้นงาน และป้อนค่า ϵ_r (Relative permittivity) ในส่วนนั้นๆ

เลือกคำสั่ง Physics ที่แท็บคำสั่งด้านบน หลังจากนั้นเลือกคำสั่ง Boundary Setting จะปรากฏหน้าต่าง Boundary Settings ที่หน้าต่างนี้เราสามารถระบุ Boundary ของขอบชิ้นงานได้ โดยคลิกเลือกชิ้นส่วนของชิ้นงาน และเลือกชนิดจากช่อง Boundary condition โดยที่ขอบเขตด้านนอกให้ตั้งค่า Boundary condition เป็น Ground ขอบของชิ้นงานให้ตั้งค่า Boundary condition เป็น Continuity ขอบสายไฟด้านบนให้ตั้งค่า Boundary condition เป็น Electric potential และ ระบุค่า Voltage ที่เราต้องการขอบกั้นลูกถ้วยด้านล่างให้ตั้งค่า Boundary condition เป็น Ground



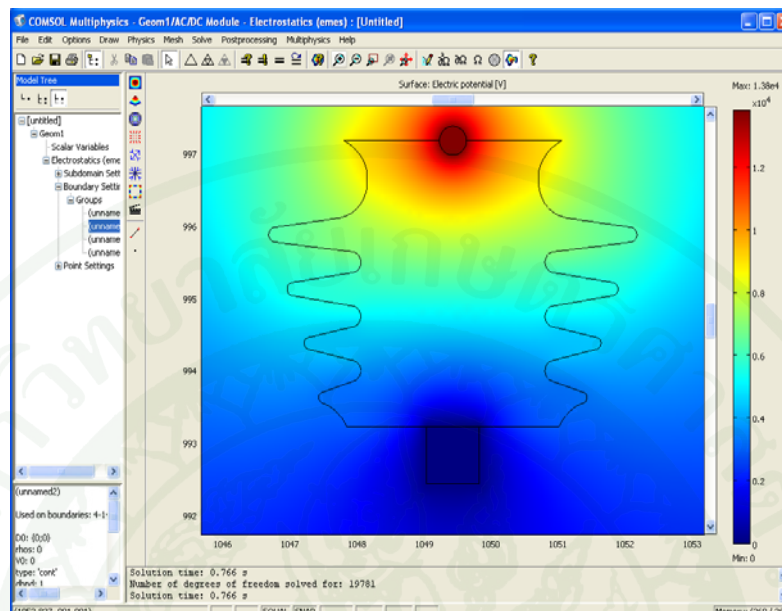
ภาพผนวกที่ 10 หน้าต่าง Boundary Settings

เมื่อทำการตั้งค่า Subdomain และ Boundary เรียบร้อยแล้ว ให้เลือกคำสั่ง Solve ที่แถบคำสั่งด้านบน จะปรากฏหน้าต่าง Progress – Solve Problem แสดงการทำงาน (Plotting solution)

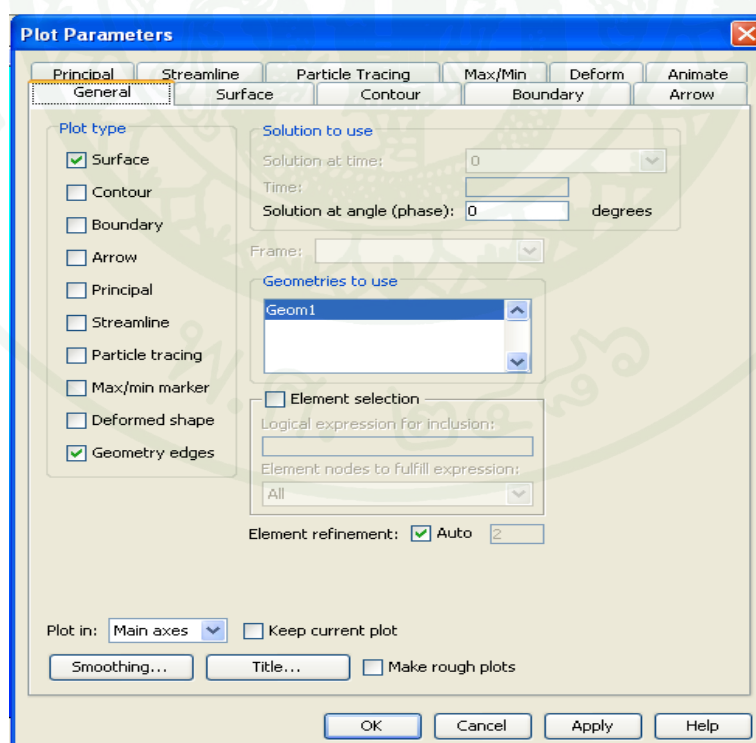


ภาพผนวกที่ 11 หน้าต่าง Progress – Solve Problem

เมื่อกระบวนการ Solve เสร็จสิ้นจะปรากฏผลการวิเคราะห์ที่หน้าต่างของโปรแกรม

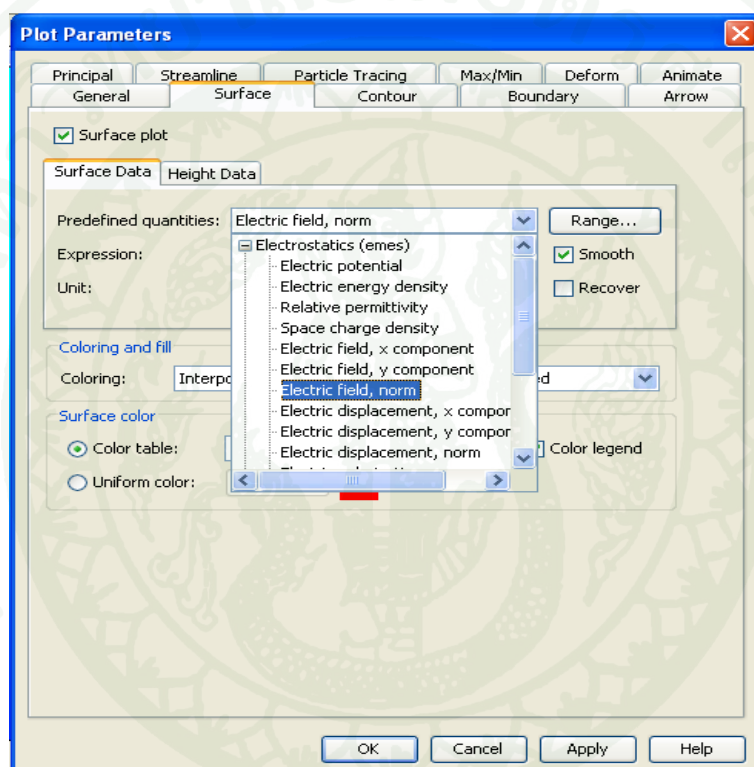


ภาพผนวกที่ 12 หน้าต่างการวิเคราะห์



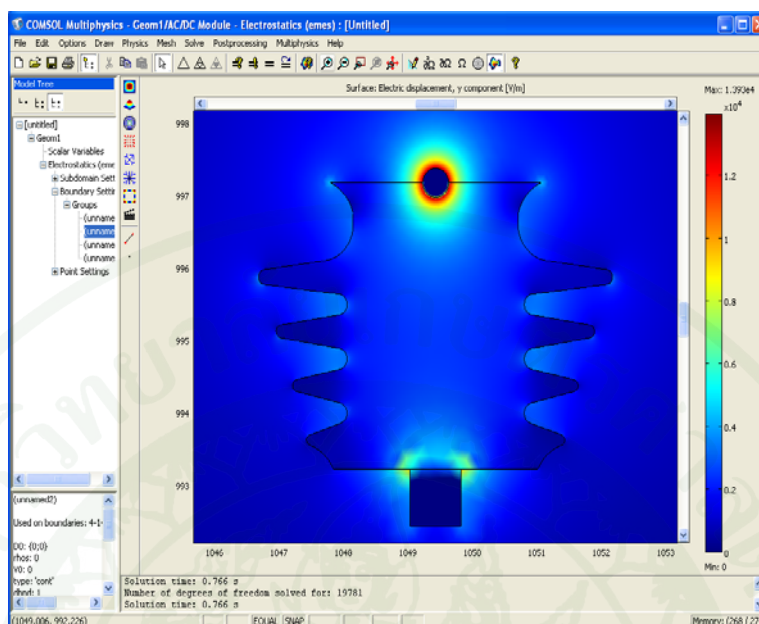
ภาพผนวกที่ 13 หน้าต่าง Plot Parameter การเลือกรูปแบบของผลการวิเคราะห์

เลือกคำสั่ง Postprocessing ที่แถบคำสั่งด้านบน หลังจากนั้นเลือกคำสั่ง Plot Parameter จะปรากฏหน้าต่าง Plot Parameters ที่หน้าต่างนี้เราสามารถเลือกรูปแบบของการแสดงผลของการวิเคราะห์ได้ นอกเหนือจากการเลือกรูปแบบของการวิเคราะห์ที่หน้าต่าง Plot Parameters ได้แล้ว เรายังสามารถเลือกชนิดของผลการวิเคราะห์ โดยคลิกที่ช่อง Predefined quantities และเลือกชนิดของการแสดงผล โดยแต่ละ Module นั้นจะแตกต่างกันไป ที่ปุ่ม Range เราสามารถเลือกขนาดของระดับการแสดงผลได้ โดยปกติจะตั้งไว้ที่ Auto แต่ถ้าเราไม่ต้องการ สามารถระบุจำนวนได้เอง



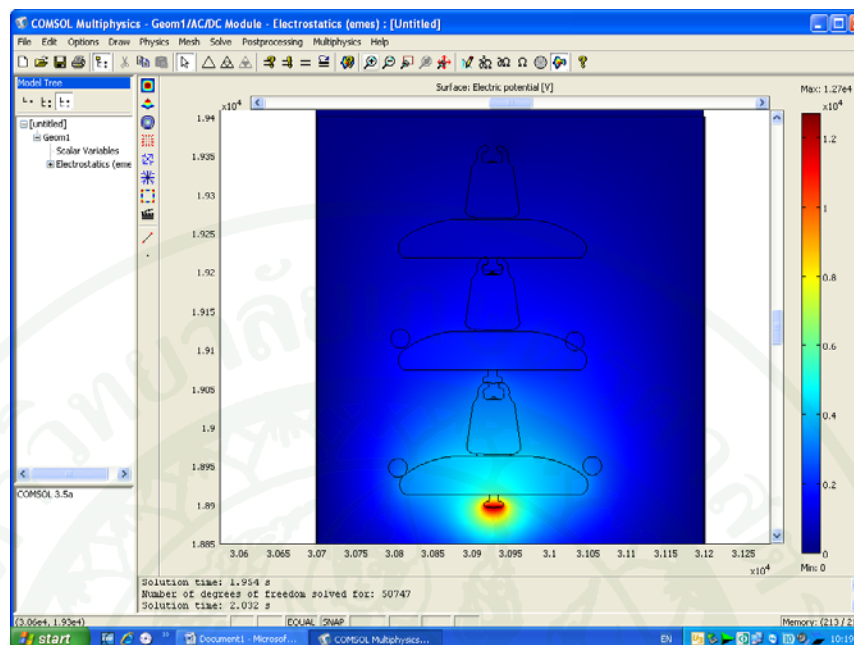
ภาพผนวกที่ 14 หน้าต่าง Plot Parameter การเลือกชนิดของผลการวิเคราะห์

ผลแสดงการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า ในรูปแบบของ Surface

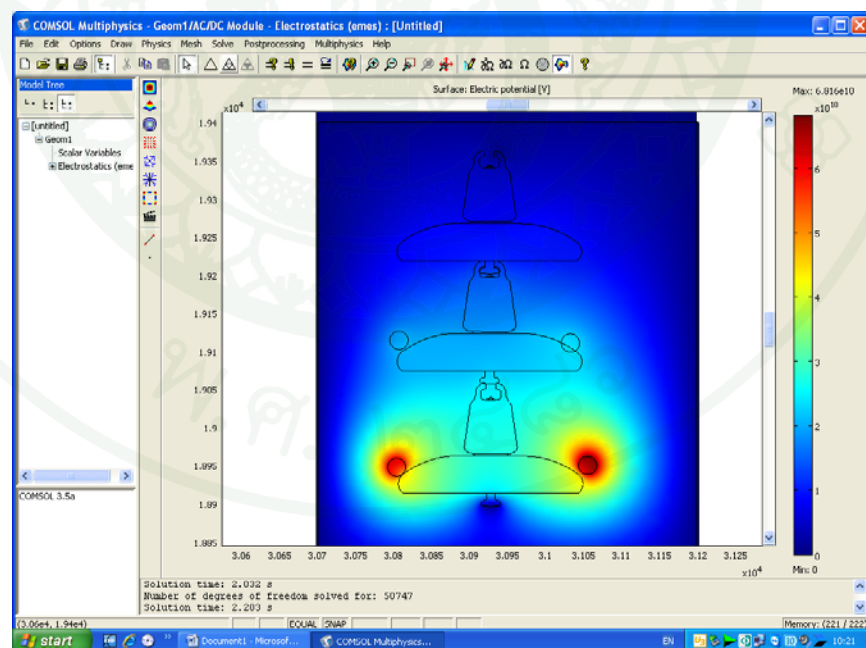


ภาพผนวกที่ 15 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้า

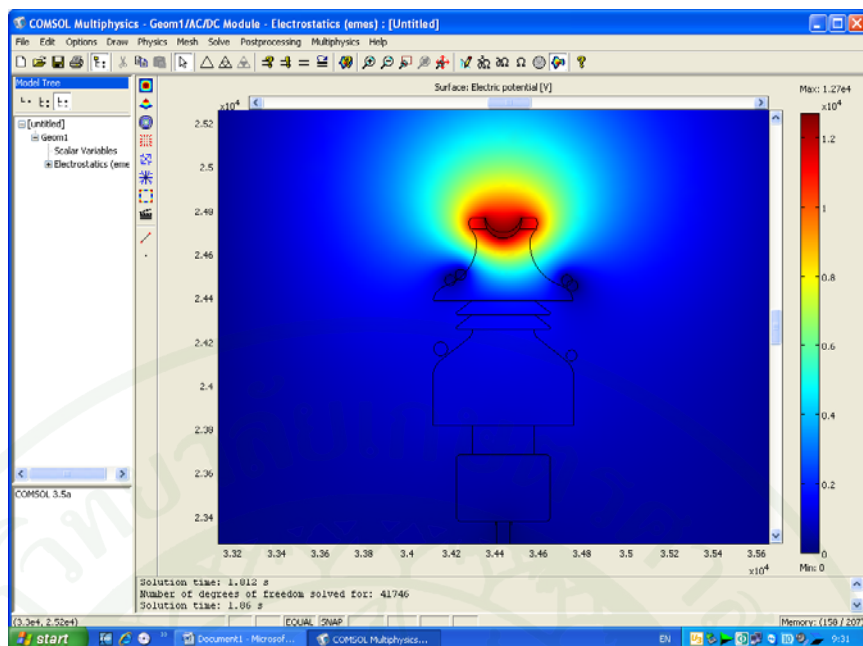
ผลการกระจายตัวสนามไฟฟ้า



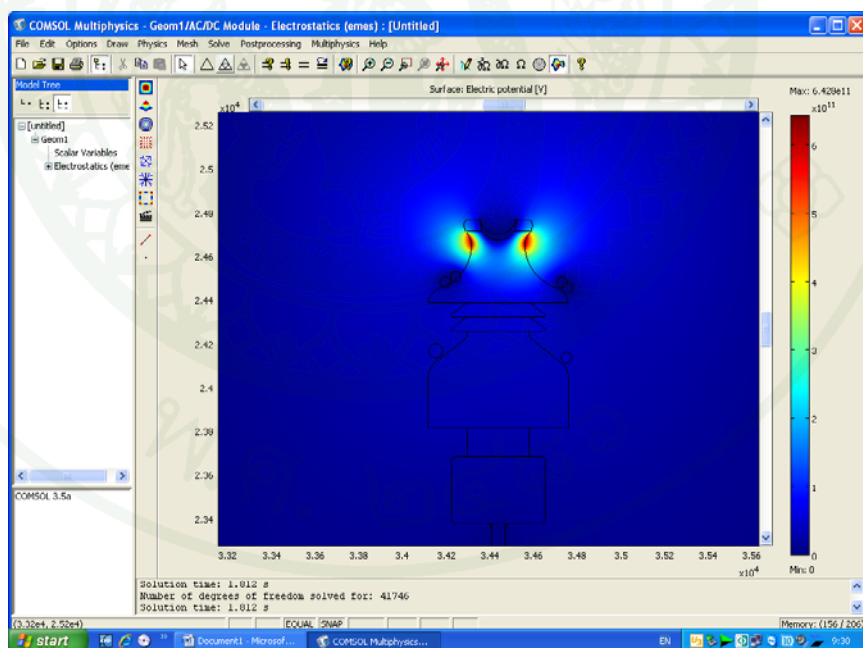
ภาพผนวกที่ 16 ผลการกระจายของสนามไฟฟ้าลองลูกถ้วยแขวนแบบไม่มีมลภาวะ



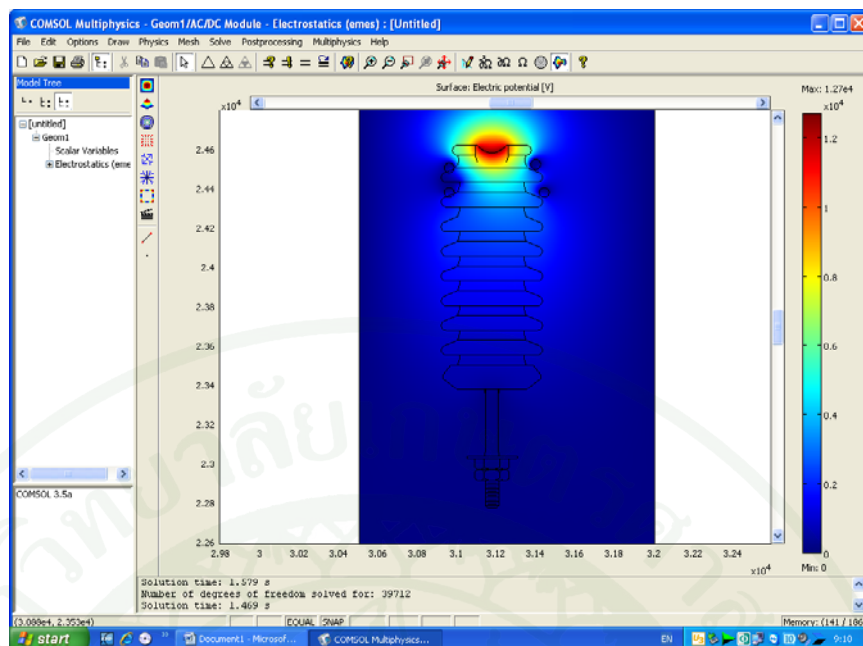
ภาพผนวกที่ 17 ผลการกระจายของสนามไฟฟ้าลองลูกถ้วยแขวนแบบมีมลภาวะ



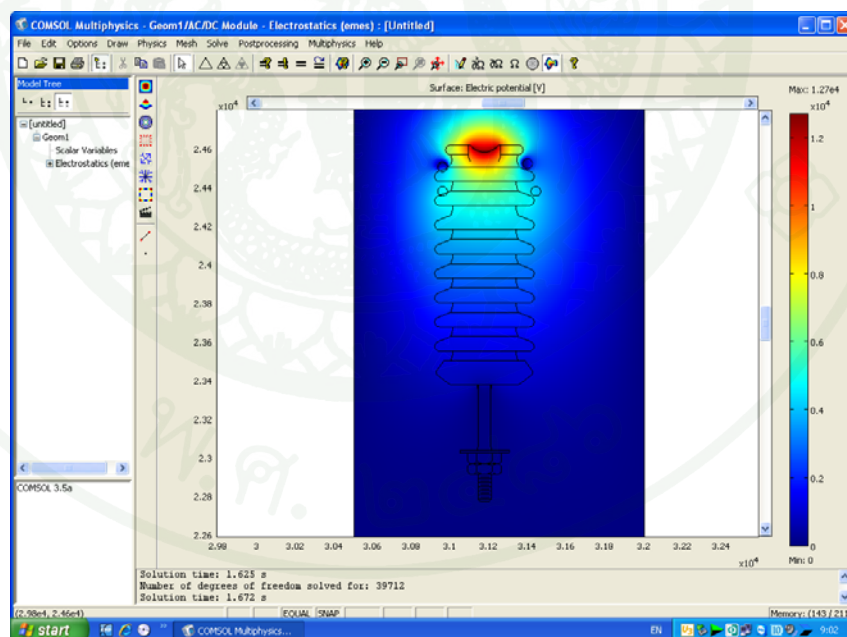
ภาพผนวกที่ 18 ผลการกระจายของสนามไฟฟ้าลงลูกถ้วย Pin Post Type แบบไม่มี
มลภาวะ



ภาพผนวกที่ 19 ผลการกระจายของสนามไฟฟ้าลงลูกถ้วย Pin Post Type แบบมีมลภาวะ



ภาพผนวกที่ 20 ผลการกระจายของสนามไฟฟ้าลองลูกถ้วย Line Post Type แบบไม่มีมลภาวะ



ภาพผนวกที่ 21 ผลการกระจายของสนามไฟฟ้าลองลูกถ้วย Line Post Type แบบมีมลภาวะ

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ - นามสกุล	นายอุดมศักดิ์ มาลัยวงศ์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 1 มีนาคม 2524
สถานที่เกิด	อ่างทอง
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	วิศวกร ระดับ 5
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-