



A COMPARISON OF ELECTRIC FIELD ON SURFACE OF SUSPENSION INSULATOR TYPE
52-2 WITH CONTAMINATED CONDITION BY USING FINITE ELEMENT METHOD

The Engineering Institute of Thailand under H.M. The King's Patronage

การเปรียบเทียบผลของสนามไฟฟ้าบริเวณผิวลูกถ้วยแขวนแบบ 52-2 เมื่ออยู่ในสภาวะปนเปื้อน
ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

A COMPARISON OF ELECTRIC FIELD ON SURFACE OF SUSPENSION INSULATOR TYPE
52-2 WITH CONTAMINATED CONDITION BY USING FINITE ELEMENT METHOD

อานนท์ อิศรมงคลรักษ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร 10530
โทร. 0-2988-5666 ต่อ 3304 E-mail: arnon@mut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของศักย์ไฟฟ้าซึ่งอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อย แบบจำลองดังกล่าวถูกนำมาใช้จำลองผลของศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าที่กระจายบริเวณผิวของลูกถ้วยของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า 22kV ที่มีการใช้งานในสภาวะปนเปื้อนทั้งหมด 3 รูปแบบคือ ปนเปื้อนหยดน้ำเกลือ ปนเปื้อนฝุ่นละออง และปนเปื้อนหยดน้ำฝน โดยอาศัยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นเครื่องมือสำหรับหาผลเฉลย บทความนี้พิจารณาชนิดลูกถ้วยแขวนแบบ 52-2 ที่มีการใช้งานในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 22 kV จากผลการจำลองจะเห็นว่า การกระจายสนามไฟฟ้าบริเวณผิวลูกถ้วยจะมีค่ามากที่สุดเมื่อ ลูกถ้วยมีการทำงานในสภาวะที่ปนเปื้อนฝุ่นละออง โดยจะมีค่าเฉลี่ยที่ผิวลูกถ้วย ในชั้นที่ 1 และ 2 เป็น 24.8697 V/mm และ 21.8777 V/mm ตามลำดับจะมีค่าเฉลี่ยการกระจายสนามไฟฟ้าน้อยที่สุดเมื่อมีการทำงานในสภาวะปนเปื้อนหยดน้ำเกลือในชั้นที่ 1 และ 2 เป็น 24.4258 V/mm และ 21.5122 V/mm ตามลำดับ

คำสำคัญ: สนามไฟฟ้า, ลูกถ้วยฉนวนแขวน, ไฟไนต์เอลิเมนต์

ABSTRACT

This paper proposes the mathematical model of potential and electric fields distributing around power transmission line in the form of complex partial differential equation. The proposed model was used to simulate the electric field distributing on surface of suspension insulator type 52-2 of 22 kV distribution systems with contaminated conditions using the finite element method. In this paper, the contaminated conditions; i.e., i.e. Raindrops Sea drops and dust contaminations was considered. The comparison results showed that the dust contaminated condition provided the most electric field density both of the first and the second sets is 24.8697 V/mm and 21.8777 V/mm respectively. And the sea drops contaminated condition provided the least electric field density both of the first and the second sets is 24.4258 V/mm and 21.5122 V/mm respectively.

KEYWORDS: Electric Field, Suspension Insulator, Finite Element Method

1. บทนำ

ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นระบบที่ส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ที่อยู่ปลายทาง โดยประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ คือ ส่วนผลิต ส่วนส่งกำลังและส่วนจำหน่าย เป็นต้น ซึ่งในแต่ละส่วนดังกล่าวจะประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ เช่น สายส่ง ลูกถ้วย หม้อแปลง เป็นต้น อุปกรณ์ที่มีความสำคัญอย่างยิ่งอีกชนิดหนึ่งในระบบส่งจ่ายไฟฟ้า คือ ลูกถ้วยฉนวนซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวนคั่นระหว่างตัวนำที่มีแรงดันต่างกันหรือคั่นระหว่างตัวนำกับดินในขณะเดียวกันก็ทำหน้าที่รับแรงทางกล ความร้อน และปฏิกิริยาเคมีอีกด้วย ดังนั้น การศึกษาคุณสมบัติของลูกถ้วยฉนวนในสภาวะต่างๆ จึงเป็นสิ่งสำคัญอีกอย่างหนึ่งในการเลือกใช้งานของลูกถ้วยฉนวนให้ถูกต้องและเหมาะสมกับพื้นที่นั้นๆ หากลูกถ้วยฉนวนที่ติดตั้งใช้งานอยู่ในสภาวะสิ่งแวดล้อมต่างๆ เช่น ในบริเวณที่มีหมอกควันมาก ๆ ความชื้นหรือสิ่งปนเปื้อนต่างๆ ก็จะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนลูกถ้วยในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าซึ่งอาจทำให้เกิดการวาดไฟตามผิว เนื่องจากความชื้นที่มากขึ้นของสนามไฟฟ้าตรงบริเวณรอยต่อระหว่างตัวนำกับฉนวนไฟฟ้าหรือในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงอื่นๆ ในอุปกรณ์เหล่านี้มีความเครียดของสนามไฟฟ้าสูงซึ่งเป็นจุดที่มีความเสี่ยง เพราะ การเกิดดิสชาร์จบางส่วนระหว่างรอยต่อของวัสดุสองชนิด อาจจะทำให้เกิดการวาดไฟตามผิวฉนวนไฟฟ้าได้ เนื่องด้วยสาเหตุดังกล่าว จึงต้องทำการวิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าบริเวณผิวของลูกถ้วยฉนวน เปรียบเทียบผลที่ได้ของสภาวะการปนเปื้อนที่แตกต่างกันนั้น และประเมินผลเพื่อใช้ศึกษาผลของค่าสนามไฟฟ้าที่มีผลกระทบต่อลูกถ้วยฉนวนในสภาวะปนเปื้อนต่างๆ การจำลองผลอาศัยระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) แบบ 2 มิติ ด้วยโปรแกรม MATLAB

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของศักย์ไฟฟ้า[1]

สมการเชิงอนุพันธ์ที่ใช้ในการหาค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้า สามารถประดิษฐ์ขึ้นได้โดยเริ่มจากกฎของเกาส์ (Gauss's Law) ดังสมการที่ (1)

$$\nabla \cdot D = \rho \tag{1}$$

จากสมการที่ (1) โดยที่ ρ แทนความหนาแน่นของประจุ (Volume charge density) และ D แทนความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า (Electric flux density) ดังสมการที่ (2)

$$D = \epsilon E \tag{2}$$

จากสมการที่ (2) โดยที่ ϵ แทนค่าเปอร์มิตติวิตี้ (Permittivity) และ E แทนค่าความเข้มของสนามไฟฟ้า (Electric field intensity) ซึ่งสัมพันธ์กับค่าศักย์ไฟฟ้า V ดังสมการที่ (3)

$$E = -\nabla V \tag{3}$$

โดยอาศัยสมการของแมกซ์เวลล์ ในตัวกลางที่เป็นเนื้อเดียวกันตลอดจะได้สมการเชิงอนุพันธ์ซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการปัวซอง (Poisson's equation)[3] ดังสมการที่ (4)

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon} \tag{4}$$

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon}$$

ในระบบพิกัด (x,y) (Cartesian coordinates) นั้นสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง (Second-order partial differential equation) ดังสมการที่ (5)

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = -\frac{\rho}{\epsilon} \tag{5}$$

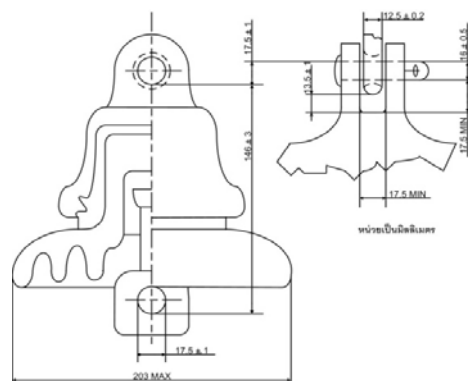
3. ลูกถ้วยฉนวนและลักษณะประเภทสิ่งปนเปื้อน

ลูกถ้วยฉนวนแบบแขวน (Suspension-type Insulators) เป็นลูกถ้วยฉนวนสำหรับไฟฟ้าแรงสูงซึ่งสามารถนำมาต่อเรียงกันเพื่อสามารถใช้กับขนาดแรงดันไฟฟ้าที่พิกัดแรงดันต่างๆ กันได้ ลูกถ้วยฉนวนแบบแขวนที่ใช้ในปัจจุบันแบ่งตามลักษณะการต่อได้ 2 แบบ คือ แบบสลัก (Clevis type) และแบบขั้วต่อ (Ball and socket type)[2] ถึงแม้จะมีวิธีการต่อที่แตกต่างกัน แต่ ลูกถ้วยฉนวนทั้ง 2 ชนิด จะนำไปใช้งานลักษณะเดียวกัน ซึ่งลักษณะการต่อทั้ง 2 แบบ ได้แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะของลูกถ้วยแบบแขวน

ในกรณีที่จะยึดสายไฟฟ้าแรงสูงมากขึ้น จำนวนของลูกถ้วยฉนวนในพวงก็จะมีมากขึ้น บทความนี้ได้พิจารณาลูกถ้วยแบบ 52-2 โดยรูปร่างและมิติของลูกถ้วยฉนวนแบบแขวนได้แสดงดังรูปที่ 2

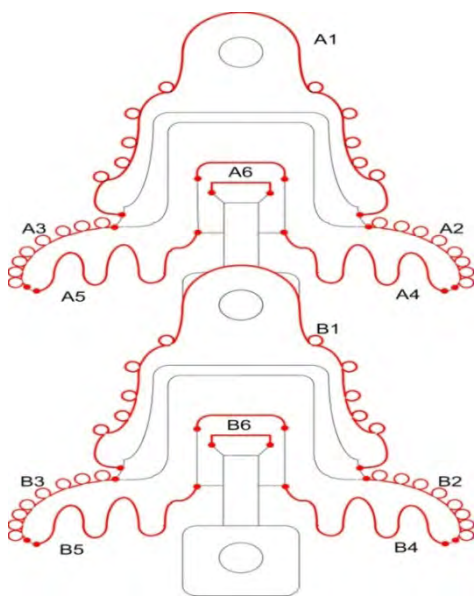


รูปที่ 2 รูปร่างและมิติของลูกถ้วยฉนวนแบบแขวนแบบ 52-2

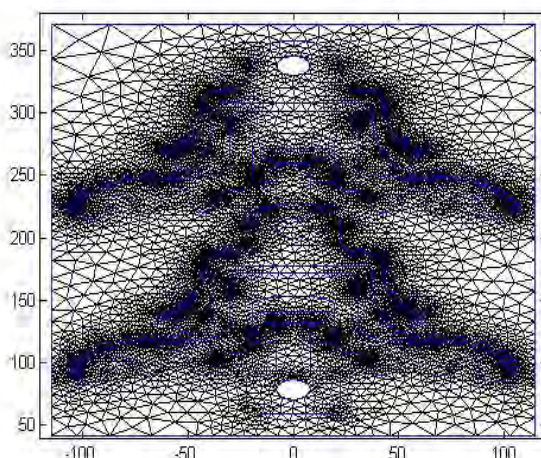
ประสิทธิภาพของลูกถ้วยฉนวนจะใช้งานได้ดีเมื่อไม่มีสิ่งอื่นใดเข้ามาปนเปื้อนที่บริเวณผิวของลูกถ้วยฉนวน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องมีการศึกษาถึงประเภทของสิ่งปนเปื้อนโดยที่ สิ่งปนเปื้อนที่ผิวลูกถ้วยฉนวนสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ สารละลายน้ำได้และนำไฟฟ้ากับสารที่ไม่ละลายน้ำและไม่นำไฟฟ้า ประเภทของสิ่งปนเปื้อนแบ่งตามสภาพแวดล้อมที่ลูกถ้วยฉนวนเหล่านั้นใช้งานอยู่ได้ดังนี้ สิ่งปนเปื้อนจากทะเล ได้แก่ จำพวกเกลือทะเล ซึ่งลูกถ้วยฉนวนที่ใช้งานในบริเวณริมชายฝั่งทะเลและบางที่อาจจะเข้ามาถึง 100 กิโลเมตรจากชายฝั่งทะเล ทะเลทรายเป็นบริเวณที่สิ่งปนเปื้อน สามารถที่จะสะสมบนผิวลูกถ้วยฉนวนได้เป็นจำนวนมาก เนื่องจากปริมาณของฝนที่ตกเพียงเล็กน้อย ทะเลทรายที่อยู่ห่างไกลออกไปจากชายฝั่งทะเล จะมีสิ่งปนเปื้อนที่คล้าย ๆ กับสิ่งปนเปื้อนประเภทฝุ่นแต่สำหรับทะเลทรายที่อยู่ใกล้ชายฝั่งทะเลนั้นนอกจากสิ่งปนเปื้อนประเภทฝุ่นแล้วยังจะมีเกลือทะเลผสมอยู่ด้วย

4. ระเบียบวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์

ระเบียบวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อใช้คำนวณหาผลเฉลยโดยประมาณของปัญหาที่อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ โดยการแบ่งรูปร่างขอบเขตของปัญหาออกเป็นอิลิเมนต์ แล้วสร้างสมการของแต่ละอิลิเมนต์ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ และอิลิเมนต์ต่าง ๆ จะเชื่อมต่อกันด้วยจุดต่อซึ่งเป็นตำแหน่งที่คำนวณหาค่าผลเฉลยแบบประมาณ [4] บทความนี้ได้วิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของลูกถ้วยฉนวนแบบ 52-2 ที่มีสิ่งปนเปื้อนบริเวณผิวของลูกถ้วยทั้ง 3 กรณี คือ ปนเปื้อนหยดน้ำ ปนเปื้อนหยดน้ำเกลือ และปนเปื้อนฝุ่นละออง โดยกำหนดตำแหน่งของสิ่งปนเปื้อนที่ผิวลูกถ้วยเพื่อใช้สำหรับการจำลองผลแสดงได้ดังรูปที่ 3 และสามารถแบ่งอิลิเมนต์ได้แสดงดังรูปที่ 4 การจำลองผลจะพิจารณาการกระจายศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าในสภาวะชั่วขณะเท่านั้น (Electrostatics Mode)



รูปที่ 3 ตำแหน่งของสิ่งปนเปื้อนที่บริเวณผิวของลูกถ้วยสำหรับการจำลองผล



รูปที่ 4 แบ่งรูปร่างของลูกถ้วยออกเป็นอิลิเมนต์

5. การกำหนดพารามิเตอร์

บทความนี้เป็นการจำลองผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์เป็นค่าคงที่ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งที่ใช้ในการจำลองผลนั้น ประกอบด้วย 2 ค่าพารามิเตอร์ คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของวัสดุแต่ละชนิด หรือ ϵ_r (Relative Permittivity) และค่าพื้นที่ความหนาแน่นของประจุ หรือ ρ (Space charge density) ซึ่งค่าพารามิเตอร์ ดังกล่าวนี้ได้แสดงตามตารางที่ 1 และตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของวัสดุแต่ละชนิด

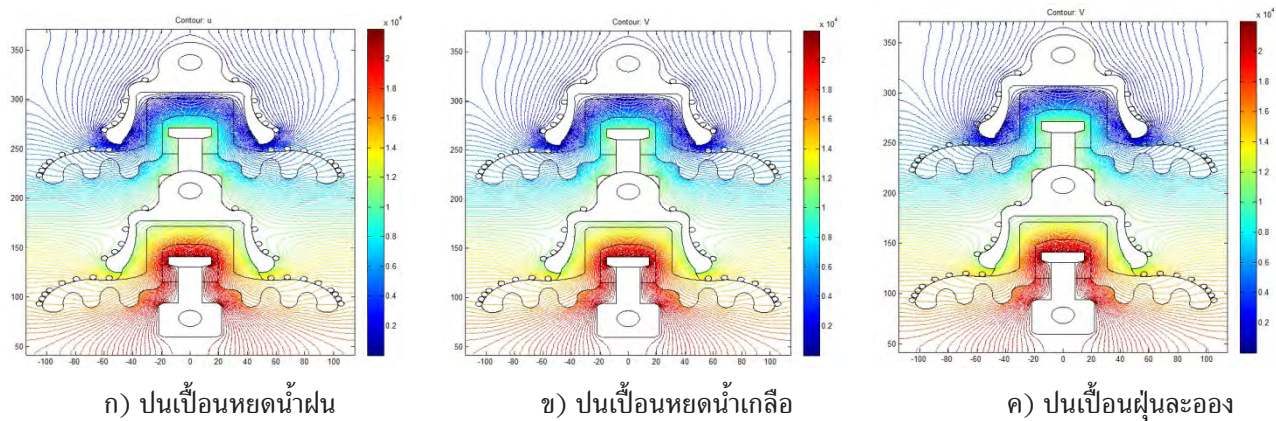
พารามิเตอร์ ประเภท	ϵ_r (Relative Permittivity)
ปอร์ซเลน	6
ซีเมนต์	7
โลหะเหล็ก	1.03×10^7
น้ำ	88
น้ำเกลือ	80
ฝุ่นละออง	2.8
อากาศ	1

ตารางที่ 2 ค่าความหนาแน่นประจุเชิงพื้นที่

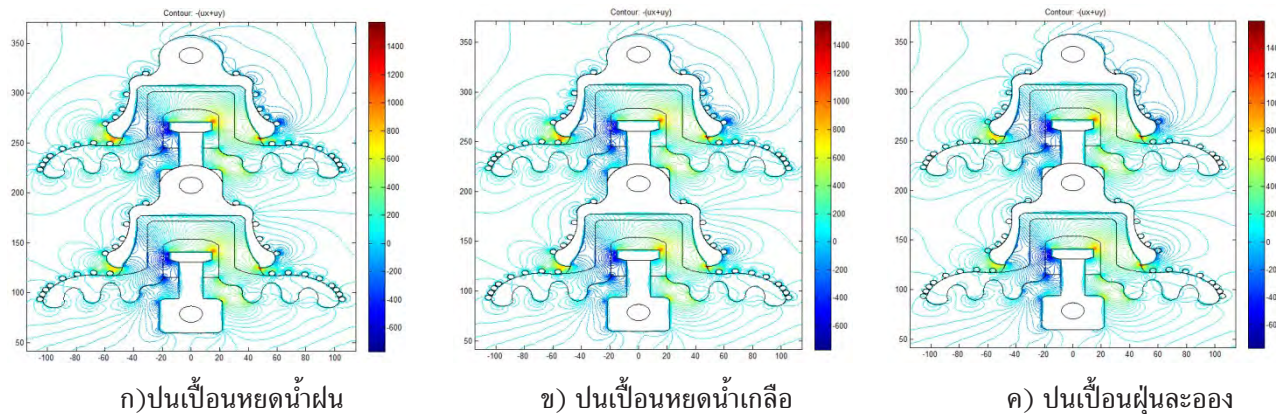
ประเภท	ρ (C/m ²)
ปอร์ซเลน	3.382×10^{-17}
ซีเมนต์	8.79×10^{-17} , 1.208×10^{-17}
โลหะเหล็ก	6.268×10^{-17} , 4.233×10^{-17} , 7.208×10^{-17}
ปนเปื้อนที่เป็นหยดน้ำ	8.16×10^{-15}

6. ผลการจำลอง

การจำลองผลในบทความนี้ใช้โปรแกรม MATLAB ที่พัฒนาอัลกอริทึมขึ้นเองเพื่อช่วยในการวิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้า โดยวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าและค่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณผิวของลูกถ้วยแขวนทั้ง 2 ชั้นเมื่อมีการใช้งานในสภาวะปนเปื้อนต่างๆ โดยแบ่งพื้นที่ตำแหน่งผิวของลูกถ้วยในแต่ละชั้นออกเป็นชั้นละ 6 บริเวณที่มีความสำคัญเพื่อคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยในแต่ละชั้นแล้วเปรียบเทียบผลค่าศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองในแต่ละกรณีแสดงได้ดังตารางที่ 3 และตารางที่ 4 ตามลำดับ และผลการจำลองในเชิงกราฟฟิกของการกระจายศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าแสดงได้ดังรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ



รูปที่ 5 การกระจายศักย์ไฟฟ้า (V) เมื่อทำงานในสภาวะปนเปื้อนต่างๆ



รูปที่ 6 การกระจายสนามไฟฟ้า (V/mm) เมื่อทำงานในสภาวะปนเปื้อนต่างๆ

ตารางที่ 3 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่งผิวของลูกถ้วยสภาวะปนเปื้อนต่างๆ

บริเวณที่พิจารณา	ปนเปื้อนด้วยหยดน้ำ (V)	ปนเปื้อนด้วยหยดน้ำเกลือ (V)	ปนเปื้อนด้วยฝุ่นละออง (V)
A1	3.0753	3.5030	56.3620
A2	5026.6022	5027.9624	5202.5037
A3	5020.4332	5021.7449	5200.4200
A4	5939.9410	5940.8801	6068.0333
A5	5945.8495	5946.8657	6080.0031
A6	9277.6671	9277.7119	9283.3665
B1	11257.6590	11257.8186	11278.5709
B2	15024.5229	15025.6052	15172.6783
B3	15010.6103	15011.6914	15160.2815
B4	16299.3723	16300.2015	16413.4146
B5	16314.5681	16315.3956	16428.6497
B6	20182.8016	20182.8183	20184.3078
เฉลี่ย	15681.5890	15682.2551	15772.9838

ตารางที่ 4 ค่าสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งผิวของลูกถ้วยสภาวะปนเปื้อนต่างๆ

บริเวณที่พิจารณา	ปนเปื้อนด้วยหยดน้ำ (V/mm)	ปนเปื้อนด้วยหยดน้ำเกลือ (V/mm)	ปนเปื้อนด้วยฝุ่นละออง (V/mm)
A1	40.4868	40.4792	42.7646
A2	10.8895	10.8257	8.4342
A3	0.2137	0.2307	3.6813
A4	31.9481	31.8549	34.4729
A5	39.1011	39.0645	36.4680
A6	24.1390	24.0995	23.3972
B1	31.1097	31.1032	31.1773
B2	21.2261	21.1938	24.2132
B3	26.1342	26.0907	25.4022
B4	15.4414	15.0037	-1.6044
B5	0.3575	0.0827	-12.0330
B6	35.7894	35.5991	36.8358
เฉลี่ย	21.6764	21.5122	21.8777

รูปที่ 5 แสดงการกระจายศักย์ไฟฟ้าบนผิวของลูกถ้วยเมื่อมีการปนเปื้อนหยดน้ำฝน หยดน้ำเกลือและฝุ่นละออง ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าศักย์ไฟฟ้าจะมีค่ามากที่สุดบริเวณตำแหน่งค้ำสายตัวนำเนื่องจากสายตัวนำจะมีค่าศักย์ไฟฟ้ามากที่สุดเมื่อเทียบกับ กราวด์ที่อยู่ด้านบนของลูกถ้วย โดยในชั้นที่ 2 ซึ่งเป็นชั้นที่อยู่ถัดขึ้นไปด้านบนจะมีค่าน้อยกว่าชั้นที่ 1 และในชั้นที่ 1 มีค่าเฉลี่ย ตลอดทั้งผิวลูกถ้วยเป็น 5202.2614 V , 5203.1113V และ 5315.1148 V ตามลำดับและในชั้นที่ 2 จะมีค่าเฉลี่ยตลอดผิวลูก ถ้วยเป็น 15681.5890V , 15682.2551 V และ 15772.9838 V ตามลำดับจะเห็นว่ากรณีที่ผิวลูกถ้วยมีฝุ่นละอองปนเปื้อนจะ ทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้ามีการกระจายตัวตามผิวมากที่สุด จากรูปที่ 6 แสดงการกระจายของสนามไฟฟ้าเมื่อพิจารณาจากกราฟจะเห็นว่า เมื่อพิจารณาเพียงขนาดของค่าสนามไฟฟ้าทั้ง 3 กรณีคือ ปนเปื้อนหยดน้ำฝน หยดน้ำเกลือและ ฝุ่นละออง ค่าสนามไฟฟ้าจะ มีค่ามากที่สุดที่ตำแหน่งโค้งมน และบริเวณจุดแหลมของชั้นลูกถ้วยซึ่งจะมีผลต่อการเกิด flash over ผ่านอากาศ ทำให้มีโอกาสเกิด ความเสียหายต่อลูกถ้วยได้ เมื่อพิจารณาที่บริเวณผิวลูกถ้วยบนชั้นที่ 1 จะมีค่าเฉลี่ยตลอดผิวลูกถ้วยเป็น 24.4630 V/mm, 24.4258 V/mm และ 24.8697 V/mm ตามลำดับและในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาที่ผิวของลูกถ้วยในชั้นที่ 2 จะมีค่าการ กระจายสนามไฟฟ้าเมื่อปนเปื้อนหยดน้ำฝน น้ำเกลือ และ ฝุ่นละออง โดยมีค่าดังนี้ 21.6764 V/mm, 21.5122 V/mm และ 21.8777 V/mm ซึ่งจากผลการจำลองเมื่อเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าทั้ง 3 กรณีจะเห็นว่า ในกรณีที่ผิวของลูกถ้วยมีการปนเปื้อน ด้วยฝุ่นละออง จะทำให้ค่าสนามไฟฟ้ามีค่ามากที่สุดที่บริเวณผิวลูกถ้วยทำให้มีโอกาสเกิดการวาบไฟตามผิวได้มากที่สุด และในกรณีที่ ผิวลูกถ้วยมีการปนเปื้อนด้วยหยดน้ำเกลือ จะทำให้ค่าสนามไฟฟ้ามีค่าน้อยที่สุดที่บริเวณผิวลูกถ้วยทำให้มีโอกาสเกิดการวาบไฟตาม ผิวได้น้อยที่สุด

7. สรุป

บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบค่าการกระจายสนามไฟฟ้าที่บริเวณผิวของลูกถ้วยแขวนชนิด 52-2 เมื่อมีการทำงานใน สภาวะปนเปื้อนด้วยระเบียบวิธีไฟในทอลิเมนท์ โดยเปรียบเทียบถึงขนาดความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งผิวลูกถ้วยทั้งสองชั้น พบว่าเมื่อลูกถ้วยทำงานที่สภาวะปนเปื้อนฝุ่นละอองจะทำให้ค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตามผิวของลูกถ้วยมีค่ามากที่สุด ส่งผลให้มี โอกาสเกิดการวาบไฟตามผิวได้ง่ายที่สุดเมื่อและเมื่อลูกถ้วยทำงานในสภาวะปนเปื้อนหยดน้ำเกลือ โดยจำลองแทนการปนเปื้อนด้วยไอ หมอกเกลือจะส่งผลให้ค่าสนามไฟฟ้าที่ผิวมีค่าน้อยที่สุดส่งผลให้โอกาสการเกิดการวาบไฟตามผิวเกิดได้ยากกว่า แต่อย่างไรก็ตามค่า สนามไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองผลยังมีค่าน้อยกว่าค่าความคงทนฉนวนของอากาศซึ่งถือว่าการปนเปื้อนทั้งสามกรณียังไม่สามารถ ทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวได้ในชั่วขณะ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Matthew N.O. Sadiku. 2000. Numerical Techniques in Electromagnetics. Boca Raton London New York Washinton, D.C. :CRC Press.
- [2] สำรวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. กรุงเทพฯ:คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547
- [3] William H. Hayt, Jr. and John A. Buck, Engineering Electromagnetics. The McGraw-Hill, 2001.
- [4] ปราโมทย์ เตชะอำไพ. 2542. ไฟนิต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [5] B. K. Guatam, M. Ito, B. Marungsri, R. Matsuoka, S. Ito and K. Arakawa, Contamination Flashover Performances of Hydrophobic Polymer Insulators with Different Core Diameter, ICSD 2004, ID204, Toulouse, France, July 5 -9, 2004.
- [6] B. Marungsri, H. Komiya, I. Aoyama, A. ishigawa, and R. Matsuoka, Salt Fog Ageing Test of Silicone Rubber for Outdoor Polymer Insulators, ICPADM2003, Nagoya, Japan, June1-5, 2003