

การศึกษาการกระจายของสนามไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกระแสรั่วไหล
บนลูกถ้วยฉนวนเปราะเปื้อน

The Study of Electric Field Distribution, Voltage Distribution and
Leakage Current on Polluted Insulators

ณัฐพงษ์ ตันทานุช และ พงศกรณ์ ชูตระกูล

Nutthaphong Tanthanuch and Phongsakon Chootragoon

กลุ่มวิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและเครื่องจักรกลไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จังหวัดปทุมธานี 12120

บทคัดย่อ

ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าทำหน้าที่ยึดสายไฟฟ้าแรงดันสูงให้มั่นคงอยู่บนเสาส่งจำหน่ายกำลังไฟฟ้า และเป็นฉนวนที่ใช้กั้นระหว่างตัวนำไฟฟ้าแรงดันสูงกับส่วนที่ต่อลงดินเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการลัดวงจรลงสู่ดิน เมื่อลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าเกิดปัญหาจะทำให้คุณสมบัติความเป็นฉนวนของลูกถ้วยลดลงเป็นเหตุให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นวงกว้าง ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าโดยส่วนใหญ่มีการติดตั้งภายนอก และสัมผัสอยู่กับอากาศตลอดเวลา ทำให้เกิดการจับเกาะของมลภาวะบนผิวลูกถ้วย เป็นเหตุให้การกระจายของสนามไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกระแสรั่วไหลเปลี่ยนแปลงไป จึงทำให้คณะผู้วิจัยมีความสนใจที่จะศึกษาผลกระทบของมลภาวะที่มีต่อการกระจายสนามไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกระแสรั่วไหลบนลูกถ้วยฉนวน โดยใช้แบบจำลองของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าแขวนแบบ 52 – 1 แบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 4 กรณี คือ กรณีแรกมลภาวะปกคลุมผิวของลูกถ้วยฉนวนทั้งหมด กรณีที่สองมลภาวะปกคลุมผิวด้านบนของลูกถ้วยฉนวน กรณีที่สามมลภาวะปกคลุมผิวด้านล่างของลูกถ้วยฉนวน และกรณีที่สี่มลภาวะปกคลุมผิวบางส่วนใกล้หมุดโลหะของลูกถ้วยฉนวน จากผลการคำนวณพบว่าค่าสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนที่มีมลภาวะปกคลุมมีค่าสูงกว่าค่าสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนสะอาด มีโอกาสเกิดดีสชาร์จ โดยเฉพาะบริเวณส่วนต้น และส่วนปลายของมลภาวะ ชั้นมลภาวะที่ปกคลุมผิวลูกถ้วยฉนวนทำให้การกระจายแรงดันไฟฟ้ามีลักษณะเป็นเชิงเส้นมากขึ้น ขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของชั้นมลภาวะ กระแสรั่วไหลมีขนาดเพิ่มขึ้นตามปริมาณของมลภาวะบนผิวลูกถ้วย โดยมีค่าสูงสุดในกรณีที่มลภาวะปกคลุมผิวทั้งหมด ส่งผลให้ลูกถ้วยฉนวนในกรณีนี้มีแนวโน้มที่จะเสื่อมสภาพเร็วที่สุด

คำสำคัญ : ลูกถ้วยฉนวน มลภาวะ สนามไฟฟ้า ดีสชาร์จ

Abstract

The insulators are used in the power system to hold and isolate the high voltage conductors on the power distribution poles to prevent the current flow to the ground. When the insulators loss their performance due to deterioration, this will eventually result in power outage in a wide area. Normally, the insulators are used outdoor. They can be thus subjected to different types of contamination all the time. This can contribute to charge in the electric field distribution, voltage distribution and leakage current on the insulators. Therefore, this paper aims to examine the effect of pollution on the electric field distribution, voltage distribution and leakage current along the insulator by using a model of suspension porcelain insulator of type ANSI Class 52 – 1. The simulation is divided into four-case studies: the pollution covered all surface of the insulator, the pollution covered an upper surface of the insulator, the pollution covered a lower surface of the insulator and the pollution covered close to the pin area. According to the computing results, the electric field of the polluted insulator is higher than that of the cleaned one. The corona discharge occurs at the beginning and at the end of the pollution layer. The voltage distribution shows more linear characteristic as a result of contamination covered on insulator surface. Its voltage level is depending on the positions of contamination layer. The leakage current increases when the amount of pollutant increases. The highest value of

leakage current is in the case of pollution covered the entire surface. This can imply that the insulators which their whole surfaces are covered by pollution tend to be degraded more quickly than the others.

Keywords: Insulator, Pollution, Electric field, Corona discharge

1. บทนำ

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานที่ใช้ในระบบสาธารณูปโภคขั้นพื้นฐานที่สำคัญอย่างมากทั้งในภาคธุรกิจ และภาคอุตสาหกรรม อีกทั้งการขยายตัวของชุมชนเมือง และเศรษฐกิจของประเทศเป็นไปอย่างรวดเร็ว ทำให้ต้องมีการผลิตพลังงานไฟฟ้าให้เพียงพอต่อการใช้งาน โดยระบบสายส่ง และจำหน่ายกำลังไฟฟ้าแรงดันสูงประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่ติดตั้งร่วมกับสายเคเบิลหลายชนิด เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า กับดักฟ้าผ่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ถูกใช้ในการติดตั้งมากที่สุดในระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าทำหน้าที่ยึดตัวนำไฟฟ้าแรงดันสูงให้มั่นคงอยู่บนเสาส่งจำหน่ายกำลังไฟฟ้า อีกทั้งยังเป็นฉนวนที่ใช้กั้นระหว่างตัวนำไฟฟ้าแรงดันสูงกับส่วนที่ต่อลงดินเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการลัดวงจรสู่ดิน ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าสามารถแบ่งตามวัสดุที่ใช้ทำลูกถ้วยฉนวนออกเป็นสามชนิด ได้แก่ ลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ และลูกถ้วยฉนวนแก้วเหนียว แต่ลูกถ้วยฉนวนที่ติดตั้งในระบบสายส่งและจำหน่ายไฟฟ้าของประเทศไทยส่วนใหญ่ คือ ลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน เนื่องจากมีราคาถูก หาซื้อได้ง่ายและสามารถผลิตได้เองในประเทศไทย ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนเป็นอุปกรณ์ที่เกิดปัญหาบ่อยที่สุด โดยปัญหาส่วนใหญ่ที่พบจากการใช้งานลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า คือ การเสื่อมสภาพ และการเสียหายของผิวลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าจากความร้อน ปฏิกริยาเคมี การเกิดวาบไฟตามผิวจากแรงดันเกิน และการสะสมของมลภาวะบนผิวลูกถ้วยฉนวน ทำให้เกิดเป็นทางผ่านของกระแสไฟฟ้าบนผิวลูกถ้วยได้ง่ายจนทำให้เกิดความร้อนสะสม ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ลูกถ้วยฉนวนเสื่อมสภาพเนื่องมาจากลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ามีการสัมผัสกับมลภาวะที่อยู่ในอากาศตลอดเวลา [1].

มลภาวะที่อยู่บนผิวทำให้ความเป็นฉนวนของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าลดลง เกิดกำลังสูญเสียในระบบไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของกระแสรั่วไหล นอกจากนี้ความร้อนที่เกิดจากการไหลของกระแสไฟฟ้ายังทำให้ผิวของลูกถ้วย

ฉนวนเสียหาย นำไปสู่การเกิดดีสชาร์จบางส่วน วาบไฟตามผิว [2] การแตกร้าว และการเกาะตะลุมของลูกถ้วยฉนวนเป็นเหตุให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นวงกว้าง ส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้า ทำให้ความน่าเชื่อถือ และเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าลดลง ชนิด และปริมาณของมลภาวะที่สะสมบนผิวของลูกถ้วยฉนวนจะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมที่ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าติดตั้งอยู่ เช่น ไอเกลือในบริเวณริมชายฝั่งทะเล ฝุ่นปูนซีเมนต์ บริเวณเขตอุตสาหกรรม และเขม่าที่เกิดจากการเผาไหม้ ทั้งนี้ระดับการเสื่อมสภาพ และความเสียหายของลูกถ้วยฉนวนขึ้นอยู่กับชนิด ปริมาณ และรูปแบบการกระจายของมลภาวะที่สะสมบนผิวของลูกถ้วยไฟฟ้า

จากปัญหาข้างต้นนี้ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาและวิเคราะห์ผลของมลภาวะที่มีต่อการกระจายของสนามไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกระแสรั่วไหลบนลูกถ้วยฉนวนประเภทอื่น และนำผลที่ได้มาเป็นเกณฑ์ในการประเมินการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าที่ติดตั้งในระบบจำหน่ายไฟฟ้า 22 kV

2. ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษา

2.1 ลูกถ้วยฉนวนแขวน

ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าแบบแขวน 52 – 1 ซึ่งใช้ในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ลูกถ้วยฉนวนชนิดนี้สามารถห้อยแขวนต่อกันเป็นพวงได้ ส่วนบนของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้านั้นจะมีฝาครอบโลหะมีรูหรือช่องที่จะห้อยเกี่ยวกับก้านโลหะที่อยู่ด้านล่างของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าลูกบนได้ ในกรณีที่มีการยึดกับสายส่งจ่ายที่มีขนาดของแรงดันไฟฟ้าสูงมากขึ้น จำนวนลูกถ้วยไฟฟ้าจะต้องมากขึ้นเพื่อให้พวงลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าสามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้สูงขึ้น ทำให้สะดวกต่อการใช้งานหรือปรับเปลี่ยนจำนวนลูกถ้วยในภายหลัง ด้วยเหตุนี้การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจึงใช้ลูกถ้วยแขวนในระบบจำหน่าย ทำหน้าที่ยึดสายตัวนำไฟฟ้าที่เสาส่งจ่ายในกรณีที่แนวเดินสายไฟฟ้ามีลักษณะ โค้งหรือหักมุม ก็จะติดตั้งพวงลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าในแนวนอน โดยในระบบจำหน่าย 22 kV ของ



รูปที่ 1 การต่อพวงลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าแบบ 52-1 บนเสาไฟฟ้าระบบ 22 Kv

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคใช้ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าแบบฉนวนจำนวน 3 ลูกต่อชุดพวงลูกถ้วย [3] ดังแสดงในรูปที่ 1

2.2 สนามไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้า

ในสภาวะปกติลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ามีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า และสามารถทนต่อแรงดันไฟฟ้าใช้งานปกติของระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้ โดยป้อนแรงดันไฟฟ้าที่สายส่ง (จุดที่ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าต่อกับสายส่ง) การกระจายของสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าจะขึ้นกับรูปร่างลักษณะของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า เพื่อให้การกระจายสนามไฟฟ้าเป็นแบบสม่ำเสมอมากขึ้น ครีบริหรือชั้นลูกถ้วยจะถูกออกแบบให้มีผิวโค้งตามแนวเส้นเค้าโครงแรงดันไฟฟ้าเพื่อควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าไม่ให้มีค่าสูง โดยทั่วไปนั้นผิวลูกถ้วยฉนวนด้านบนที่ติดอยู่กับฝาครอบโลหะจะมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณอื่น จึงเป็นตำแหน่งที่เกิดโคโรนาได้ง่าย [4] ในงานวิจัยนี้ทำการจำลองการกระจายของสนามไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้า และกระแสรั่วไหลของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า เมื่อไม่ค หนึ่งผลของการเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กสมการควบคุมที่ใช้ในการคำนวณสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ [5,6]

$$E = -\nabla V \quad (1)$$

$$J = \left(\sigma + \epsilon_r \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \right) E + J_e \quad (2)$$

โดย E คือ สนามไฟฟ้า (V/m)

V คือ แรงดันไฟฟ้า (V)

J คือ ความหนาแน่นกระแส (A/m²)

σ คือ สภาพนาไฟฟ้า (S/m)

ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์

ϵ_0 คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสุญญากาศ (F/m)

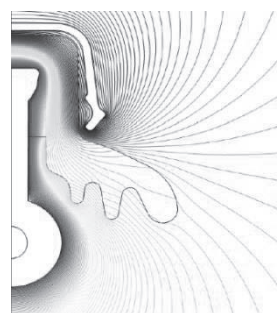
J_e คือ ความหนาแน่นของกระแสภายนอก (A/m²)

ตัวอย่างเส้นเค้าโครงแรงดันไฟฟ้า และรูปคลื่นกระแสรั่วไหลบนผิวลูกถ้วยฉนวน 52-1 ในกรณีไม่มีมลภาวะปกคลุม (ผิวสะอาด) แสดงดังรูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

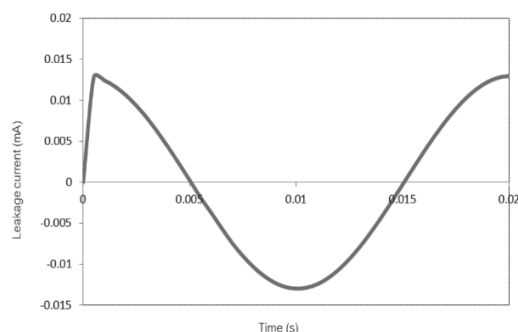
3. แบบจำลองลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า

ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าแบบฉนวน 52-1 ประกอบด้วยฝาครอบโลหะ (Cap) แบบห้วงสลัก เนื้อฉนวนทาจากพอร์ซเลน ทาการยึดฝาครอบโลหะพอร์ซเลน (Porcelain) และก้านหมุดโลหะ (Pin) ด้วยซีเมนต์ และมีครีบริได้ปักลูกถ้วยฉนวนจำนวน 4 ครีบริ โดยโครงสร้าง และชนิดของวัสดุต่างๆที่ใช้ทา ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าแบบฉนวนแสดงดังรูปที่ 4

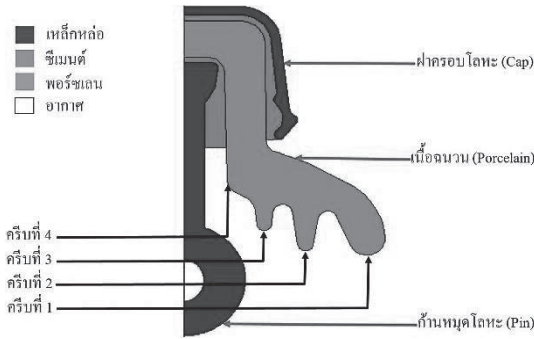
ทาการคำนวณการกระจายของสนามไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้า และกระแสรั่วไหลบนลูกถ้วยฉนวนสะอาด และลูกถ้วยเปรอะเปื้อนโดยระเบียบวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method, FEM) โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ ดังนี้



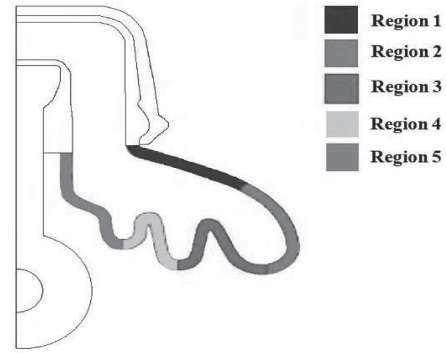
รูปที่ 2 เส้นเค้าโครงแรงดันไฟฟ้ากรณีผิวลูกถ้วยฉนวนสะอาด



รูปที่ 3 กระแสรั่วไหลกรณีผิวลูกถ้วยสะอาด



รูปที่ 4 โครงสร้าง และวัสดุของลูกถ้วยฉนวนแขวนแบบ 52 – 1 [7]



รูปที่ 5 บริเวณการจับเกาะของมลภาวะบนลูกถ้วยฉนวน

- สภาพนำไฟฟ้าของชั้นมลภาวะ 3 ระดับตาม IEC 60815-1 [8] ได้แก่ 100 $\mu\text{S}/\text{m}$ (ระดับความเปรอะเปื้อนเล็กน้อย) 400 $\mu\text{S}/\text{m}$ (ระดับความเปรอะเปื้อนปานกลาง) และ 700 $\mu\text{S}/\text{m}$ (ระดับความเปรอะเปื้อนสูง)
- ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของชั้นมลภาวะ 2 ระดับ คือ 5.9 และ 81
- ปริมาณมลภาวะในรูปแบบของความหนาชั้นมลภาวะ 3 ระดับ ได้แก่ ความหนา 0.5 mm (ปริมาณมลภาวะต่ำ) ความหนา 2 mm (ปริมาณมลภาวะปานกลาง) และความหนา 4 mm (ปริมาณมลภาวะสูง)
- ขอบเขตการปกคลุมของมลภาวะบนผิวฉนวนสามารถแบ่งเป็นกรณีศึกษาได้เป็น 4 บริเวณ ภายใต้ขอบเขต จำกัดในพื้นที่ของ region 1 ถึง region 5 ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 5

โดยลักษณะการจับเกาะของมลภาวะแบ่งออกเป็น 4 กรณี ดังนี้

- กรณีที่ 1 มลภาวะปกคลุมผิวของลูกถ้วยฉนวนทั้งหมด คือ มลภาวะปกคลุมตั้งแต่ region 1 ถึง region 5
- กรณีที่ 2 มลภาวะปกคลุมผิวด้านบนของลูกถ้วยฉนวน คือ มลภาวะปกคลุม region 1 ถึง region 2
- กรณีที่ 3 มลภาวะปกคลุมผิวด้านล่างของลูกถ้วยฉนวน คือ มลภาวะปกคลุม region 3 ถึง region 5

กรณีที่ 4 มลภาวะปกคลุมผิวด้านบนของลูกถ้วยฉนวน คือ มลภาวะปกคลุมผิวเฉพาะ region 5

ในทางปฏิบัติการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคใช้ลูกถ้วยจำนวนสามลูก ที่แรงดันต่อเฟส 22 kVrms/ 1.732 หรือเท่ากับ 12.8 kVrms ต่อหนึ่งเฟส ดังนั้นในงานวิจัยนี้ซึ่งใช้เพียงลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าจำนวนหนึ่งลูก จึงทำการป้อนแรงดันขนาด 4.2 kVrms ที่ตำแหน่งก้านหมุดโลหะ และต่อลงดินที่ฝาครอบโลหะ นำเสนอผลการคำนวณการกระจายสนามไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้าบนผิวลูกถ้วยฉนวนที่ตำแหน่งจากก้านโลหะไปยังตำแหน่งฝาครอบโลหะที่เวลา 5 ms เนื่องจากเป็นเวลาที่แรงดันไฟฟ้า ความเครียดสนามไฟฟ้า และกระแสรั่วไหลเฉลี่ยกำลังสองที่ไหลระหว่างก้านหมุดโลหะ และฝาครอบโลหะมีขนาดมากที่สุด

4. ผลของการจำลอง

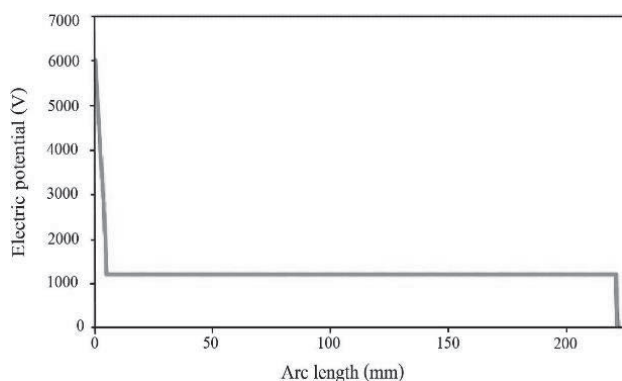
จากการกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณเพื่อศึกษาถึงผลกระทบของคุณสมบัติ ปริมาณ และรูปแบบการจับเกาะของมลภาวะที่มีต่อการกระจายสนามไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้า และกระแสรั่วไหลบนลูกถ้วยฉนวนสามารถแบ่งผลการจำลองออกเป็น 4 หัวข้อ ดังนี้

- สภาพนำไฟฟ้า และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของชั้นมลภาวะ
- ความหนาของชั้นมลภาวะ
- การจับเกาะของมลภาวะ
- การเสื่อมสภาพของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า

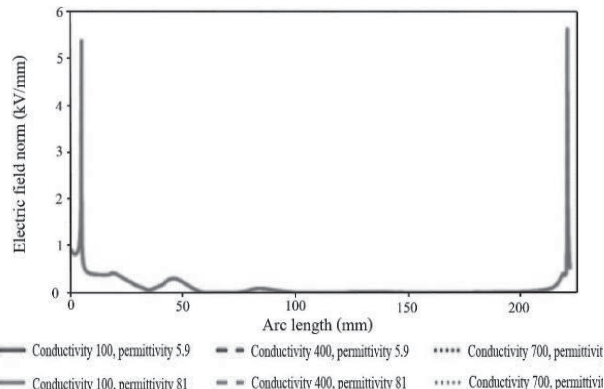
4.1 สภาพนำไฟฟ้า และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของชั้น มลภาวะต่อการกระจายสนามไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกระแสรั่วไหลบนลูกถ้วย ฉนวน

ในหัวข้อนี้จะแสดงตัวอย่างผลการคำนวณกรณีที่มีมลภาวะปกคลุมผิวของลูกถ้วยฉนวนทั้งหมด เนื่องจากเป็นกรณีที่มีความรุนแรงที่สุด และกำหนดให้ชั้นมลภาวะมีความหนา 4 mm (ปริมาณมลภาวะสูง) เนื่องจากการกระจายสนามไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกระแสรั่วไหลมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดเมื่อเทียบกับลูกถ้วยฉนวนสะอาด

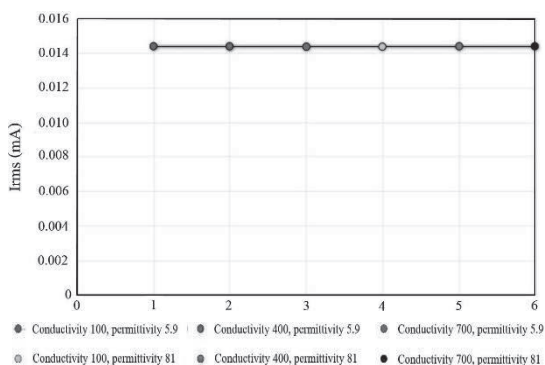
จากรูปที่ 6 ถึงรูปที่ 8 สภาพนำไฟฟ้าของชั้นมลภาวะที่ปกคลุมผิวของลูกถ้วยฉนวนไม่ส่งผลต่อการกระจายสนามไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกระแสรั่วไหล เนื่องจากชั้นของมลภาวะเปรียบเสมือนความต้านทานไฟฟ้าค่าต่ำต่อขนานกับความต้านทานค่าสูงของผิวลูกถ้วยฉนวน ทำให้ความต้านทานไฟฟ้าเชิงผิวรวมมีค่าลดลง ซึ่งความต้านทานไฟฟ้าที่สภาพนำไฟฟ้าของชั้นมลภาวะ 100 $\mu\text{S/m}$ 400 $\mu\text{S/m}$ และ 700 $\mu\text{S/m}$ มีค่าแตกต่างกันไม่มาก ทำให้ความต้านทานไฟฟ้าเชิงผิวรวมเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย กระแสรั่วไหลบนผิวของลูกถ้วยฉนวนแปรผกผันกับขนาดแตกต่างกันเล็กน้อย ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้า และสนามไฟฟ้าตามผิวลูกถ้วยฉนวนที่ทุกค่าสภาพนำไฟฟ้ามีลักษณะเหมือนกัน



รูปที่ 6 แรงดันไฟฟ้ากรณีที่มีมลภาวะปกคลุมผิวลูกถ้วยฉนวนทั้งหมดที่สภาพนำไฟฟ้าและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกค่าต่าง ๆ



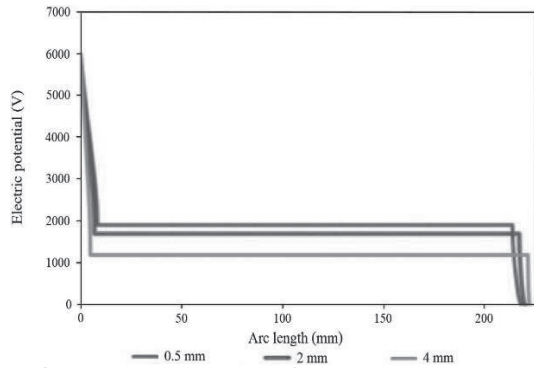
รูปที่ 7 สนามไฟฟ้ากรณีที่มีมลภาวะปกคลุมผิวลูกถ้วยฉนวนทั้งหมดที่สภาพนำไฟฟ้าและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกค่าต่าง ๆ



รูปที่ 8 กระแสรั่วไหลเฉลี่ยกำลังสองกรณีที่มีมลภาวะปกคลุมผิวลูกถ้วยฉนวนทั้งหมดที่สภาพนำไฟฟ้าและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกค่าต่าง ๆ

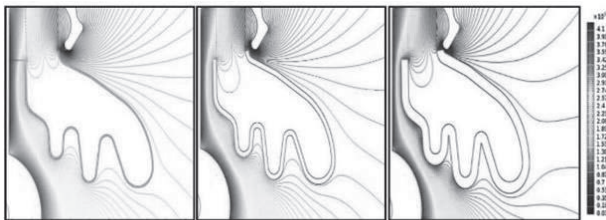
4.2 ความหนาของชั้นมลภาวะต่อการกระจาย สนามไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกระแสรั่วไหล บนลูกถ้วยฉนวน

มลภาวะที่เกาะบนผิวลูกถ้วยฉนวนถูกแบ่งออกเป็น 3 ระดับความหนา โดยตัวอย่างผลการคำนวณในกรณีที่มีมลภาวะปกคลุมผิวทั้งหมดของลูกถ้วยฉนวนที่ทุกความหนาชั้นมลภาวะ แสดงดังรูปที่ 9 และรูปที่ 10 ตามลำดับ



รูปที่ 9 แรงดันไฟฟ้าตามผิวที่มลภาวะปกคลุมผิวของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าทั้งหมดที่ความหนาของชั้นมลภาวะต่าง ๆ

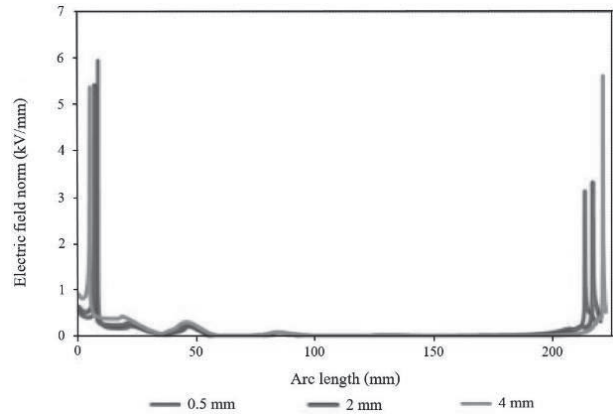
จากผลการคำนวณในรูปที่ 9 แรงดันไฟฟ้าที่บริเวณก้านหมุดโลหะมีขนาดลดลงอย่างรวดเร็ว และมีค่ามากที่สุดเมื่อชั้นมลภาวะมีความหนา 4 mm เนื่องจากระยะระหว่างซีเมนต์กับโลหะที่เหลือน้อยที่สุด แรงดันไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยตามผิวลูกถ้วยฉนวนและมีค่าน้อยที่สุดที่ความหนาของชั้นมลภาวะ 4 mm จากนั้นแรงดันไฟฟ้าจะลดลงอีกครั้ง โดยที่ความหนาของชั้นมลภาวะ 0.5 mm มีการลดลงของแรงดันไฟฟ้ามากที่สุด เนื่องจากมีขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมชั้นมลภาวะมากที่สุด



ก) 0.5 mm ข) 2 mm ค) 4 mm

รูปที่ 10 เส้นเค้าโครงแรงดันไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนเมื่อมลภาวะที่ปกคลุมผิวของลูกถ้วยฉนวนทั้งหมดที่ความหนาชั้นมลภาวะ

จากความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าตามผิวลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ากับความหนาของชั้นมลภาวะในรูปที่ 11 สนามไฟฟ้ามีค่าสูงที่รอยต่อระหว่างซีเมนต์กับชั้นมลภาวะใกล้กับโลหะตัวนำต่าง ๆ

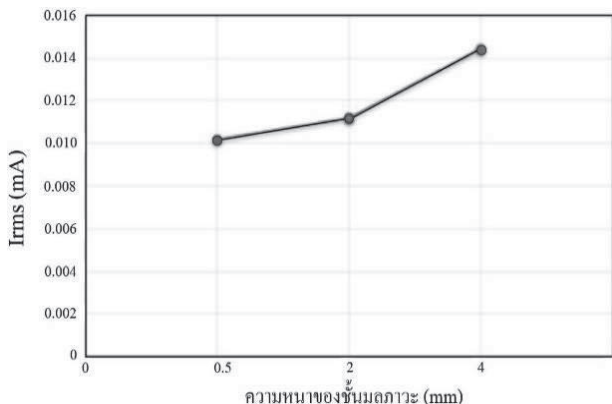


รูปที่ 11 ความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวเมื่อมลภาวะปกคลุมผิวของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าทั้งหมดที่ความหนาของชั้นมลภาวะต่าง ๆ

โดยที่หมุดโลหะมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อชั้นมลภาวะมีความหนา 0.5 mm (ปริมาณมลภาวะต่ำปกคลุมผิวลูกถ้วย) และที่ความหนาของชั้นมลภาวะ 4 mm (ปริมาณมลภาวะสูงปกคลุมผิวลูกถ้วย) ที่บริเวณฝาครอบโลหะ ซึ่งสามารถอธิบายได้จากความหนาแน่นของเส้นเค้าโครงแรงดันไฟฟ้าในแต่ละบริเวณแสดง ดังรูปที่ 10 กระแสรั่วไหลมีค่าเพิ่มขึ้นตามความหนาของชั้นมลภาวะดังรูปที่ 12 เนื่องจากความต้านทานของชั้นมลภาวะมีค่าลดลงตาม ความหนาที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานเชิงผิวรวมของลูกถ้วยฉนวนลดลง

4.3 ลักษณะการจับเกาะของมลภาวะต่อการกระจายสนามไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกระแสรั่วไหลบนลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า

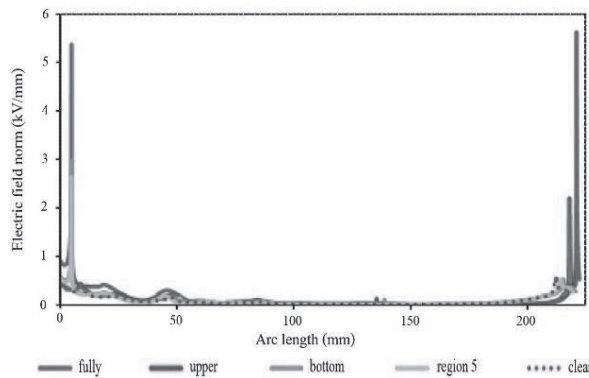
ผลการคำนวณที่ทุกความหนาของชั้นมลภาวะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เหมือนกัน ดังนั้นเพื่อแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้า สนามไฟฟ้า และกระแสรั่วไหลระหว่างลูกถ้วยฉนวนสะอาด และลูกถ้วยฉนวนเปรอะเปื้อนอย่างชัดเจน ในหัวข้อนี้จึงเลือกใช้ผลจากชั้นมลภาวะหนา 4 mm (ปริมาณมลภาวะสูงปกคลุมผิวลูกถ้วย) ในการเปรียบเทียบ



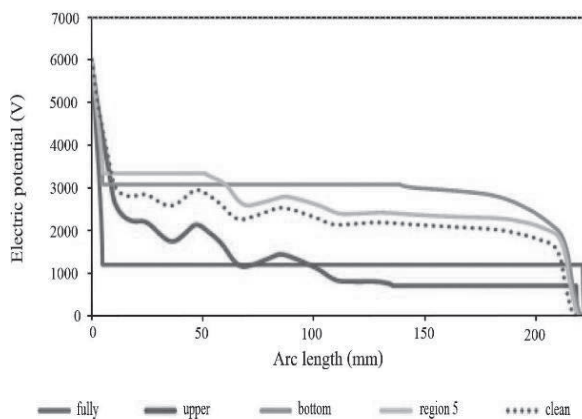
รูปที่ 12 กระแสรั่วไหลเฉลี่ยกำลังสองเมื่อมลภาวะปกคลุมผิวของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าทั้งหมดที่ความหนาของชั้นมลภาวะต่าง ๆ

จากรูปที่ 13 มลภาวะที่มาปกคลุมผิวของลูกถ้วยฉนวนทำให้การกระจายของแรงดันไฟฟ้ามีลักษณะเป็นเชิงเส้นมากขึ้น ในกรณีที่มีมลภาวะปกคลุมผิวของลูกถ้วยฉนวนทั้งหมด และกรณีที่มีมลภาวะปกคลุมผิวด้านบนของลูกถ้วยฉนวน แรงดันไฟฟ้าบริเวณที่มีมลภาวะปกคลุมมีค่าน้อยกว่าลูกถ้วยฉนวนสะอาด เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าส่วนใหญ่ตกคร่อมบริเวณที่เป็นฉนวนซึ่งก็คือบริเวณซีเมนต์ที่อยู่ระหว่างก้านหมุดโลหะกับพอร์ชเลน แต่กรณีที่มีมลภาวะปกคลุมผิวด้านล่างของลูกถ้วยฉนวน และกรณีที่มีมลภาวะปกคลุมผิวบางส่วน ของลูกถ้วยบริเวณใกล้ก้านหมุดโลหะ แรงดันไฟฟ้าบริเวณผิวของลูกถ้วยฉนวนที่มีมลภาวะปกคลุมมีค่าสูงกว่าลูกถ้วยฉนวนสะอาด เนื่องจากชั้นมลภาวะทำให้การกระจายสนามไฟฟ้าที่บริเวณส่วนล่างของลูกถ้วยฉนวนมีบริเวณต่าง ๆ ที่ความหนาของชั้นมลภาวะ 0.5 mm 2 mm 4 mm ที่ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของชั้นมลภาวะ 5.9

จากรูปที่ 14 มลภาวะที่มาปกคลุมผิวของลูกถ้วยฉนวนส่งผลให้ขนาดของสนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับลูกถ้วยฉนวนสะอาด ซึ่งสามารถอธิบายได้จากแรงดันไฟฟ้าบริเวณที่มีมลภาวะปกคลุมมีการเปลี่ยนแปลงมาก สนามไฟฟ้ามีค่าสูงที่บริเวณส่วนต้น และส่วนปลายของชั้นมลภาวะ และมีค่าสูงมากที่รอยต่อระหว่างอากาศ ซีเมนต์ และชั้นมลภาวะใกล้ก้านหมุดโลหะ และฝาครอบโลหะ

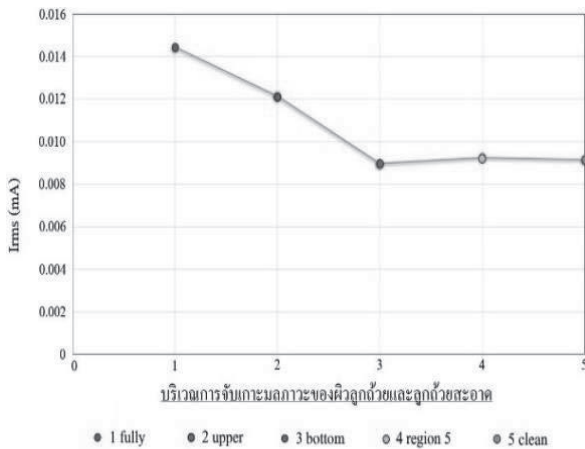


รูปที่ 13 แรงดันไฟฟ้าตามผิวของลูกถ้วยฉนวนสะอาดและลูกถ้วยฉนวนที่มีมลภาวะปกคลุมบนผิว



รูปที่ 14 สนามไฟฟ้าตามผิวของลูกถ้วยฉนวนสะอาดและลูกถ้วยฉนวนที่มีมลภาวะปกคลุมบนผิว

ผลการคำนวณกระแสรั่วไหลเฉลี่ยกำลังสองดังรูปที่ 15 พบว่ากระแสรั่วไหลจากกรณีที่มีมลภาวะปกคลุมผิวของลูกถ้วยฉนวนทั้งหมดมีค่ามากที่สุด รองลงมากรณีที่มีมลภาวะปกคลุมผิวด้านบนของลูกถ้วยฉนวนอีกทั้งยังพบว่าค่ากระแสรั่วไหลเฉลี่ยกำลังสองของกรณีที่มีมลภาวะปกคลุมผิวด้านล่างของลูกถ้วยฉนวนกรณีชั้นมลภาวะปกคลุมผิวบางส่วนของลูกถ้วยฉนวน และกรณีลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าสะอาดมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าการจับเกาะของชั้นมลภาวะที่ส่วนล่างของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า ทำให้ความต้านทานเชิงผิวรวมมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย กระแสรั่วไหลบนผิวลูกถ้วยฉนวนจึงมีค่าต่ำ ดังนั้นการลดปริมาณกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นบนผิวลูกถ้วยฉนวนทำได้โดยการทำความสะอาดที่ผิวด้านบนของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าโดยการฉีดล้างด้วยน้ำ



รูปที่ 15 กระแสรั่วไหลเฉลี่ยกำลังสองของลูกถ้วยสะอาด และลูกถ้วยที่มีมลภาวะปกคลุม

4.4 การประเมินการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยฉนวน

จากผลการคำนวณการกระจายของสนามไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกระแสรั่วไหลบนลูกถ้วยฉนวนเปรอะเปื้อนในหัวข้อที่ผ่านมาพบว่ากรณีการจับเกาะของชั้นมลภาวะบนผิวของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าทั้งหมด ที่ความหนาของชั้นมลภาวะ 4 mm (ปริมาณมลภาวะสูง) มีค่ากระแสรั่วไหลสูงที่สุด ส่งผลให้ลูกถ้วยฉนวนมีแนวโน้มเสื่อมสภาพก่อนความหนาอื่น ๆ ในทุกกรณี

การเสื่อมสภาพของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าจากการเกิดโคโรนาดีสชาร์จเนื่องมาจากผลของมลภาวะสามารถพิจารณาได้จากสนามไฟฟ้าในรูปที่ 11 ในกรณีที่มลภาวะปกคลุมผิวของลูกถ้วยฉนวนทั้งหมดที่บริเวณส่วนต้น และส่วนปลายของชั้นมลภาวะซึ่งเป็นบริเวณรอยต่อระหว่างอากาศ ซีเมนต์ และมลภาวะที่ใกล้กับโลหะตัวนำ โดยค่าสนามไฟฟ้าของทั้งสองบริเวณมีค่าสูงกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตของอากาศที่ค่า 3 kV/mm ทำให้เกิดดีสชาร์จ และความร้อนทำให้ผิวของลูกถ้วยเสียหาย ความเป็นฉนวนของลูกถ้วยลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น และนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ของลูกถ้วยฉนวน อีกทั้งยังพบว่ากรณีที่มลภาวะปกคลุมผิวด้านบนของลูกถ้วยฉนวน กรณีที่มลภาวะปกคลุมบางส่วนหรือลูกถ้วยฉนวนค่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณส่วนต้น และส่วนปลายของมลภาวะต่าง ๆ บนผิวลูกถ้วยฉนวนมีค่าน้อยกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตของอากาศ แต่ยังมีโอกาสเกิดดีสชาร์จได้ ถ้า

ได้รับแรงดันเกินในระบบส่งจ่ายไฟฟ้า เช่น แรงดันเกินจากฟ้าผ่า หรือแรงดันเสิร์จสวิตช์ซึ่งเป็นต้น

5. สรุป

จากการจำลองการกระจายของสนามไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกระแสรั่วไหลบนลูกถ้วยฉนวนเปรอะเปื้อน สามารถสรุปได้ดังนี้

1. แรงดันไฟฟ้ามีการกระจายเป็นเชิงเส้นมากขึ้นเมื่อมีมลภาวะปกคลุมบนผิวลูกถ้วยฉนวน โดยเฉพาะบริเวณผิวส่วนบนของลูกถ้วยฉนวน
2. ขนาดของกระแสรั่วไหลมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสิ่งปนเปื้อนที่เกาะบนผิวลูกถ้วยฉนวน เนื่องจากความต้านทานเชิงผิวของลูกถ้วยฉนวนที่ลดลงจากการจับเกาะของมลภาวะ โดยจะมีผลมากในกรณีที่ปกคลุมบริเวณผิวด้านบนของลูกถ้วยฉนวน
3. ความเครียดสนามไฟฟ้า และความหนาแน่นของกระแสรั่วไหลมีค่าสูงบริเวณส่วนปลายของชั้นมลภาวะ เป็นตำแหน่งเริ่มเกิดโคโรนาดีสชาร์จ ที่จะนำไปสู่การเกิดวาบไฟตามผิว และการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยฉนวน
4. เนื่องจากความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดมีความสอดคล้องกับปริมาณของกระแสรั่วไหล จึงสามารถใช้การตรวจวัดกระแสรั่วไหลเป็นการประเมินเบื้องต้นสำหรับการทำความสะอาดหรือซ่อมบำรุงลูกถ้วยฉนวน เช่น กำหนดแผนงานฉีดล้างลูกถ้วยไฟฟ้าในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคให้สอดคล้องกับสภาพลักษณะภูมิประเทศที่นำลูกถ้วยฉนวนไปใช้งาน โดยเฉพาะพื้นที่ริมชายฝั่งทะเลซึ่งมีปริมาณ และระดับความรุนแรงของมลภาวะสูง เพื่อลดจำนวนการเกิดกระแสไฟฟ้าขัดข้อง สร้างความมั่นใจให้กับผู้ใช้ไฟฟ้ามากขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ที่ได้ให้การสนับสนุนด้านข้อมูลในการทำวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] กมล พะเทพ. การศึกษาการแก้ปัญหาลูกถ้วยที่เปราะเนื่องในระบบสายส่งอากาศ 69 เควี. และ 115 เควี. ของการไฟฟ้านครหลวง. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2553.
- [2] อุดมศักดิ์ มัลลียงค์ และ วินัย พฤษะวัน, “การศึกษาค่าความเปราะเนื่องของลูกถ้วยฉนวนที่ก่อให้เกิดวาทไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าในระบบจำหน่ายสายเปลือย,” วิศวกรรมสาร มก., ฉ. 73 (สิงหาคม-ตุลาคม 2553): 49-53.
- [3] กองวิศวกรรมไฟฟ้า และเครื่องกล. ฝ่ายวิศวกรรม. แบบมาตรฐานและข้อกำหนดทางเทคนิค (Specification) การประกอบคอนแทกกรูปร่างน้ำกับเสาคอนกรีต 22 kV และ 33 kV. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.
- [4] สำรวย สังข์สะอาด. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. พิมพ์ครั้งที่ 3 กรุงเทพมหานคร: คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, มีนาคม 2549.
- [5] E. Jayaprakash and S. Vaideki, “Analysis of Electric Field on Insulator for Different Pollution Condition,” Asian Journal of Applied Science and Technology (AJAST) Volume1, Issue 3, Page 125-129, April 2017.
- [6] E. Akbari, M. Mirzanie, A. Rahimnejad and M.B. Asadpoor, “Finite element analysis of disc insulator type and corona ring effect on electric field distribution over 230 kV insulator strings,” presented at International Journal of Engineering and Technology, Babol, Iran, April 1, 2012.
- [7] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, ลูกถ้วยฉนวน: พอร์ซเลนมาตรฐานเลขที่ 345-2528, หน้า 4.
- [8] IEC/ TS 60815- 1 Technical Specification. Edition 1.0, 2008-10.