

# แฟคเตอร์สนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดชนิดปลายแหลม-ระนาบในฉนวนน้ำมันหม้อแปลง

## Field Utilization Factor of Rod-Plane Gap Electrode in Transformer Oil Insulation

ธนากร น้ำหอมจันทร์\* อติกร เสรีพัฒน์นนท์ พงษ์สวัสดิ์ ศชภูมิ  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย  
เลขที่ 200 ถนนรังสิต-นครนายก รัชฎบุรี ปทุมธานี 12110  
โทร 0-2577-1028 ต่อ 452 โทรสาร 0-2577-1023 E-mail: thanakorn@eau.ac.th\*

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการวิเคราะห์หาค่าแฟคเตอร์สนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดชนิดปลายแหลม-ระนาบ ในฉนวนน้ำมันหม้อแปลง ที่ระยะแกป 1-3 มิลลิเมตร อิเล็กโทรดปลายแหลมที่ใช้ในการทดสอบมีมุม 30, 60, 90, 120 และ 150 องศา ตามลำดับ ทำการทดสอบหาค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนด้วยแรงดันสูงกระแสสลับตามมาตรฐาน IEC 60060-1, IEC 60060-2 กระบวนการทดสอบฉนวนเหลวตามมาตรฐาน IEC 60156 และใช้โปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ในการจำลองหาความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดระหว่างอิเล็กโทรดขณะเกิดเบรกดาวน โดยมีผลการวิเคราะห์ค่าแฟคเตอร์สนามไฟฟ้า ดังนี้ อิเล็กโทรดปลายแหลมที่มีมุมน้อยกว่าหรือเท่ากับ 90 องศา ที่ระยะแกป 1-3 มิลลิเมตร ค่าแฟคเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่าประมาณ 0.64-0.72 โดยแสดงถึงลักษณะสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูง สำหรับ อิเล็กโทรดที่มุมปลายแหลมมากกว่า 90 องศา ในระยะแกป 1-3 มิลลิเมตร ค่าแฟคเตอร์สนามไฟฟ้าจะค่าประมาณ 0.68-0.87 โดยแสดงถึงลักษณะสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากมุมของอิเล็กโทรดที่มีลักษณะใกล้เคียงกับระนาบ ผลจากการวิเคราะห์สามารถนำไปใช้ในการออกแบบวัสดุฉนวนสำหรับ

อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูงได้อย่างเหมาะสมต่อไปในอนาคต

**คำสำคัญ :** สนามไฟฟ้า, สนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูง, แฟคเตอร์สนามไฟฟ้า, ฉนวนน้ำมันหม้อแปลง

### Abstract

This paper presents the field utilization factor analysis results of rod-plane gap electrode at 1-3 millimeters gap distance in transformer oil insulation. The rod electrodes used in the experiments have the setting angles of 30, 60, 90, 120 and 150 degrees respectively. The experiments use AC high voltage test according IEC 60060-1, IEC 60060-2 and IEC 60156 standards. The maximum value of electric field strength between electrodes when breakdown occurs is simulated by finite element method program. The analysis results of field utilization factor exhibit thus: for electrodes angle less than or equal to 90 degrees at 1-3 millimeters gap distance the field utilization

factors are between 0.64-0.72 that shows the highly nonuniform field, for electrodes angle more than 90 degrees at 1-3 millimeters gap distance the field utilization factors are between 0.68-0.87 that shows the slight nonuniform field that is the effect of the electrodes angle is nearly a plane. This analysis results can be utilized to design the insulator material of high voltage electric equipment that has highly nonuniform field characteristic more adequately in the future.

**Keyword :** electric field, highly nonuniform field, field utilization factor, transformer insulation

## 1. บทนำ

ในการออกแบบวัสดุฉนวนสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง จะต้องคำนึงถึงความคงทนของการฉนวนทางไฟฟ้า ซึ่งหมายถึงค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $E_{max}$ ) ที่ฉนวนนั้นสามารถทนอยู่ได้ โดยไม่เกิดความเสียหายหรือเกิดเบรกดาวน [1-3] คำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$E_{max} = \frac{U}{d \times \eta^*} \quad (1)$$

โดยที่  $E_{max}$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (kV/mm)

$U$  คือ แรงดันไฟฟ้า (kV)

$d$  คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (mm)

$\eta^*$  คือ แฟคเตอร์สนามไฟฟ้า

จากสมการที่ (1) ค่าแรงดันเบรกดาวนจะสัมพันธ์กับลักษณะสนามไฟฟ้าว่าเป็นแบบใด โดย

กำหนดด้วยค่า แฟคเตอร์สนามไฟฟ้า (field utilization factor;  $\eta^*$ ) ค่า แฟคเตอร์สำหรับสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยนั้นสามารถคำนวณหาได้ง่าย แต่สำหรับค่าแฟคเตอร์สนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูงส่วนใหญ่จะใช้ค่าโดยประมาณ [1-3] หากประมาณค่าต่ำกว่าความเป็นจริงแล้วอาจส่งผลกระทบต่อฉนวนที่ได้ออกแบบ และในทางตรงกันข้ามถ้าประมาณค่าสูงกว่าความเป็นจริงแล้วจะส่งผลกระทบต่อขนาดและราคาของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ออกแบบ

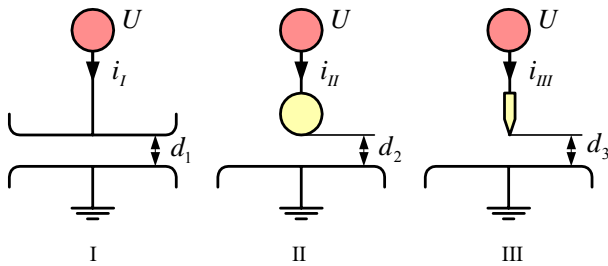
จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นในการศึกษาผลของ ประเภทของแรงดัน สภาวะแวดล้อม และรูปลักษณะของอิเล็กโทรด [4-5] จึงมีแนวคิดที่จะทดสอบหาค่าแฟคเตอร์สนามไฟฟ้าสำหรับสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูง โดยใช้อิเล็กโทรดปลายแหลม-ระนาบ ในฉนวนน้ำมันหม้อแปลงที่ระยะแคบ 1-3 มิลลิเมตร อิเล็กโทรดปลายแหลมที่ใช้ในการทดสอบมีมุม 30, 60, 90, 120 และ 150 องศาตามลำดับ เพื่อให้ทราบค่าแฟคเตอร์สนามไฟฟ้าสำหรับสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูงที่แน่นอนสำหรับการออกแบบวัสดุฉนวนสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่มีขนาดและราคาที่เหมาะสมต่อไปในอนาคต

## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้า [1-3]

ลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้าโดยทั่วไป แบ่งออกได้ 2 ชนิด คือ สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ และสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ชนิดไม่สม่ำเสมอแบ่งเป็น 2 แบบ คือ แบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย และแบบไม่

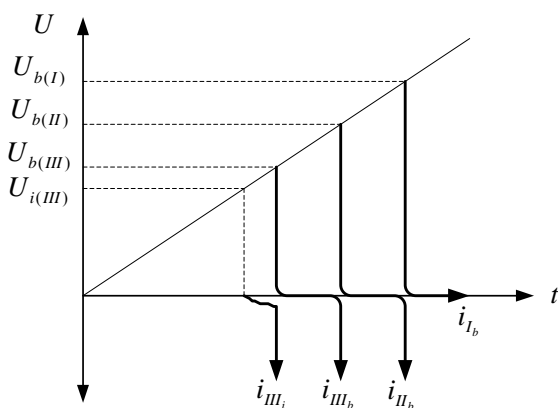
สมำเสมอสูง สนามไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับรูปลักษณะของ อิเล็กโตรด ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 อิเล็กโตรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ

- I : uniform field
- II : slightly nonuniform field
- III : highly nonuniform field

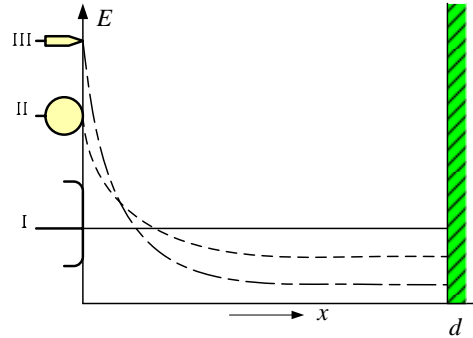
ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของวัสดุฉนวน ส่วนใหญ่จะเป็นค่าทางสถิติหรือเป็นค่าโดยประมาณ มักจะกำหนดด้วยค่าความเครียดสนามไฟฟ้าแรงสูงสุด  $E_{max}$  ที่เกิดขึ้น ณ จุดใดจุดหนึ่งระหว่างอิเล็กโตรด ในขณะที่ เบรกดาวนเริ่มเกิดขึ้น กราฟแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวนใน ไดอิเล็กตริกตามลักษณะ สนามไฟฟ้า ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวนในไดอิเล็กตริกตาม ลักษณะทางไฟฟ้า

ในกรณีสนามไฟฟ้าไม่สมำเสมอ ความเครียด สนามไฟฟ้าสูงสุดจะอยู่ในบริเวณผิวอิเล็กโตรดที่มี

พื้นผิวน้อยที่สุด เมื่อระยะห่างออกไปจากผิว อิเล็กโตรด ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็ว ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 เปรียบเทียบการกระจายสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรด ลักษณะต่างๆ

## 2.2 ผลของลักษณะสนามไฟฟ้าต่อการเกิด เบรกดาวน [1-3]

ในกรณีอิเล็กโตรดเป็นแบบสมำเสมอ หรือไม่ สมำเสมอเล็กน้อย (แฟคเตอร์สนามไฟฟ้า  $\eta^*$  มีค่าสูง) แรงดันเริ่มต้นที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในช่วงแก บริเวณอิเล็กโตรด จะเป็นเบรกดาวนโดยตรง โดยไม่มีโคโรนาเกิดขึ้นก่อน เบรกดาวน แต่ในกรณีที่ อิเล็กโตรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สมำเสมอสูง (ค่า แฟคเตอร์  $\eta^*$  มีค่าต่ำ) ค่าแรงดันเบรกดาวน  $U_b$  มีค่า สูงกว่าแรงดันเริ่มต้น  $U_i$  คือ เมื่อได้เงื่อนไขของแรงดัน เริ่มต้นเปลี่ยนแปลง จะไม่เกิดเบรกดาวนแต่จะเริ่มเกิด โคโรนา ถ้าจะให้เบรกดาวนจะต้องเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้น อีก ค่าแรงดันเริ่มต้นอาจเขียนได้ดังสมการที่ (2)

$$U_i = E_i \times d \times \eta^* \quad (2)$$

โดยที่  $U_i$  คือ แรงดันเริ่มต้น

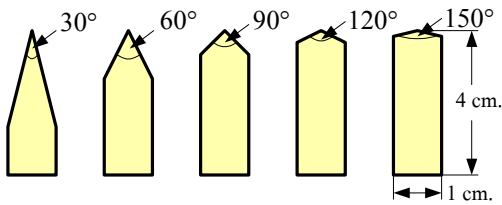
$E_i$  คือ  $E_{max}$  จากแรงดันเริ่มต้น  $U_i$

ในกรณีที่ใช้อิเล็กทรอนิกส์นามไฟฟ้าสม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ค่า  $U_1$  ก็คือ  $U_0$  และ  $E_1$  ก็คือ  $E_0$  ถ้าเป็นอิเล็กทรอนิกส์นามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง  $U_0 > U_1$

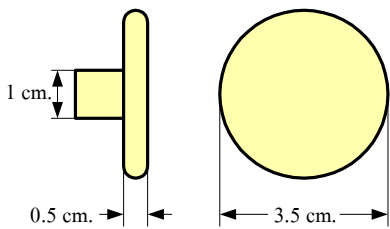
### 3. การทดสอบ

#### 3.1 อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการทดสอบ

การทดสอบจะใช้อิเล็กทรอนิกส์ชนิดปลายแหลมระนาบ ในฉนวนน้ำมันหม้อแปลงที่ระยะแกป 1-3 มิลลิเมตร อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้จะกลิ้งขึ้นรูปจากทองเหลือง โดยมีมุม 30, 60, 90, 120 และ 150 องศา ตามลำดับ ขนาดของอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4 และ 5



รูปที่ 4 ขนาดของอิเล็กทรอนิกส์ปลายแหลมที่ใช้ในการทดสอบ

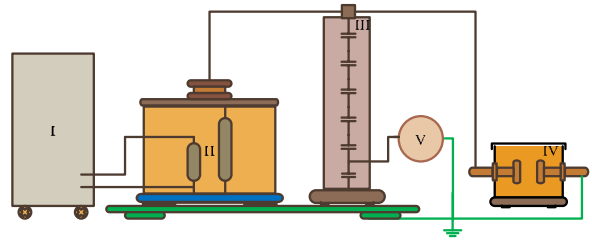


รูปที่ 5 ขนาดของอิเล็กทรอนิกส์ระนาบที่ใช้ในการทดสอบ

#### 3.2 วงจรทดสอบ

ในการทดสอบจะทำการทดสอบหาค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ด้วยแรงดันสูงกระแสลับ เพื่อหาค่าเฉลี่ย  $U_0$  จากการทดสอบจำนวน 10 ครั้ง วงจรการทดสอบและการวัดจะเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60060-1 [6], IEC 60060-2 [7] และกระบวนการ

ทดสอบฉนวนเหลวตามมาตรฐาน IEC 60156 [8] กำหนด โดยมีการจัดวางอุปกรณ์การทดสอบ ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 วงจรที่ใช้ในการทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์

โดยที่

I : ชุดควบคุมแรงดัน

II : หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงพิกัด 220V/20kV, 5kVA

III : โวลเตจดีไวเดอร์ขนาดพิกัด 150 kV อัตราส่วน 1111:1

IV : ชุดทดสอบ

V : ดิจิตอลมัลติมิเตอร์

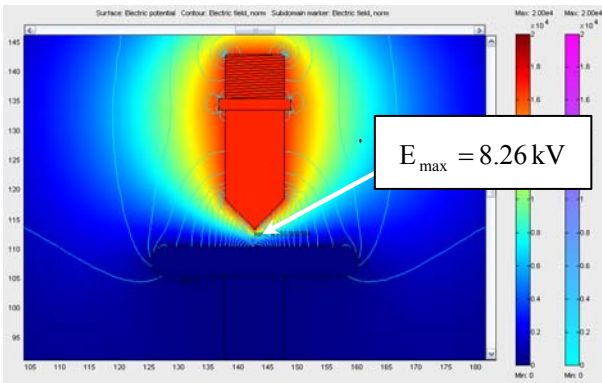
#### 3.3 การจำลองการกระจายสนามไฟฟ้า

การวิเคราะห์หาค่าแพคเตอร์สนามไฟฟ้า จำเป็นจะต้องทราบค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (FEM) มาช่วยในการวิเคราะห์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้า [3] ในการจำลองจะวิเคราะห์แบบ 2 มิติและไม่คำนึงถึงผลของประจุตกค้าง บนโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองหาค่า  $E_{max}$

| Electric Potential | Relative Permittivity ( $\epsilon_r$ ) |                 |
|--------------------|--|-----------------|
|                    | Electrode                              | Transformer Oil |
| $U_b$              | 1                                      | 2.2             |

ตัวอย่างผลการจำลองหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ตัวอย่างผลการจำลองหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดของอิเล็กโทรดมุม  $90^\circ$  ระยะแคบ 3 มิลลิเมตร

#### 4. ผลการทดสอบ

ค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนเฉลี่ย  $U_b$  และผลการจำลองหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด  $E_{max}$  ของอิเล็กโทรดปลายแหลม-ระนาบ ที่มุมของอิเล็กโทรดขนาด 30, 60, 90, 120 และ 150 องศา ตามลำดับ ในฉนวนน้ำมันหม้อแปลงที่ระยะแคบ 1-3 มิลลิเมตร แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวนและผลการจำลองหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเปรียบเทียบกับระยะแคบ

| Electrode Angle | 1 mm       |                   | 2 mm       |                   | 3 mm       |                   |
|-----------------|------------|-------------------|------------|-------------------|------------|-------------------|
|                 | $U_b$ (kV) | $E_{max}$ (kV/mm) | $U_b$ (kV) | $E_{max}$ (kV/mm) | $U_b$ (kV) | $E_{max}$ (kV/mm) |
| $30^\circ$      | 6.78       | 11.95             | 10.96      | 8.22              | 12.92      | 6.67              |
| $60^\circ$      | 11.82      | 16.43             | 14.37      | 10.35             | 15.74      | 7.71              |
| $90^\circ$      | 12.30      | 17.10             | 16.13      | 11.02             | 16.79      | 8.26              |
| $120^\circ$     | 13.36      | 17.36             | 15.17      | 9.89              | 16.58      | 7.27              |
| $150^\circ$     | 7.65       | 8.80              | 9.53       | 5.65              | 16.33      | 6.50              |

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์หาค่าแฟคเตอร์สนามไฟฟ้า  $\eta'$  ของอิเล็กโทรดปลายแหลม-ระนาบ เปรียบเทียบกับระยะแคบ

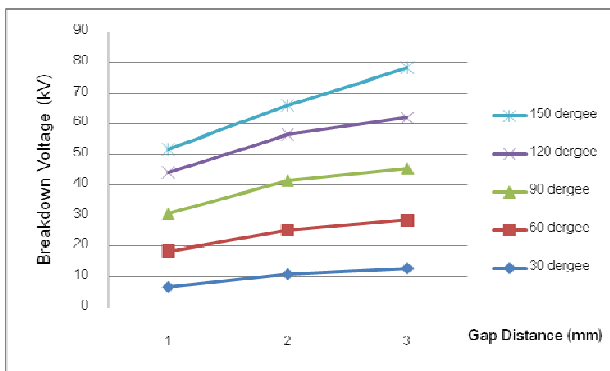
| Electrode Angle | 1 mm | 2 mm | 3 mm |
|-----------------|------|------|------|
| $30^\circ$      | 0.64 | 0.66 | 0.64 |
| $60^\circ$      | 0.72 | 0.69 | 0.68 |
| $90^\circ$      | 0.72 | 0.73 | 0.68 |
| $120^\circ$     | 0.77 | 0.76 | 0.76 |
| $150^\circ$     | 0.87 | 0.84 | 0.84 |

จากตารางที่ 2 ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์เฉลี่ยและผลการจำลองหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด จะสามารถวิเคราะห์หาค่าแฟคเตอร์สนามไฟฟ้าได้จากสมการที่ (1) และ (2) ฉะนั้น

$$\eta^* = \frac{U}{d \times E_{\max}} \quad (3)$$

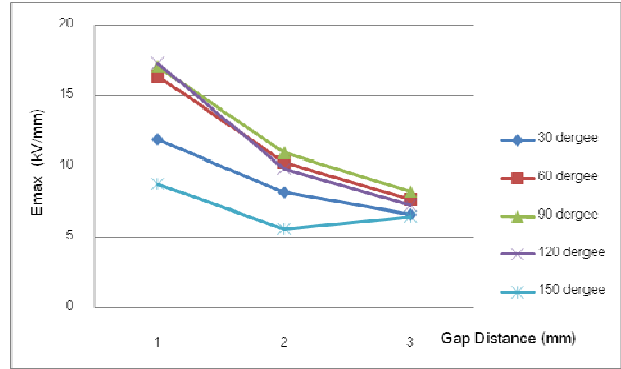
ผลการวิเคราะห์หาค่าแฟคเตอร์สนามไฟฟ้า  $\eta^*$  แสดงตารางที่ 3

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ต่อมุมปลายแหลมของอิเล็กโทรดและระยะแกป ดังรูปที่ 8



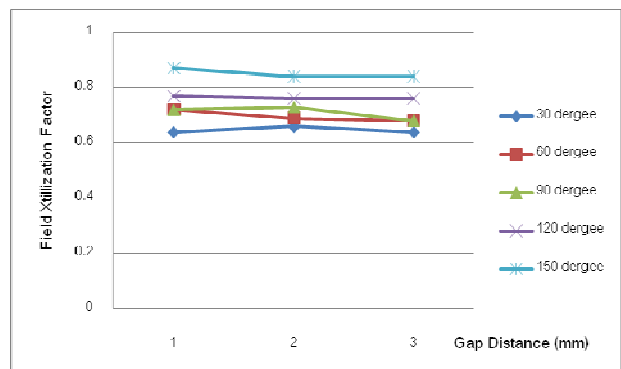
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ต่อมุมปลายแหลมของอิเล็กโทรดและระยะแกป

ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดต่อมุมปลายแหลมของอิเล็กโทรดและระยะแกป ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดต่อมุมปลายแหลมของอิเล็กโทรดและระยะแกป

จากผลการวิเคราะห์หาค่าแฟคเตอร์สนามไฟฟ้า  $\eta^*$  ของอิเล็กโทรดปลายแหลม-ระนาบเปรียบเทียบกับระยะแกป ดังตารางที่ 3 จะสามารถแสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ของแฟคเตอร์สนามไฟฟ้า มุมของอิเล็กโทรดและระยะแกปได้ ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ของแฟคเตอร์สนามไฟฟ้า มุมของอิเล็กโทรดและระยะแกป

จากรูปที่ 10 จะพบว่า อิเล็กโทรดที่มีมุมมากกว่า 90 องศา ในระยะแกป 1-3 มิลลิเมตร ค่าแฟคเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่าประมาณ 0.68 - 0.87 โดยแสดงถึงลักษณะสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากมุมของอิเล็กโทรดที่มีลักษณะใกล้เคียงกับระนาบ สำหรับอิเล็กโทรดปลาย

แหลมที่มีมุมน้อยกว่าหรือเท่ากับ 90 องศา ที่ระยะ  
แก๊ป 1-3 มิลลิเมตร ค่าแฟคเตอร์สนามไฟฟ้ามี  
ค่าประมาณ 0.64 - 0.72 โดยแสดงถึงลักษณะ  
สนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูงกว่าอิเล็กโตรดข้างต้น  
ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้จะมีแนวโน้มไปในทิศทาง  
เดียวกับในฉนวนอากาศ [9]

## 5. การวิเคราะห์สรุปผลและข้อเสนอแนะ

การวิเคราะห์หาค่าแฟคเตอร์สนามไฟฟ้าของ  
อิเล็กโตรดปลายแหลม-ระนาบ ในฉนวนน้ำมันหม้อ  
แปลง ที่มีมุมปลายแหลมของอิเล็กโตรดขนาด 30, 60,  
90, 120 และ 150 องศา ระยะแก๊ป 1-3 มิลลิเมตร  
โดยทำการทดสอบหาแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ด้วย  
แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับตามมาตรฐาน IEC 60060-1,  
IEC 60060-2 และกระบวนการทดสอบฉนวนเหลว  
ตามมาตรฐาน IEC 60156 กำหนด จำลองการ  
กระจายสนามไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์  
(FEM) บนโปรแกรมสำเร็จรูป

ผลการวิเคราะห์ค่าแฟคเตอร์สนามไฟฟ้ามี  
ดังนี้ อิเล็กโตรดที่มีมุมมากกว่า 90 องศา ในระยะแก๊ป  
1-3 มิลลิเมตร ค่าแฟคเตอร์สนามไฟฟ้าจะ  
ค่าประมาณ 0.68-0.87 โดยแสดงถึงลักษณะ  
สนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลมา  
จากมุมของอิเล็กโตรดที่มีลักษณะใกล้เคียงกับระนาบ  
สำหรับอิเล็กโตรดที่มีมุมน้อยกว่าหรือเท่ากับ 90 องศา  
ที่ระยะแก๊ป 1-3 มิลลิเมตร ค่าแฟคเตอร์สนามไฟฟ้ามี  
ค่าประมาณ 0.64 - 0.72 โดยแสดงถึงลักษณะ  
สนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูงกว่าอิเล็กโตรดข้างต้น  
ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้จะมีแนวโน้มไปในทิศทาง

เดียวกับค่า แฟคเตอร์สนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรด  
ปลายแหลม-ระนาบในฉนวนอากาศ [9]

ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะสามารถนำไปช่วยใน  
การออกแบบวัสดุฉนวนสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่  
มีอิเล็กโตรดลักษณะสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูง  
หรืออิเล็กโตรดแบบปลายแหลม-ระนาบได้อย่าง  
เหมาะสมต่อไปในอนาคต

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล, “เอกสารประกอบการสอน  
วิศวกรรม  
ไฟฟ้าแรงสูงขั้นสูง”, สถาบันเทคโนโลยีพระ  
จอมเกล้า  
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2546.
- [2] ส้ารวัย สังข์สะอาด, “วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง”,  
ภาควิชา  
วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์,  
จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย, 2549.
- [3] E. Kuffel, W.S. Zaengl, and J. Kuffel, “High  
Voltage  
Engineering Fundamentals”, 2<sup>nd</sup> edition,  
Butterworth – Heinemann, 2000
- [4] S. Kanchana, S. Chotigo and B. Pungsiri,  
“Atmospheric Factor under the Negative  
Impulse Voltages on Various Test Gaps”,  
Proceedings of ECTI-CON 2008, pp. 917-  
920.
- [5] S. Phontusa S. Chotigo, “Comparison of DC  
Breakdown Voltage between Multiple level

test and Successive discharge test Methods”, Proceedings of ECTI-CON 2008, pp. 913-916

[6] IEC Publication 60060-1, “High-voltage Test Techniques, Part 1: General definitions and test requirements”, Geneva, 1989.

[7] IEC Publication 60060-2, “High-voltage Test Techniques, Part 2: Measuring Systems”, Geneva, 1994.

[8] IEC Publication 60156, “Insulating liquid determination of the breakdown voltage at power frequency”, Geneva, 1995.

[9] ฤทธิเดช เกาะหวาย และคณะ, “แฟคเตอร์สนามไฟฟ้าของอิเล็คโตรดชนิดปลายแหลม-ระนาบในฉนวนอากาศ”, การประชุมวิชาการ และแสดงผลงานทางวิชาการ พระจอมเกล้าลาดกระบัง ประจำปี 2552, หน้า 96-102.