



## ความสัมพันธ์ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาว์นที่มีต่อระยะช่องว่างของอิเล็กโตรดแบบต่าง ๆ และการตรวจสอบความเสียหายพื้นผิววัสดุภายหลังการเกิดเบรกดาว์นด้วย SEM

อุไรรัตน์ เพ็องสูงเนิน\*

นักศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วินัย พุกกะวัน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

\* ผู้มีพันธบัตรประชาชน โทรศัพท์ 08-5802-3454 อีเมล: urairattf@hotmail.com

รับเมื่อ 13 กุมภาพันธ์ 2558 ตอรับเมื่อ 20 เมษายน 2558 เผยแพร่ออนไลน์ 12 มิถุนายน 2558

DOI: 10.14416/j.kmutnb.2015.04.004 © 2015 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยต้องการนำเสนอการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาว์นของอากาศด้วยอิเล็กโตรดแบบต่าง ๆ โดยได้ออกแบบและสร้างชุดทดลองอิเล็กโตรด 4 แบบคือ อิเล็กโตรดแบบปลายแหลม อิเล็กโตรดแบบเข็ม อิเล็กโตรดแบบทรงกลม และอิเล็กโตรดแบบครึ่งทรงกลม สามารถสรุปได้ว่าค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาว์นที่เกิดขึ้นในอิเล็กโตรดแบบครึ่งทรงกลม มีค่ามากที่สุด รองลงมาคืออิเล็กโตรดแบบทรงกลม อิเล็กโตรดแบบเข็ม และอิเล็กโตรดแบบปลายแหลม ตามลำดับ และเมื่อปรับเพิ่มระยะห่างของอิเล็กโตรดเพิ่มขึ้น ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาว์นที่เกิดขึ้นที่วัดค่าได้ก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน แสดงให้เห็นว่าค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาว์นแปรผันไปตามระยะห่างของอิเล็กโตรด และเมื่อนำอิเล็กโตรดแบบเข็ม ภายหลังการทดลองการเกิดแรงดันไฟฟ้าเบรกดาว์นมาตรวจสอบและวิเคราะห์สภาพความเสียหายบนพื้นผิวอิเล็กโตรดด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดทำให้ทราบว่าเมื่อปรับเพิ่มระยะห่างของอิเล็กโตรดเพิ่มขึ้น และการเกิดแรงดันไฟฟ้าเบรกดาว์นที่เพิ่มขึ้นตามระยะห่างของอิเล็กโตรดจะส่งผลกระทบต่อพื้นที่หน้าตัดของเส้นผ่านศูนย์กลางของความแหลมคมของอิเล็กโตรดมีค่าเพิ่มมากขึ้น แสดงว่าพื้นที่หน้าตัดของเส้นผ่านศูนย์กลางของความแหลมคมของอิเล็กโตรดแปรผันโดยตรงกับการปรับระยะห่างของอิเล็กโตรดและค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาว์นที่เกิดขึ้น และลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวอิเล็กโตรดแบบเข็มมีลักษณะพื้นผิวขรุขระ ไม่เรียบ มีรอยแตก และมีหลุมลึก เกิดความเสียหาย

**คำสำคัญ:** ดิสชาร์จบางส่วน แรงดันไฟฟ้าเบรกดาว์น กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

การอ้างอิงบทความ: อุไรรัตน์ เพ็องสูงเนิน และ วินัย พุกกะวัน, “ความสัมพันธ์ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาว์นที่มีต่อระยะช่องว่างของอิเล็กโตรดแบบต่าง ๆ และการตรวจสอบความเสียหายพื้นผิววัสดุภายหลังการเกิดเบรกดาว์นด้วย SEM,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 25, ฉบับที่ 3, หน้า 371-379, ก.ย.-ธ.ค. 2558. <http://dx.doi.org/10.14416/j.kmutnb.2015.04.004>



## **Relationship of the Breakdown Voltage to the Gap Distance between Different Types of Electrodes and Examination of the Surface Damage after the Breakdown Using SEM**

**Urairat Fuangsoongnern\***

*Student, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, Thailand*

**Winai Plueksawan**

*Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, Thailand*

\* Corresponding Author, Tel. 08-5802-3454, E-mail: urairatf@hotmail.com

Received 13 February 2015; Accepted 20 April 2015; Published online: 12 June 2015

DOI: 10.14416/j.kmutnb.2015.04.004 © 2015 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### **Abstract**

The measurement of air breakdown voltage in different types of electrodes was presented. Four experimental kits for different electrodes were made. They were Rod, Needle, Spherical and Partial Spherical electrodes. The results showed that the highest breakdown voltage occurred in a Hemi Spherical electrode, followed by Spherical electrode, Needle electrode and Rod electrode, respectively. In addition, the breakdown voltage was directly proportional to the air gap. When the air gap was greater, the breakdown voltage was higher. When examining the surface damage of the Needle electrode after breakdown voltage using scanning electron microscope (SEM), it was found that the cross-sectional area of electrode's sharpness diameter was directly proportional to the air gap and the breakdown voltage. When the air gap was greater and the breakdown voltage was higher, the cross-sectional area was greater. The physical characteristics of the surface of the Needle electrode were damaged and rough with cracks and deep holes.

**Keywords:** Partial Discharge, Breakdown Voltage, Scanning Electron Microscope (SEM)

Please cite this article as: U. Fuangsoongnern and W. Plueksawan, "Relationship of the Breakdown Voltage to the Gap Distance between Different Types of Electrodes and Examination of the Surface Damage after the Breakdown Using SEM," *J. KMUTNB*, Vol. 25, No. 3, pp. 371-379, Sep.-Dec. 2015 (in Thai). <http://dx.doi.org/10.14416/j.kmutnb.2015.04.004>

## 1. บทนำ

ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าที่ดีคือระบบที่เสถียร หรือมีความน่าเชื่อถือ สิ่งหนึ่งที่ทำให้ระบบมีความเสถียรภาพ และมีความน่าเชื่อถือสูงนั้นก็คือ ระบบนั้นจะต้องไม่เกิดการเบรกดาวน์ในอุปกรณ์ที่นำมาใช้งาน การเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนในขณะที่อุปกรณ์กำลังถูกใช้งานอยู่ เป็นสาเหตุที่สำคัญที่ทำให้อุปกรณ์นั้นๆ เกิดความเสียหาย และระบบที่ถูกเชื่อมต่อกับอุปกรณ์นั้นๆ ก็จะทำให้เกิดความเสียหายตามมาด้วยเช่นเดียวกัน ฉนวนเป็นสิ่งที่มีความสำคัญในการป้องกันการเกิดการเบรกดาวน์ ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้วิจัยการเกิดเบรกดาวน์เฉพาะฉนวนที่เป็นก๊าซเท่านั้น โดยฉนวนก๊าซที่ใช้คือ อากาศ [1], [2] ผู้วิจัยได้ออกแบบชุดอิเล็กโตรดเพื่อวัดค่าและวิเคราะห์การเกิดเบรกดาวน์อ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE Std. 4-1995, IEC 60060-1 และ IEC 60060-2 [3]-[5] ดังนี้ อิเล็กโตรดแบบปลายแหลม อิเล็กโตรดแบบเข็มอิเล็กโตรดแบบทรงกลม และอิเล็กโตรดแบบครึ่งทรงกลม ได้ออกแบบชุดการทดลองอ้างอิงตามมาตรฐานของ IEC 60060-1, IEC 60052 และ IEC 60156 [4], [6], [7] ซึ่งได้ตรวจสอบความเสียหายพื้นผิววัสดุอิเล็กโตรดภายหลังการเกิดแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ในอิเล็กโตรดแบบเข็ม ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

## 2. ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์

### 2.1 คุณสมบัติและลักษณะของฉนวนไฟฟ้า

ก๊าซเป็นฉนวนที่มีความสำคัญในด้านเทคนิคการฉนวนไฟฟ้าแรงสูง ใช้เป็นฉนวนหลัก งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ฉนวนก๊าซ ซึ่งก็คือ อากาศ เป็นฉนวนเพื่อทำการทดลองการหาค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ ซึ่งอากาศเป็นฉนวนที่นิยมเป็นอย่างมากในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าของประเทศ ข้อดีคือไม่มีค่าใช้จ่ายของฉนวน แต่ข้อเสียคืออาจมีผลกระทบจากความชื้น ความร้อนและอาจส่งผลกระทบต่อเกิดการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างอากาศกับตัวนำของอุปกรณ์ไฟฟ้า

## 2.2 ทฤษฎีการเกิดเบรกดาวน์

การเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซ คือ การเปลี่ยนสภาพการฉนวนไปสู่สภาพนำไฟฟ้า เป็นช่วงต่อระหว่างสถานะภาพที่กระแสไหลประทังตัวเองไม่ได้ไปสู่สถานะภาพที่กระแสไหลประทังตัวเองได้ ช่วงต่อดังกล่าว จะเกิดขึ้นได้เมื่อแก๊ปมีจำนวนอิเล็กตรอน หรือไอออนในอวาลานซ์มากพอจนทำให้แก๊ปมีสภาพนำไฟฟ้า และการเกิดเบรกดาวน์ในทางไฟฟ้าคือ การป้อนแรงดันไฟฟ้าที่ค่าๆ หนึ่งให้กับฉนวน ซึ่งมีค่าเกินความสามารถของฉนวนที่จะทนแรงดันไฟฟ้านั้นๆ หรือทนต่อสนามไฟฟ้านั้นได้ จึงจะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านฉนวนและเพิ่มขึ้นจนกระทั่งฉนวนนั้นๆ ทนไม่ไหวจึงเกิดการเบรกดาวน์ขึ้นในที่สุด [8], [9]

## 3. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

### 3.1 การออกแบบและสร้างชุดทดลองอิเล็กโตรด

ได้ทำการออกแบบและสร้างชุดอิเล็กโตรดเพื่อทำการทดลองวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ อ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60060-1, IEC 60052 และ IEC 60156 จำนวน 4 แบบคือ อิเล็กโตรดแบบปลายแหลม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.05 มิลลิเมตร อิเล็กโตรดแบบเข็ม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.044 มิลลิเมตร อิเล็กโตรดแบบทรงกลม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร และอิเล็กโตรดแบบครึ่งทรงกลม มีขนาดรัศมีมีความโค้ง 25 มิลลิเมตร [5], [7] โดยได้นำวัสดุตัวนำประเภทโลหะทองแดงมาใช้สร้างเป็นอิเล็กโตรด และในส่วนของอิเล็กโตรดแบบเข็ม-เข็ม วัสดุที่นำมาใช้เป็นเหล็กชุบโครเมียม แสดงดังรูปที่ 1

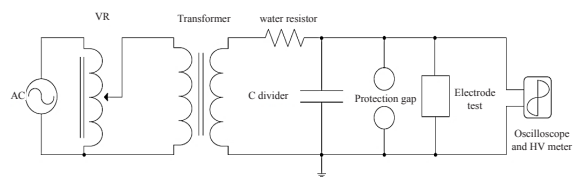
### 3.2 หลักพื้นฐานและวงจรที่ใช้สำหรับวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ในฉนวนอากาศ

วงจรไฟฟ้าที่นำมาใช้สำหรับการทดลองเพื่อวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ อ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE Std. 4-1995, IEC 60060-1 และ IEC 60060-2 ประกอบด้วยตัวจ่ายแรงดันสูงกระแสสลับ ที่ปรับค่าได้ (AC Voltage Source) เชื่อมต่อกับหม้อแปลงทดสอบขนาด 100 kV

<p>(ก) ชุดอิเล็กโตรดแบบปลายแหลม</p>	<p>(ข) โมเดลชุดอิเล็กโตรดแบบปลายแหลม</p>
<p>(ค) ชุดอิเล็กโตรดแบบเขັม</p>	<p>(ง) โมเดลชุดอิเล็กโตรดแบบเขັม</p>
<p>(จ) ชุดอิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ทรงกลม</p>	<p>(ฉ) โมเดลชุดอิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ทรงกลม</p>
<p>(ช) ชุดอิเล็กโตรดแบบครึ่งทรงกลม</p>	<p>(ซ) โมเดลชุดอิเล็กโตรดแบบครึ่งทรงกลม</p>

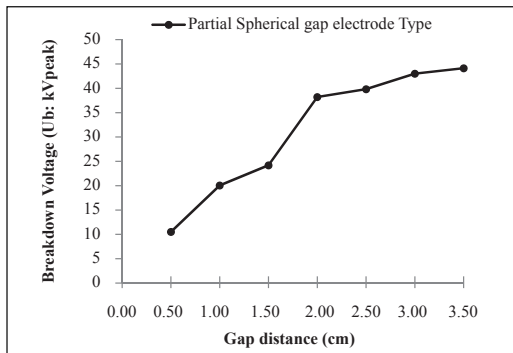
รูปที่ 1 ชุดทดลองอิเล็กโตรดทั้ง 4 แบบ

(Single-Phase AC Voltage Test Transformer) เพื่อป้องกันแรงดันให้กับอุปกรณ์ และนำความต้านทานน้ำ (Water Resistance) ขนาด 8.31 GOhm เชื่อมต่อกับหม้อแปลงทดสอบกับอุปกรณ์โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุวัดแรงดันกระแสสลับขนาด 100 pF เพื่อจำกัดกระแสไม่ให้เกิดเกินกว่าพิกัดที่หม้อแปลงกำหนด และเชื่อมต่อกับแกปป้องกันทรงกลม (Gap Distance Gauge Size 0.01–10 cm.) ซึ่งทำหน้าที่ป้องกันแรงดันเกินพิกัดของหม้อแปลง และนำชุดทดลองอิเล็กโตรดทั้ง 4 แบบ ที่ประกอบด้วยอิเล็กโตรดแบบปลายแหลม อิเล็กโตรดแบบเขັม อิเล็กโตรดแบบทรงกลม และอิเล็กโตรดแบบครึ่งทรงกลม มาเชื่อมต่อ

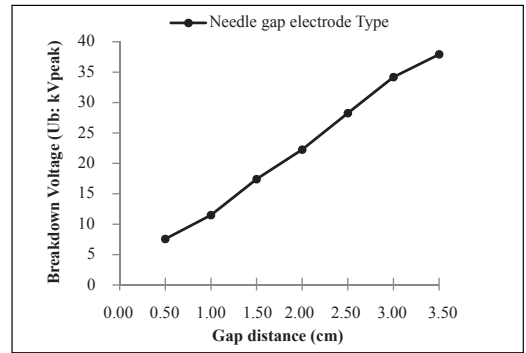


รูปที่ 2 วงจรสำหรับนำมาใช้ในการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนของอิเล็กโตรด

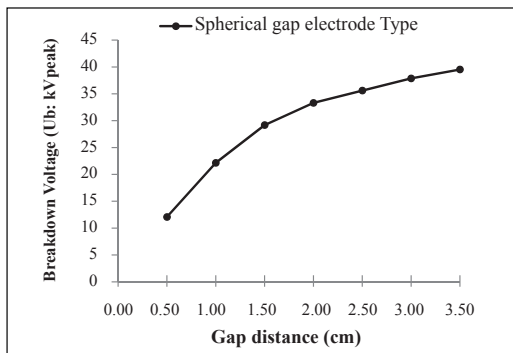
กับแกปป้องกันทรงกลม และนำเครื่องมือวัดแรงสูงมาเชื่อมต่อกับชุดทดลองอิเล็กโตรดเพื่ออ่านค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน [5], [8], [9] แสดงดังรูปที่ 2



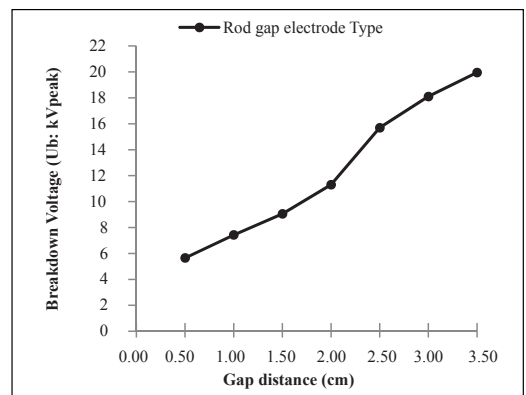
รูปที่ 3 ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาว์นของอิเล็กโตรดแบบครึ่งทรงกลม



รูปที่ 5 ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาว์นของอิเล็กโตรดแบบเข็ม



รูปที่ 4 ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาว์นของอิเล็กโตรดแบบทรงกลม



รูปที่ 6 ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาว์นของอิเล็กโตรดแบบปลายแหลม

#### 4. ผลการทดลอง

การทดลองวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาว์น เมื่อทำการปรับระยะห่างของอิเล็กโตรดที่ระยะ 0.50, 1.00, 1.50, 2.00, 2.50, 3.00, และ 3.50 เซนติเมตร ตามลำดับ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้ การวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาว์นในอิเล็กโตรดแบบปลายแหลมอิเล็กโตรดแบบเข็ม อิเล็กโตรดแบบทรงกลม และอิเล็กโตรดแบบครึ่งทรงกลม เมื่อทำการปรับระยะห่างของอิเล็กโตรดตามตารางที่ได้กำหนดไว้ สามารถแสดงให้เห็นได้ว่าเมื่อทำการปรับเพิ่มระยะความของอิเล็กโตรดในแต่ละแบบเพิ่มขึ้น ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาว์นที่เกิดขึ้นที่สามารถวัดค่าได้ ก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นว่าค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาว์นแปรผันโดยตรงกับ

การปรับระยะห่างของอิเล็กโตรด แสดงดังตารางที่ 1-4 และแสดงดังรูปที่ 3-6

ตารางที่ 1 ผลการทดลองการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาว์นของอิเล็กโตรดแบบครึ่งทรงกลม-ครึ่งทรงกลม

Gap Distance (cm)	Breakdown Voltage (Ub: kV peak)						
	1	2	3	4	5	6	AVG
No.							
0.5	10.60	11.00	10.30	9.85	10.65	10.65	10.51
1.0	20.30	20.15	19.70	19.80	20.25	20.15	20.06
1.5	24.15	24.10	24.10	24.25	24.25	24.30	24.19
2.0	38.20	38.45	37.90	38.30	38.35	38.10	38.22
2.5	40.15	40.05	40.00	40.05	39.40	39.30	39.83
3.0	42.55	42.90	43.10	43.15	43.25	43.15	43.02
3.5	44.95	43.90	44.60	43.50	44.05	43.75	44.13

**ตารางที่ 2** ผลการทดลองการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์  
อิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลม-ทรงกลม

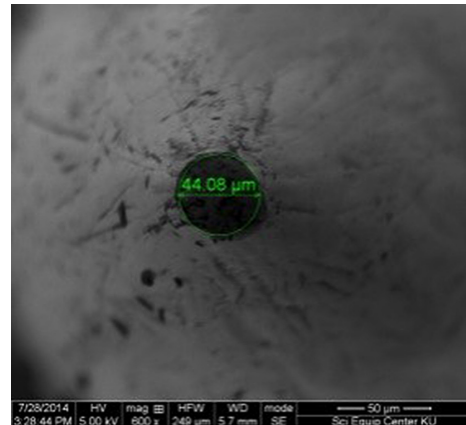
Gap Distance (cm)	Breakdown Voltage (Ub: kVpeak)						
	No.	1	2	3	4	5	6
0.5	11.50	11.65	12.35	12.30	12.35	12.30	12.08
1.0	22.30	22.75	22.30	21.75	21.95	21.85	22.15
1.5	28.90	29.15	28.70	29.40	29.45	29.45	29.18
2.0	33.15	33.15	33.15	33.75	32.85	33.80	33.31
2.5	35.20	35.75	35.45	36.00	35.95	35.25	35.60
3.0	37.80	37.55	38.05	37.65	38.00	38.15	37.87
3.5	39.50	39.60	39.55	39.50	39.50	39.50	39.53

**ตารางที่ 3** ผลการทดลองการวัดค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ของอิเล็กทรอนิกส์แบบเข็ม-เข็ม

Gap Distance (cm)	Breakdown Voltage (Ub: kVpeak)						
	No.	1	2	3	4	5	6
0.5	6.78	6.93	7.05	7.83	8.16	8.67	7.57
1.0	11.15	11.21	11.28	11.38	11.76	12.19	11.49
1.5	16.70	17.02	17.22	17.60	17.87	18.03	17.41
2.0	20.96	21.93	22.06	22.63	22.91	23.05	22.26
2.5	27.04	27.56	28.18	28.58	28.92	29.27	28.26
3.0	33.36	33.83	34.13	34.33	34.55	34.90	34.18
3.5	36.55	36.78	37.55	38.55	38.75	39.33	37.92

**ตารางที่ 4** ผลการทดลองการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ของอิเล็กทรอนิกส์แบบปลายแหลม-ปลายแหลม

Gap Distance (cm)	Breakdown Voltage (Ub: kVpeak)						
	No.	1	2	3	4	5	6
0.5	5.00	5.75	6.15	5.00	6.15	5.85	5.65
1.0	6.75	7.30	7.55	6.95	7.65	8.35	7.43
1.5	9.00	9.00	9.05	9.15	9.15	8.95	9.05
2.0	11.60	10.50	11.60	11.55	10.95	11.60	11.30
2.5	16.25	15.55	16.15	15.20	15.45	15.55	15.69
3.0	19.45	17.65	18.30	18.20	17.10	17.90	18.10
3.5	21.15	20.30	19.40	19.95	19.15	19.75	19.95



**รูปที่ 7** แสดงระยะเส้นผ่านศูนย์กลางของความแหลมคมของอิเล็กทรอนิกส์แบบเข็มที่ไม่ได้ผ่านการทดลองแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์

#### 4. การตรวจสอบสภาพความเสียหายบนพื้นผิววัสดุอิเล็กทรอนิกส์ของแข็งแบบเข็ม ด้วยกล้อง SEM

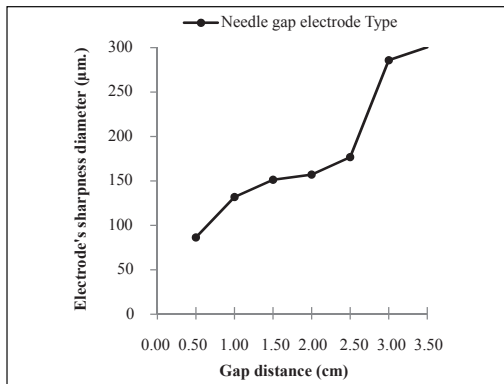
##### 4.1 วัสดุอิเล็กทรอนิกส์ของแข็งแบบเข็มที่ไม่ได้ผ่านการทดลองแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์

ทำการวัดระยะเส้นผ่านศูนย์กลางของความแหลมคมของอิเล็กทรอนิกส์ของแข็งแบบเข็มที่ไม่ได้ผ่านการทดลองแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ด้วยกล้อง SEM [10], [11] โดยได้นำอิเล็กทรอนิกส์ของแข็งแบบเข็มจำนวน 100 ตัวอย่าง มาทำการวัดระยะเส้นผ่านศูนย์กลางของความแหลมคม จากการวัดทำให้ทราบว่าค่าระยะเส้นผ่านศูนย์กลางของความแหลมคมที่มีขนาดเท่ากันจำนวน 42 ตัวอย่าง มีค่าเท่ากับ 44.08 ไมโครเมตร แสดงดังรูปที่ 7

##### 4.2 วัสดุอิเล็กทรอนิกส์ของแข็งแบบเข็ม-เข็ม ภายหลังจากการทดลองการเกิดแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์

ลักษณะทางกายภาพและขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของความแหลมคมของอิเล็กทรอนิกส์แบบเข็มที่ระยะห่างต่างๆ ตามที่กำหนดภายหลังจากการทดลองแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ แสดงดังตารางที่ 5 และแสดงดังรูปที่ 8-9

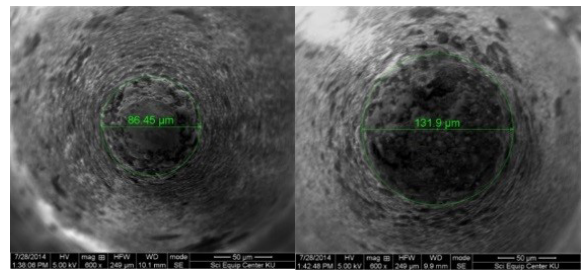




**รูปที่ 8** กราฟแสดงเส้นผ่านศูนย์กลางของความแหลมคมของอิเล็กโทรดโลหะของแข็งแบบเข็ม ภายหลังจากการทดลองแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน

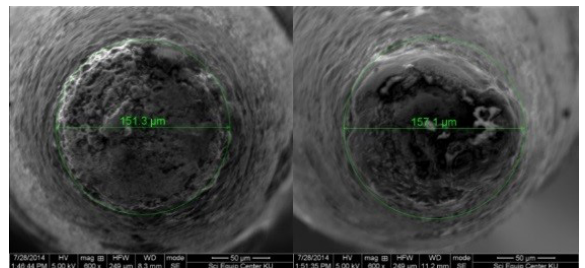
**ตารางที่ 5** ระยะเส้นผ่านศูนย์กลางของความแหลมคมของอิเล็กโทรดโลหะของแข็งแบบเข็ม-เข็ม

Gap Distance (cm)	Electrode's Sharpness Diameter (µm)
0.50	86.45
1.00	131.90
1.50	151.30
2.00	157.10
2.50	176.80
3.00	285.90
3.50	300.50



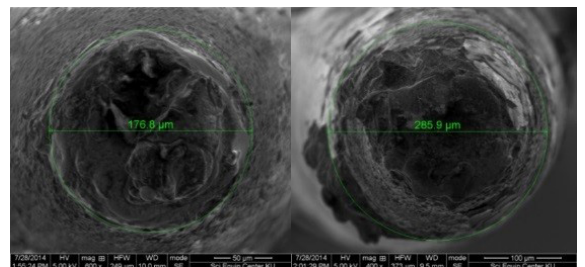
(ก) 0.50 เซนติเมตร

(ข) 1.00 เซนติเมตร



(ค) 1.50 เซนติเมตร

(ง) 2.00 เซนติเมตร

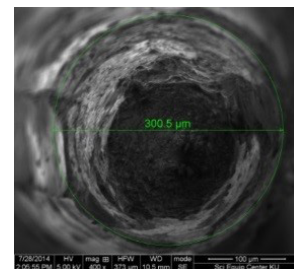


(จ) 2.50 เซนติเมตร

(ข) 3.00 เซนติเมตร

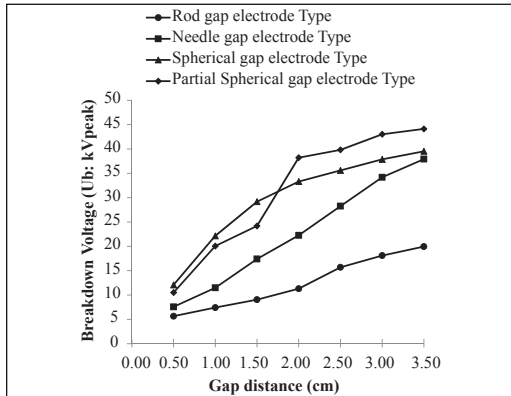
### 5. อภิปรายผลและสรุป

สำหรับการทดลองเพื่อวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนในอิเล็กโทรดทั้ง 4 แบบ ตามระเบียบวิธีที่มาตรฐานกำหนดสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้ จากการเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนของอิเล็กโทรดทั้ง 4 แบบที่ระยะห่างของอิเล็กโทรดที่ 0.50, 1.00, 1.50, 2.00, 2.50, 3.00 และ 3.50 เซนติเมตร ตามลำดับ ที่สภาวะบรรยากาศเดียวกัน ที่อุณหภูมิ 31 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ 760 มิลลิเมตรปรอท ความชื้น 70 เปอร์เซ็นต์ สามารถสรุปได้ว่าค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนที่เกิดขึ้นในอิเล็กโทรดแบบครึ่งทรงกลม ค่าแรงดันเบรกดาวนมีค่ามากที่สุดมี รองลงมาคืออิเล็กโทรดแบบทรงกลม



(จ) 3.00 เซนติเมตร

**รูปที่ 9** ลักษณะทางกายภาพและขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของความแหลมคมของอิเล็กโทรดแบบเข็ม



รูปที่ 10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ของอิเล็กโทรดทั้ง 4 แบบ

อิเล็กโทรดแบบเข็ม และอิเล็กโทรดแบบปลายแหลมตามลำดับ และทำให้สามารถทราบว่า เมื่อปรับเพิ่มระยะห่างของอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ที่เกิดขึ้นที่วัดค่าได้ก็จะมีความเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์แปรผันตามระยะห่างของอิเล็กโทรด แสดงดังรูปที่ 10

จากการทดลองเพื่อทำการตรวจสอบสภาพความเสียหายบนพื้นผิวอิเล็กโทรดโลหะของแข็งแบบเข็มด้วยกล้อง SEM ซึ่งได้ทำการทดลอง และการวิเคราะห์สภาพความเสียหายบนพื้นผิววัสดุอิเล็กโทรดโลหะของแข็งแบบเข็ม-เข็ม แบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ

กรณีที่ 1 ทำการตรวจสอบสภาพพื้นผิววัสดุในอิเล็กโทรดโลหะของแข็งแบบเข็ม ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน และที่ไม่ได้ผ่านการทดลองการเกิดแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์จากการตรวจสอบด้วยกล้อง SEM สามารถสรุปได้ว่าพื้นผิววัสดุของปลายเข็มที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน และยังไม่ได้ผ่านการทดลองการเกิดแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์เมื่อทำการวัดระยะเส้นผ่านศูนย์กลางของความแหลมคมของอิเล็กโทรดแบบเข็ม แล้วมีค่าเท่ากับ 44.08 ไมโครเมตร ซึ่งลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวอิเล็กโทรดแบบเข็มมีลักษณะพื้นผิวเรียบไม่ขรุขระ ซึ่งไม่มีรอยแตก หรือความเสียหาย เพียงแต่สภาพความแหลมคมยังมีค่า

ความไม่แน่นอน เนื่องจากตามหลักแล้วในขั้นตอนการผลิตอิเล็กโทรดแบบเข็ม ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของความแหลมคมควรมีค่าเท่าๆ กัน (คงที่) ซึ่งสิ่งที่ตรวจพบอาจมีสาเหตุจากกระบวนการผลิตที่มีความคลาดเคลื่อนจากโรงงานอุตสาหกรรมได้

กรณีที่ 2 ทำการตรวจสอบสภาพพื้นผิววัสดุอิเล็กโทรดโลหะของแข็งแบบเข็ม ภายหลังจากทดลองการเกิดแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ที่ระยะห่างของอิเล็กโทรดระยะ 0.50, 1.00, 1.50, 2.00, 2.50, 3.00 และ 3.50 เซนติเมตรตามลำดับ จากการตรวจสอบด้วยกล้อง SEM สามารถสรุปได้ว่าเมื่อปรับเพิ่มระยะห่างของอิเล็กโทรดแบบเข็มเพิ่มขึ้น และการเกิดแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ที่เพิ่มขึ้นตามระยะห่างของอิเล็กโทรดจะส่งผลกระทบต่อพื้นที่หน้าตัดของเส้นผ่านศูนย์กลางของความแหลมคมของอิเล็กโทรดแบบเข็มมีค่าเพิ่มมากขึ้น แสดงว่าพื้นที่หน้าตัดของเส้นผ่านศูนย์กลางของความแหลมคมของอิเล็กโทรดแปรผันตามระยะห่างของอิเล็กโทรดและค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ที่เกิดขึ้นด้วย และลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวอิเล็กโทรดแบบเข็มมีลักษณะพื้นผิวขรุขระไม่เรียบ มีรอยแตก และมีหลุมลึกเกิดขึ้น ซึ่งทำให้พื้นที่หน้าตัดของอิเล็กโทรดมีความเสียหาย

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] F. H. Kreuger, *Partial Discharge Detection in High Voltage Equipment*, Butterworths, London, 1964.
- [2] W. Plueksawan, P. Apiratikul, and U. Fuangsoongnem, "Partial Discharge Analysis for Power Distribution Transformer Model," in *EECON 31st Electrical Engineering Conference*, Nakhonayok, Thailand, 2008, pp. 299–302.
- [3] *IEEE Guide for High-Voltage Testing. Power System Instrumentation and Measurements committee*, IEEE Std.4-1995.
- [4] *International Electrotechnical Commission*.





- High-voltage test techniques Part 1: General Definitions and Test Requirements*, IEC std. 60060-1, 2nd ed., 1989.
- [5] *International Electrotechnical Commission. High-voltage test techniques Part 2: Measuring System*, IEC std. 60060-2, 2nd ed., 1994.
- [6] *International Electrotechnical Commission, Voltage measurement by means of standard air gaps*, IEC std. 60052, 3rd ed., 2002.
- [7] *International Electrotechnical Commission, Insulating Liquids-Determination of the Breakdown Voltage at Power Frequency-Test Method*, IEC std. 60156, 1st ed., 1995.
- [8] J.M. Meek and J.D. Cragg, *Electrical Breakdown of Gases*, London: Oxford Clarendon Press, 1953.
- [9] H. Rather, *Electron Avalanches and Breakdown in Gases*, Butterworths, London, 1964.
- [10] K.D. Vernon, "Scanning electron microscopy: an introduction," *Lii-vs Review*, vol. 13, No. 4, pp. 40-44, 2000.
- [11] M. Vasile and G. Kammlott, "Scanning Electron Microscopy of Contact Surfaces Before and After Arcing," *IEEE Trans. Parts Materials and Pack.*, vol. 7, No. 1, pp. 16-22, 1971.