

# การทดสอบเบรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ในฉนวนอากาศ โดยใช้อิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ

และแกปทรงกลมขนาด 5 และ 25 เซนติเมตร

## Comparative Experiment of Breakdown Voltage in Air Insulation of Plane-Plane Electrode and Sphere Gap Diameter Size of 5 and 25 Centimeters

ธนกร น้ำหอมจันทร์<sup>1</sup>

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอผลการทดสอบเบรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ในฉนวนอากาศ โดยใช้อิเล็กโตรดระนาบ-ระนาบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 เซนติเมตร หนา 0.5 เซนติเมตร และแกปทรงกลมตามมาตรฐาน IEC 60052 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 และ 25 เซนติเมตร ในระยะแกป 1 ถึง 5 มิลลิเมตร ทำการทดสอบและวัดด้วยแรงดันสูง กระแสตรงขับวก ตามมาตรฐาน IEC 60060-1 และ IEC 60060-2 โดยผลการทดสอบมีดังนี้ ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์เฉลี่ย มีค่า 3.21 ถึง 16.01, 4.70 ถึง 17.56 และ 4.25 ถึง 16.86 กิโลโวลต์ ตามลำดับ ค่าความคงทนต่อความเครียด สนามไฟฟ้า เบรกดาวน์ 3.21, 3.86 และ 3.58 กิโลโวลต์ต่อมิลลิเมตร ตามลำดับ ผลจากการทดสอบและวิเคราะห์ สามารถนำไปใช้ในการออกแบบวัสดุฉนวนสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงได้อย่างเหมาะสมต่อไปในอนาคต

**คำสำคัญ:** ฉนวนอากาศ, แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์, อิเล็กโตรดระนาบ-ระนาบ, แกปทรงกลม

### Abstract

This paper presents the comparative experiment of breakdown voltage in air insulation of plane-plane electrodes with a diameter of 9 centimeters, a thickness of 0.5 centimeters and sphere gap diameters of 5 and 25 centimeters, according to IEC 60052 standard at 1 to 5 millimeter gap distance. The experiments use DC high-voltage, positive-polarity testing, according to IEC 60060-1 and IEC 60060-2 standards. The tests results show: average breakdown voltages are between 3.21 to 16.01, 4.70 to 17.56 and 4.25 to 16.86 kilovolt respectively; electric field stresses are 3.21, 3.86 and 3.58 kilovolt per millimeter respectively. These test results and analyses can be utilized to design the insulator material of DC high-voltage electric equipment more adequately in the future.

**Keywords:** air insulation, breakdown voltage, plane-plane electrode, sphere gap

<sup>1</sup>อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย

## ความนำ

จำนวนก้าชที่มีความสำคัญในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูง คือ จำนวนอากาศ ซึ่งเป็นจำนวนที่มีราคาถูก ข้อดีของจำนวนก้าช คือ เมื่อเสียสภาพความเป็นจำนวน หรือเกิดการเบรกรด่วนแล้ว จะสามารถกลับคืนสภาพความเป็นจำนวนได้หลังจากการเบรกรด่วนผ่านพื้นไปแล้ว เช่นเดียวกับจำนวนเหลว ในขณะที่จำนวนแข็งจะเสียสภาพการเป็นจำนวนอย่างการเมื่อเกิดการเบรกรด่วน (ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล, 2546; สำราญ สังข์สะอาด, 2549; Kuffel, Zaengl, & Kuffel, 2000; Naidu, & Kamaraju, 1996)

ในปัจจุบันประเทศไทยมีการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยระบบไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง เชื่อมโยงระหว่างระบบไฟฟ้าของประเทศไทยกับประเทศมาเลเซีย เพื่อทำการซื้อ - ขายพลังงานไฟฟ้า ตั้งแต่ปี 2545 (ยุทธชัย คิลปวิจารณ์, 2554)

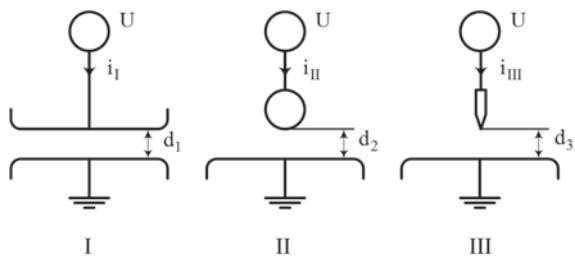
จากข้อมูลข้างต้น จึงมีแนวคิดที่จะทำการทดสอบเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกรด่วนในจำนวนอากาศ ซึ่งใช้อิเล็กโทรดระนาบ-ระนาบ และอิเล็กโทรดทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 และ 25 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน IEC 60052 (IEC std. 60052, 2002) กำหนด เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์เมื่อมาจากการทดสอบด้วยไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงขั้นบวก เพื่อให้ทราบค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกรด่วนของจำนวนอากาศในไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงจากรูปลักษณะของอิเล็กโทรด และระยะแแกปที่ทำการทดสอบ ซึ่งจะนำไปใช้ออกแบบจำนวนอากาศสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงได้อย่างเหมาะสมสมต่อไปในอนาคต

## คุณสมบัติทางไฟฟ้าของจำนวนอากาศ

อากาศ เป็นจำนวนก้าชที่เป็นทั้งจำนวนหลักและเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนในด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง รวมถึงใช้ในด้านการเรียนการสอนและการวิจัย คุณสมบัติทางไฟฟ้าของจำนวนอากาศที่สำคัญมีดังนี้ มีค่าความคงทนต่อความเครียดสานมไฟฟ้าแรงสูงสุด  $E_{max}$  ที่เกิดขึ้น ณ จุดใดจุดหนึ่งระหว่างอิเล็กโทรดในขณะที่เบรกรด่วนเริ่มเกิดขึ้น

ต่าง ๆ ของอุปกรณ์ เพื่อระบายน้ำร้อนได้ดี ไม่ติดไฟง่าย ดับอาร์คทางไฟฟ้าได้ และสามารถคืนตัวเป็นจำนวนได้อีกครั้ง หลังจากเกิดการเบรกรด่วน อีกทั้งใช้ในการออกแบบสร้างอุปกรณ์การทดสอบและงานวิจัยทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงอย่างแพร่หลาย (ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล, 2546; สำราญ สังข์สะอาด, 2549; Kuffel, Zaengl, & Kuffel, 2000; Naidu, & Kamaraju, 1996)

ลักษณะรูปแบบสานมไฟฟ้าโดยทั่วไป แบ่งออกได้ 2 ชนิด คือ สานมไฟฟ้าสม่ำเสมอ (I) และสานมไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ชนิดไม่สม่ำเสมอแบ่งเป็น 2 แบบ คือ แบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (II) และแบบไม่สม่ำเสมอสูง (III) สานมไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับรูปลักษณะของอิเล็กโทรด (ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล, 2546; สำราญ สังข์สะอาด, 2549) แสดงดังภาพ 1



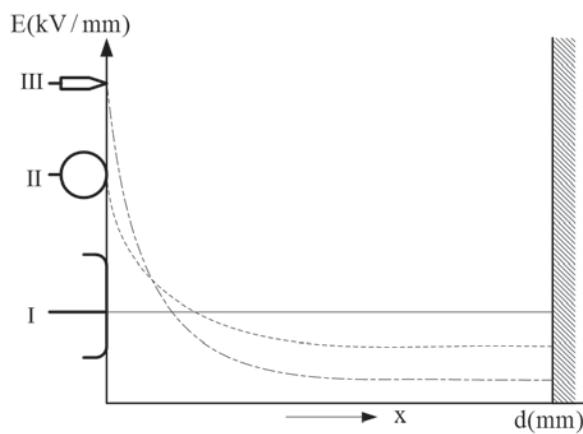
ภาพ 1 อิเล็กโทรดที่มีลักษณะสานมไฟฟ้าแบบต่าง ๆ โดยที่ I : uniform field

II : slightly nonuniform field

III : highly nonuniform field

ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของวัสดุจำนวนส่วนใหญ่จะเป็นค่าทางสถิติหรือเป็นค่าโดยประมาณ มักจะกำหนดด้วยค่าความเครียดสานมไฟฟ้าแรงสูงสุด ( $E_{max}$ ) ที่เกิดขึ้น ณ จุดใดจุดหนึ่งระหว่างอิเล็กโทรดในขณะที่เบรกรด่วนเริ่มเกิดขึ้น

ในการสานมไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ความเครียดสานมไฟฟ้าสูงสุดจะอยู่บริเวณจุดปลายของอิเล็กโทรด เมื่อระยะห่างออกไปจากผิวอิเล็กโทรด ค่าความเครียดสานมไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็ว แสดงดังภาพ 2



ภาพ 2 การกระจายสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดรูปลักษณะต่างๆ

### ผลของลักษณะสนามไฟฟ้าต่อการเกิดเบรกดาวน์

ในกรณีสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดเป็นแบบสม่ำเสมอ หรือไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (แฟคเตอร์สนามไฟฟ้า  $\eta^*$  มีค่าสูง) แรงดันเริ่มต้นที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในช่วงแก่ระหว่างอิเล็กโตรด จะเป็นเบรกดาวน์โดยตรง โดยไม่มีโคโรนาเกิดขึ้นก่อน เบรกดาวน์ แต่ในกรณีที่อิเล็กโตรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (แฟคเตอร์  $\eta^*$  มีค่าต่ำ) ค่าแรงดันเบรกดาวน์ ( $U_b$ ) มีค่าสูงกว่าแรงดันเริ่มต้น ( $U_i$ ) คือ เมื่อได้เงื่อนไขของแรงดันเริ่มต้นเปลี่ยนแปลงจะไม่เกิดเบรกดาวน์แต่จะเริ่มเกิดโคโรนา ถ้าจะให้เบรกดาวน์จะต้องเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้นอีก ค่าแรงดันเริ่มต้นอาจเขียนได้ดังสมการ (1)

$$U_i = E_i x d x \eta^* \quad (1)$$

โดยที่  $U_i$  คือ แรงดันเริ่มต้น หน่วย kV  
 $E_i$  คือ  $E_{max}$  จากแรงดันเริ่มต้น  $U_i$  หน่วย kV/mm

ในกรณีที่อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หรือไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ค่า  $U_i$  ก็คือ  $U_b$  และ  $E_i$  ก็คือ  $E_b$  ถ้าเป็นอิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง  $U_b > U_i$  (ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล, 2546; สำราญ สังฆะสาด, 2549; Kuffel, Zaengl, & Kuffel, 2000; Naidu, & Kamaraju, 1996)

ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ของแกปทรงกลมตามมาตรฐาน IEC 60052 (IEC std. 60052, 2002) ที่ระยะแกป 1.0 ถึง 5.0 มิลลิเมตร แสดงดังตาราง 1

### ตาราง 1

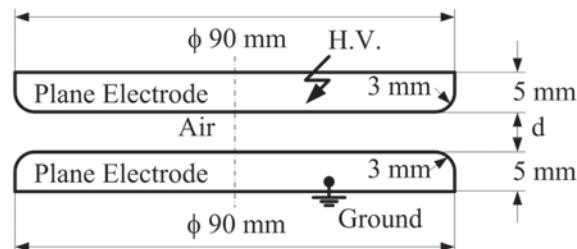
แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ตามมาตรฐาน IEC 60052 ที่ระยะแกป 1-5 มิลลิเมตร (หน่วย: กิโลโวลต์)

Gap spacing (mm)	Sphere diameter (cm)					
	2	5	6.25	10	12.5	15
1.0	4.7					
2.0	8.0	8.0				
3.0	11.2	11.2				
4.0	14.4	14.3	14.2			
5.0	17.4	17.4	17.2	16.8	16.8	16.8

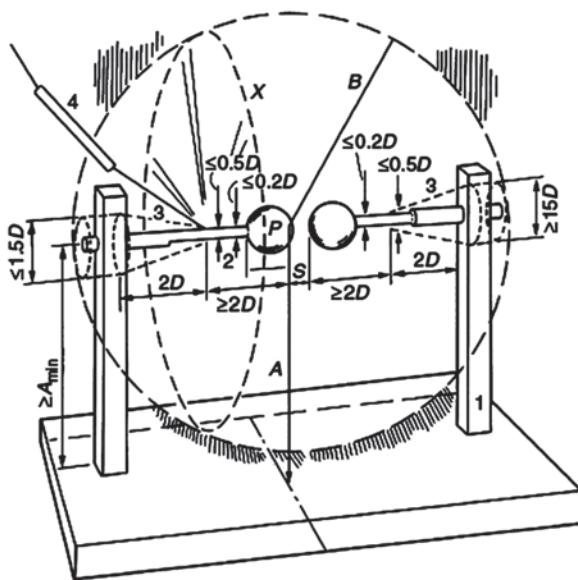
### อิเล็กโตรดที่ใช้ในการทดสอบ

การทดสอบจะใช้อิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบในชั้นวนอากาศ ที่ระยะแกป 1-5 มิลลิเมตร อิเล็กโตรดที่ใช้กึ่งขั้นรูปจากอลูมิเนียม ขนาดของอิเล็กโตรดที่ใช้ในการทดสอบ แสดงดังภาพ 3

แกปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 และ 25 เชนติเมตรอ้างอิงขนาดตามมาตรฐาน IEC 60052 (IEC std. 60052, 2002) การจัดวางแกปทรงกลมจะขึ้นอยู่กับขนาดของอิเล็กโตรด โดยอิเล็กโตรดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 25 เชนติเมตร จะจัดวางในลักษณะแกปแนวอน แสดงดังภาพ 4 อิเล็กโตรดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 เชนติเมตรขึ้นไป จะจัดวางในลักษณะแกปแนวตั้ง แสดงดังภาพ 5

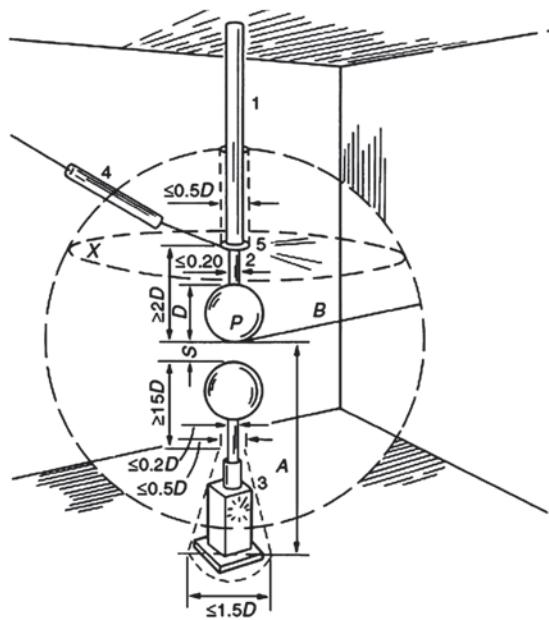


ภาพ 3 ขนาดของอิเล็กโตรดที่ใช้ในการทดสอบ



#### ภาพ 4 การจัดวางแกปทรงกลมแนวอน

*Note.* from “*High Voltage Engineering: Fundamentals*”, by Kuffel, Zaengl, & Kuffel, (2000), Newnes: Great Britain. p.81.

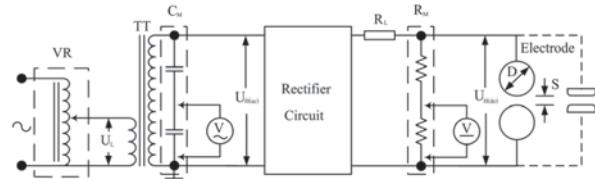


## ภาพ 5 การจัดวางแกปทรงกลมแนวตั้ง

*Note. from "High Voltage Engineering : Fundamentals", by Kuffel, Zaengl, & Kuffel, (2000), Newnes: Great Britain. p. 80.*

## วงจรการทดสอบและระบบวัดแรงดันสูง

ระบบวัดแรงดันสูงเบื้องต้น ประกอบด้วย 2 ระบบ คือ ระบบสร้างแรงดันสูง และระบบวัดแรงดันสูง ซึ่งทั้ง 2 ระบบที่ใช้ในการทดสอบจะเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60060-1 (IEC std. 60060-1, 1989) และ IEC 60060-2 (IEC std. 60060-2, 1994) กำหนดดังนี้ แรงดันไฟฟ้า กระแสสลับที่ใช้ในการทดสอบแสดงในค่ารากกำลังสอง เคลี่ย (RMS value) มีความถี่อยู่ในช่วง 45 - 65 เฮิรตซ์ รูปคลื่นของแรงดันเป็นไขนูซอยด์ทั้งครึ่งควบคุม และลบ มีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ  $\pm 1$  ตลอดการทดสอบ แรงดันสูงกระแสตรงที่ใช้ในการทดสอบ มีแฟคเตอร์ ระลอกไม่เกินร้อยละ 3 ค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ  $\pm 1$  เมื่อช่วงเวลาการทดสอบต่ำกว่า 60 วินาที และค่าความ คลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ  $\pm 3$  เมื่อช่วงเวลาการทดสอบ เกินกว่า 60 วินาที ระบบวัดแรงดันสูงมีความคลาดเคลื่อน ไม่เกินร้อยละ  $\pm 3$  และสเกลแฟคเตอร์ของอุปกรณ์วัด แรงดันสูงมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ  $\pm 1$  โดยมี อัตราการเพิ่มแรงดัน 1 กิโลโวลต์ต่อวินาที (successive discharge tests) กระบวนการทดสอบจำนวนอากาศเป็นไป ตามมาตรฐาน IEC 60052 (IEC std. 60052, 2002) กำหนด ในการทดสอบจะทำการทดสอบหาค่าแรงดันไฟฟ้า เบรกดาวน์ด้วยแรงดันสูงกระแสตรงขั้วบวกและลบ เพื่อ หาค่าเฉลี่ย  $U_b$  จากการทดสอบจำนวน 10 ครั้ง วงจรและ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ ในจำนวนอากาศ โดยใช้แรงดันสูงกระแสตรงขั้วบวก และลบดังภาพ 6



## ภาค 6 วงศ์การทดสอบ

## จากภาพ 6 โดยที่

VR คือ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับปรับค่าได้ควบคุมด้วย PLC (ธนากร น้ำหอมจันทร์, อติกร เสรีพัฒนานนท์ และ พงษ์สวัสดิ์ คงภูมิ, 2550)

TT คือ หม้อแปลงทดสอบแรงสูง 220V/20kV

$U_L$  คือ แรงดันด้านแรงดันกระแสสลับ

$U_{H(ac)}$  คือ แรงดันด้านแรงสูงกระแสสลับ

$U_{H(dc)}$  คือ แรงดันด้านแรงสูงกระแสตรง

$R_d$  คือ ความต้านทานกำกัดกระแส

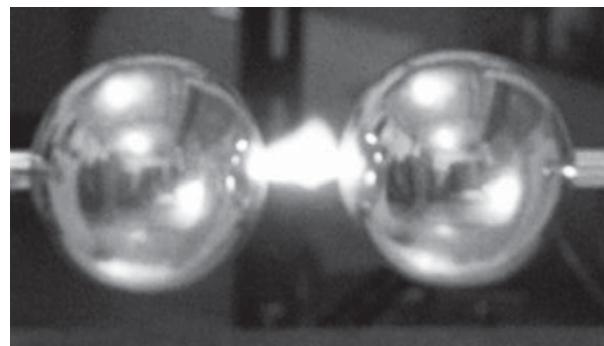
D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางอิเล็กโทรดทรงกลม

S คือ ระยะช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรด

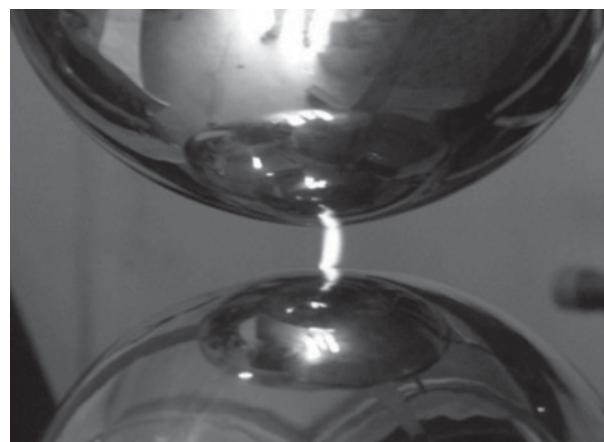
$C_M$  คือ โวเตจดิไวเดอร์แบบดัวเก็บประจุพิกัดแรงดัน 150 kV (อติกร เสรีพัฒนานนท์, ธนากร น้ำหอมจันทร์, พงษ์สวัสดิ์ คงภูมิ และ สุพิช บุญรัตน์, 2551)

$R_M$  คือ โวเตจดิไวเดอร์แบบดัวตันทาน พิกัดแรงดัน 100 kV

V คือ ดิจิทัลมัลติมิเตอร์ (True RMS digital multimeter)



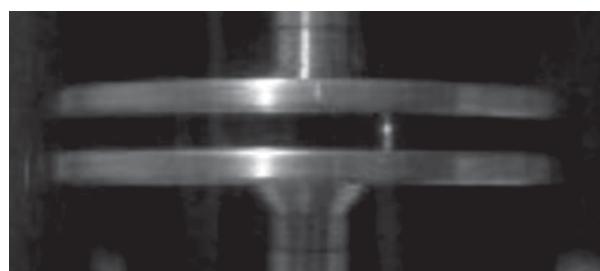
ภาพ 8 ภาพถ่ายการเกิดเบรกดาวน์ภายในแกปทรงกลมขนาดอิเล็กโทรดทรงกลม 5 เซนติเมตร



ภาพ 9 ภาพถ่ายการเกิดเบรกดาวน์ภายในแกปทรงกลมขนาดอิเล็กโทรดทรงกลม 25 เซนติเมตร

## ผลการทดสอบและวิจารณ์

ภาพถ่ายเบรกดาวน์ระหว่างอิเล็กโทรด แบบ ระนาบ-ระนาบ แกปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 และ 25 เซนติเมตร ขณะทดสอบ แสดงดัง ภาพ 7 - 9 ตามลำดับ



ภาพ 7 ภาพถ่ายการเกิดเบรกดาวน์ภายในอิเล็กโทรด ระนาบ-ระนาบ

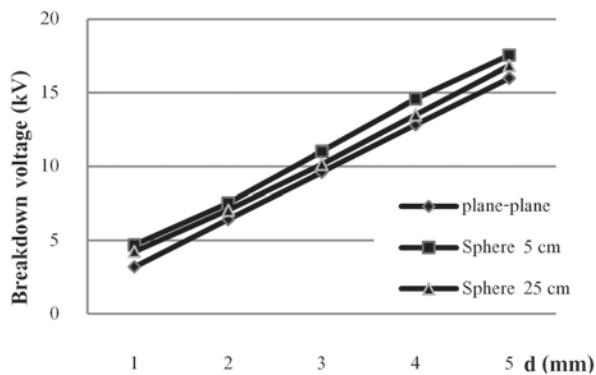
ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์เฉลี่ย  $U_{b(AVG)}$  จากการทดสอบ 10 ครั้ง ของอิเล็กโทรดระนาบ-ระนาบ แกปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 และ 25 เซนติเมตร ในจำนวนอากาศ ที่ระยะแกป 1 ถึง 5 มิลลิเมตร โดยใช้ แรงดันสูงกระแสตรงขึ้นบวก แสดงดังตาราง 2

## ตาราง 2

### ค่าเฉลี่ยแรงดันเบรกดาวน์ในจำนวนอากาศ

Gap spacing; d (mm)	Breakdown voltage; $U_{b(AVG)}$ (kV)		
	plane-plane	Sphere 5 cm	Sphere 25 cm
1	3.21	4.70	4.25
2	6.42	7.53	7.05
3	9.61	11.02	10.14
4	12.84	14.59	13.50
5	16.01	17.56	16.86

จากตาราง 2 สามารถแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์เฉลี่ย  $U_b(\text{AVG})$  ของอิเล็กโตรด ระนาบ-ระนาบ แกปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 และ 25 เซนติเมตร ในจำนวนอากาศ ที่ระยะแกป 1 ถึง 5 มิลลิเมตร ดังภาพ 10



ภาพ 10 การเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์จากการทดสอบ โดยใช้อิเล็กโตรดระนาบ-ระนาบ แกปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 และ 25 เซนติเมตร

จากค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์เฉลี่ย  $U_b(\text{AVG})$  ดังตาราง 2 และสมการ (1) จะสามารถวิเคราะห์หาค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ ( $E_b$ ) ได้ดังตาราง 3

ตาราง 3

ค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์

	plane-plane	Sphere	Sphere
	5 cm	25 cm	
$E_b$ (kV/mm)	3.21	3.86	3.58

## สรุป

ผลจากการทดสอบเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์จากการทดสอบ โดยใช้อิเล็กโตรดระนาบ-ระนาบ แกปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 และ 25 เซนติเมตร ในจำนวนอากาศ ที่ระยะแกป 1 ถึง 5 มิลลิเมตร โดยใช้แรงดันสูงกระแตงร่องขั้ววง กระบวนการทดสอบ และระบบวัดแรงดันสูงอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60060-1 และ IEC 60060-2 กำหนด สภาวะแวดล้อมของทดสอบ ดังนี้ อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส ความดันบรรยายกาศ 748 มิลลิเมตรปรอท ความชื้นสัมพัทธ์ 73 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์เฉลี่ย  $U_b(\text{AVG})$  มีค่า 3.21 ถึง 16.01, 4.70 ถึง 17.56 และ 4.25 ถึง 16.86 กิโลโวลต์ ตามลำดับโดยมีค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ 3.21, 3.86 และ 3.58 กิโลโวลต์ต่อมิลลิเมตร ตามลำดับ

จากการทดสอบหาค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ โดยใช้อิเล็กโตรดระนาบ-ระนาบ แกปกลมตามมาตรฐาน IEC 60052 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 และ 25 เซนติเมตร ในระยะแกป 1 ถึง 5 มิลลิเมตร ซึ่งอิเล็กโตรดมีรูปลักษณะแตกต่างกันพบว่า ที่ระยะแกปเท่ากันแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์จะมีค่าไม่เท่ากัน ทั้งนี้เป็นผลจากรูปลักษณะของอิเล็กโตรดไม่เท่ากัน ซึ่งจะส่งผลต่อค่าแฟคเตอร์สนามไฟฟ้า (field utilization factor;  $\theta^*$ ) ของอิเล็กโตรด และค่าแรงดันไฟฟ้า เบรกดาวน์อีกด้วย โดยอิเล็กโตรดแบบระนาบจะมีค่าแฟคเตอร์สนามไฟฟ้าสูงกว่าอิเล็กโตรดแบบทรงกลม และอิเล็กโตรดแบบทรงกลมจะมีค่าแฟคเตอร์สนามไฟฟ้าแปรผันตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์จะแปรผกผันกับแฟคเตอร์สนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดแต่ละรูปลักษณะ ตั้งแสดงในสมการที่ (1) จากความแตกต่างของรูปลักษณะอิเล็กโตรดที่ใช้ในการทดสอบและผลการวิเคราะห์จะสามารถนำไปใช้ในการออกแบบวัสดุจำนวนสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง ได้อย่างเหมาะสมต่อไปในอนาคต

## เอกสารอ้างอิง

ธนกร น้ำหอมจันทร์, อติกร เสรีพัฒนานนท์, พงษ์สวัสดิ์ คงภูมิ. (2550). แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับปรับค่าได้ควบคุมด้วยโปรแกรมเมเบิลโลจิกคอนโทรล. วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยรังสิต, 10(1), 32-37.

ยุทธชัย ศิลปะวิจารณ์. (2554). การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบ HVDC. ค้นเมื่อ 12 สิงหาคม 2554, จาก <http://thailandindustry.com/guru/view.php?id=12923&section=9>. 2554.

ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล, (2546). เอกสารประกอบการสอนวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงขั้นสูง. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

สำราญ สังข์สะอาด. (2549). วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อติกร เสรีพัฒนานนท์, ธนกร น้ำหอมจันทร์, พงษ์สวัสดิ์ คงภูมิ และ สุพิศ บุญรัตน์. (2551). การออกแบบและสร้าง โอลเตจดิไวเดอร์ แบบตัวเก็บประจุขนาด 150 กิโลโวลต์สำหรับวัดแรงดันสูงกระแสสลับ. วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย, 2(1). 19-25.

International Electrotechnical Commission, (1989). *High-voltage test techniques Part 1: General definitions and test requirements*. IEC std. 60060-1, Second edition, 1989-11. Switzerland, Geneva .

International Electrotechnical Commission, (1994). *High-voltage test techniques Part 2: Measuring System*. IEC std. 60060-2, Second edition, 1994-11. Switzerland, Geneva .

International Electrotechnical Commission, (2002). *Voltage measurement by means of standard air gaps*. IEC std. 60052, Switzerland, Geneva .

Kuffel, E., Zaengl, W. S. & Kuffel, J. (2000). *High Voltage Engineering :Fundamentals* (2 nd. ed.). Great Britain: Butterworth-Heinemann.

Naidu, M. S. & Kamaraju, V. (1996). *High Voltage Engineering* (2 nd. ed.). New York: McGraw-Hill.