

นวัตกรรมสิ่งประดิษฐ์เครื่องวัดแรงดันโลหะรูปทรงกลม

นายอัครารุช ดีโคตร อาจารย์ที่ปรึกษานายเกษภา สารสุข
สาขาวิชาช่างไฟฟ้า , วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมศรีสงคราม
มหาวิทยาลัยนครพนม

129 หมู่ 7 ตำบลศรีสงคราม อำเภอศรีสงคราม จังหวัดนครพนม 48150

บทคัดย่อ

ปัจจุบันงานทางด้านไฟฟ้ามีส่วนสำคัญมากในการพัฒนาประเทศ จะเห็นได้ว่าทุกที่ในประเทศต่างมีไฟฟ้าใช้ จนอาจกล่าวได้ว่าไฟฟ้ามีความสำคัญกับชีวิตประจำวัน ไม่ว่าจะระบบแสงสว่าง เครื่องปรับอากาศ ตลอดจนเครื่องจักรกลในโรงงานอุตสาหกรรม ดังนั้นเราจำเป็นต้องมีการศึกษาและพัฒนางานไฟฟ้าให้ก้าวหน้าและนำไฟฟ้ามาใช้ประโยชน์ให้มากที่สุด ซึ่งเราสามารถนำไฟฟ้ามาประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์อำนวยความสะดวกต่างๆมากมาย จากความสำคัญดังกล่าวเราจึงควรนำเทคโนโลยีไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้กับชีวิตประจำวันของเราและพัฒนาทางด้านไฟฟ้าให้ก้าวหน้าต่อไป

งานด้านเครื่องวัดแรงดันด้วยโลหะทรงกลมถือว่าเป็นงานที่มีความสำคัญมาก เพราะการที่ช่างไฟฟ้า หรือวิศวกรไฟฟ้าจะสามารถวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าได้ถูกต้องนั้น จำเป็นต้องทราบค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับระบบไฟฟ้านั้น ได้มาจากการวัดค่าแรงไฟฟ้า เพื่อจัดทำชุดฝึกเครื่องวัดแรงดันด้วยโลหะทรงกลม

Keywords : โลหะทรงกลม , ตัวต้านทาน , หม้อแปลงไฟฟ้า

1. ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ปัจจุบันงานทางด้านไฟฟ้ามีส่วนสำคัญมากในการพัฒนาประเทศ จะเห็นได้ว่าทุกที่ในประเทศต่างมีไฟฟ้าใช้ จนอาจกล่าวได้ว่าไฟฟ้ามีความสำคัญกับชีวิตประจำวัน ไม่ว่าจะระบบแสงสว่าง เครื่องปรับอากาศ ตลอดจนเครื่องจักรกลในโรงงานอุตสาหกรรม ดังนั้นเราจำเป็นต้องมีการศึกษาและพัฒนางานไฟฟ้าให้ก้าวหน้าและนำไฟฟ้ามาใช้ประโยชน์ให้มากที่สุด ซึ่งเราสามารถนำไฟฟ้ามาประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์อำนวยความสะดวกต่างๆมากมาย จากความสำคัญดังกล่าวเราจึงควรนำเทคโนโลยีไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้กับชีวิตประจำวันของเราและพัฒนาทางด้านไฟฟ้าให้ก้าวหน้าต่อไป

งานด้านเครื่องวัดแรงดันด้วยโลหะทรงกลมถือว่าเป็นงานที่มีความสำคัญมาก เพราะการที่ช่างไฟฟ้า หรือวิศวกรไฟฟ้าจะสามารถวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าได้ถูกต้องนั้น จำเป็นต้องทราบค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับระบบไฟฟ้านั้นได้มาจากการวัดค่าแรงไฟฟ้า เพื่อจัดทำชุดฝึกเครื่องวัดแรงดันด้วยโลหะทรงกลม

1.1 เพื่อใช้เป็นสื่อการสอน

การทำเครื่องวัดแรงดันด้วยโลหะทรงกลมที่มีความแม่นยำ ดังนั้นจึงถือว่าเป็นงานที่ช่างไฟฟ้าทุกคนต้องรู้จักและใช้ได้ถูกต้อง แม่นยำ จึงจะสามารถได้ค่าที่น่าเชื่อถือ จาก

ความสำคัญดังกล่าวจึงทำให้เกิดแนวความคิดที่จะจัดทำโครงการเครื่องวัดแรงดันด้วยโลหะทรงกลม เพื่อจะนำมาให้ผู้สนใจในงานด้านไฟฟ้า ตลอดจนนักศึกษาที่สนใจได้ฝึกทำการวัดค่าโลหะทรงกลม และตัวเหนี่ยวนำ ตลอดจนมอเตอร์ไฟฟ้าที่ถูกต้อง จนส่งผลให้ผู้ที่ได้ใช้ประโยชน์จากการทำ ความรู้และทักษะในการจัดทำเครื่องวัดแรงดันด้วยโลหะทรงกลม และนำความรู้ไปใช้ในการแก้ปัญหาในระบบไฟฟ้าได้ถูกต้อง

2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเบรกดาวนของช่องว่างทรงกลม การวัดแรงดันสูงด้วยช่องว่างทรงกลมนั้นอาศัยการเกิดเบรกดาวน ของฉนวนอากาศที่อยู่ระหว่างแกปทรงกลม โดยที่การเกิดเบรกดาวนจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางมิติของอิเล็กโตรด อันได้แก่เส้นผ่านศูนย์กลางของแกปทรงกลม (D) และระยะห่างของแกปทรงกลม (s) โดยที่ในการวัดค่าแรงดันเบรกดาวนนั้น ระยะ s จะต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับ D/2 และนอกจากนี้แล้ว ค่าแรงดันเบรกดาวนยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความดัน และความชื้นของอากาศ โดยที่มาตรฐานฉบับก่อน IEC 52: 1960 [4] และ IEEEStd 4: 1995 [3] ได้ละเลยผลของความชื้นในอากาศที่มีผลต่อแรงดันเบรกดาวน มาตรฐานฉบับปัจจุบัน IEC 60052 ได้มีการคำนึงถึงผลของความชื้นในอากาศ พบว่าทำให้แรงดันเบรกดาวนของช่องว่างทรงกลมเพิ่มขึ้นตาม อัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของความชื้นสัมบูรณ์ 0.2 % ต่อ gm-3 ดังนั้นจะได้ว่า

$$U_b = f(D, S, \delta, h) \quad (1)$$

เมื่อ

U_b คือ แรงดันที่ทำให้เกิดการสปาร์หรือเบรกดาวน

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลม

S คือ ระยะช่องว่างระหว่างแกปทรงกลม

δ คือ ความหนาแน่นอากาศขึ้นอยู่กับ

ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิ

h คือ ความชื้นของอากาศ

มาตรฐาน IEC 60052 ได้กำหนดค่าแรงดันเบรกดาวนของอากาศระหว่างทรงกลมไว้ที่

สภาวะมาตรฐาน คือ อุณหภูมิ (to) 20 oC และความดันบรรยากาศ (bo) 101.3 kPa หรือ 760 mmHg หรือ 1013 mbar ความชื้นสัมบูรณ์จะอยู่ระหว่าง 5 gm-3 - 12 gm-3 ที่ค่าเฉลี่ย 8.5 gm-3 สำหรับมาตรฐาน IEEEStd 4:1995 [3] ได้กำหนดค่าแรงดันเบรกดาวนของอากาศระหว่างทรงกลมไว้ที่สภาวะมาตรฐาน คืออุณหภูมิ (to) 20 oC และความดันบรรยากาศ (bo) 101.3 kPa หรือ 1013 mbar หรือ 760 mmHg โดยที่ความชื้นสัมบูรณ์ 11 gm-3 ถ้า b เป็นความดันบรรยากาศ (kPa) และ H เป็นความสูงของบารอมิเตอร์ (mmHg) จะได้

$$b = 0.1333 \quad (2)$$

ดังนั้นค่าแรงดันเบรกดาวนที่วัดได้ที่ความดัน, อุณหภูมิและความชื้นใดๆ เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานจะต้องแปลงค่าที่วัดได้ไปเป็นค่าที่สภาวะมาตรฐาน คือ

$$U_o = \frac{U}{\delta \times k}$$

เมื่อ

U_o คือ ค่าแรงดันเบรกดาวนที่สภาวะมาตรฐาน

U คือ ค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่สภาวะห้องทดสอบ

δ คือ ตัวประกอบแปลงผันความหนาแน่นอากาศ

k คือ ตัวประกอบแปลงผันเนื่องจากความชื้น

$$\delta = \frac{b}{b_0} \times \frac{273+t_0}{273+t}$$

(4)

$$k = 1 + (0.002 \times (\frac{h}{g} - 8.5))$$

(5)

เมื่อ

b คือ ความดันของอากาศที่สภาวะห้องทดลอง เป็น kPa หรือ mmHg หรือ mbar

t คือ อุณหภูมิของอากาศที่สภาวะห้องทดลอง เป็น $^{\circ}C$

h คือ ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศที่สภาวะห้องทดลองเป็น gm^{-3}

ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงบางแห่งได้วัดค่าของความชื้นของบรรยากาศในสภาวะ ของความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งสามารถที่จะแปลงเป็นความชื้นสัมบูรณ์ได้โดยใช้กราฟการแปลงผันดังแสดงในภาคผนวก ก เมื่อพิจารณาถึงสภาวะแวดล้อมในห้องทดสอบของประเทศไทยพบว่า ค่าความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศมีค่าอยู่นอกเหนือขอบเขตที่กำหนดตามสภาวะมาตรฐานของ IEC โดยที่การหาค่าแฟคเตอร์แก้ความชื้นในอากาศ (kh) ได้มีมาก่อนแล้วในกรณีของการทดสอบอุปกรณ์ฉนวน โดยที่

$$U_{bn} = \frac{U_b}{k_d} \times k_h$$

(6)

เมื่อ

U_{bn} คือ ค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่สภาวะมาตรฐาน

U_b คือ ค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่

สภาวะห้องทดลอง

k_d คือ แฟคเตอร์แก้ความหนาแน่น

อากาศ

k_h คือ แฟคเตอร์แก้ความชื้นใน

อากาศ

k_d จะมีค่าเท่ากับ δ (ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของอากาศ) เมื่อ δ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.95-1.05 และกรณีอื่นๆ สามารถหาค่า k_d ได้จากตารางที่ 1 ค่า δ นั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่าง k_d

กับ δ

ความหนาแน่นอากาศ (δ)	ค่าแก้ (k_d)
0.70	0.72
0.75	0.77
0.80	0.82
0.85	0.86
0.90	0.91
0.95	0.95
1.00	1.00
1.05	1.05
1.10	1.09
1.15	1.13

สำหรับค่า kh นั้นสามารถหาได้จากเส้นกราฟในภาคผนวก ข กรณีรายละเอียดการหา ค่าแพคเตอร์แก้ไขตามมาตรฐาน IEEE std สามารถดูได้จากมาตรฐานฉบับดังกล่าว

IEC 60052 กำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมาตรฐานของ แกปทรงกลมได้ 12 ขนาด เริ่มต้นตั้งแต่ 20 มิลลิเมตร จนถึง 2000 มิลลิเมตร โดยที่ IEEE ได้กำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมไว้ตั้งแต่ 62.5 มิลลิเมตรจนถึง 2000 มิลลิเมตรและค่าแรงดันมาตรฐานที่กำหนดไว้เริ่มตั้งแต่ 17.5 กิโลโวลท์พีคจนถึงประมาณ 2 ล้านกิโลโวลท์พีค ค่าแรงดัน เบรกดาวน์ที่กำหนดในตารางมาตรฐานแสดงในภาคผนวก ค ค่าในตารางเป็นค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่สภาวะมาตรฐาน IEC 60052 [2] หากโครงสร้างการติดตั้ง การฉายรังสี (irradiation) เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด

2.2 มาตรฐานแกปทรงกลม

มาตรฐานช่องว่างทรงกลม เป็นการติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าพีค ของแรงดันโดยอ้างอิงจากมาตรฐาน IEC 60052 [2] และ IEEE std 4 [3] มาตรฐานนี้เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไป และ มาตรฐาน เหล่านี้ได้กล่าวถึงข้อกำหนดของอุปกรณ์วัดค่า แรงดันด้วยช่องว่างทรงกลมซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.3 เงื่อนไขข้อกำหนดของรูปร่างและพื้นผิวทรงกลม

แกปทรงกลมประกอบด้วยโลหะทรงกลม 2 ลูก มีขนาดเส้น ผ่านศูนย์กลาง D เท่ากันทั้ง 2 ลูก และประกอบด้วย ก้านยึด แกปทรงกลม เกียร์ขับเคลื่อนปรับระยะฉนวนรองรับโครง รองรับแกปทรงกลม โดยที่เส้นผ่านศูนย์กลาง D คือ 2 – 5 – 6.25 – 10 – 12.5 – 15 – 25 – 50 – 75 – 100 – 150 และ 200 เซนติเมตร ระยะทางระหว่างแกปทรงกลมทั้งสอง แทนด้วย S ทรงกลมควรจะทำขึ้นด้วยความประณีต คือ ผิว ต้องเรียบและส่วนโค้งจะต้องเท่ากันมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ความคลาดเคลื่อนของขนาดและรูปร่างจะต้องผ่านการ ตรวจสอบก่อนที่จะใช้งานครั้งแรก ซึ่งสามารถตรวจสอบได้ โดยเครื่องมือที่เหมาะสม เช่น Spherometer

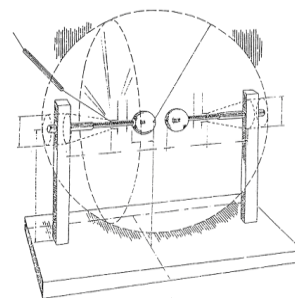
เส้นผ่านศูนย์กลางของแกปทรงกลมแต่ละลูกขนาดควร จะ เท่ากันไม่ควรแตกต่างกันเกิน 2 % ในบริเวณที่เกิดการ เบรกดาวน์ จะต้องเป็นผิวเรียบไม่เป็นผิวขรุขระ (ความขรุขระ ต้องไม่มากกว่า 10 μm) เมื่อใช้งานช่องว่างทรงกลมแล้ว โดยทั่วไปจะต้องทำการตรวจสอบและทำความสะอาดผิวของ ทรงกลมอยู่เสมอ โดยการสัมผัสและจากการสังเกต

2.4 ข้อกำหนดของช่องว่างทรงกลมเพื่อสำหรับการวัด

แกปแนวตั้ง (Vertical gap)

เมื่อจัดให้ทรงกลมอยู่ในแนวตั้ง แกนของทรงกลมแรง สูงไม่ควรจะเป็นขอบคมหรือมุม และเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนไม่ควรเกิน 0.2D ข้อกำหนดนี้ ทำขึ้นภายใต้ระเบียบข้อบังคับ เพื่อลดผลกระทบของแกนทรง กลมแรงสูงต่อแรงดันเบรกดาวน์ของแกปทรงกลมและถ้าหาก มีการใช้โครนาซีลด์ ที่ด้านปลายของแกนทรงกลมแรงสูง โดย จะยึดตั้งฉากกับแกนของทรงกลมขนาดของโครนาซีลด์ จะต้องไม่เกิน 0.5D และห่างจากจุดสปาร์กของแกปทรงกลม ไม่น้อยกว่า 2D

ส่วนที่ต่อลงดินและเกียร์ขับเคลื่อนมีผลกระทบน้อยมาก ดังนั้นขนาดเหล่านั้นจึงมีความสำคัญน้อย รูปที่ 1 ข้อจำกัดของขนาดของส่วนประกอบของตัวอย่างทรงกลมแนวตั้งก้านของแถบทรงกลมทั้งสองต้องสมมาตรกัน แถบแนวตั้งปกติจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 25 เซนติเมตร



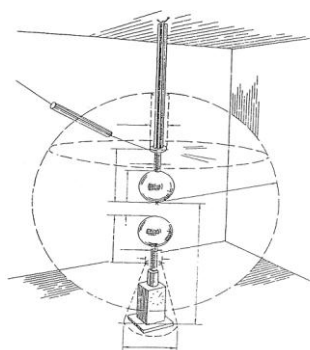
รูปที่ 2 แถบแนวนอน (เส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 25 เซนติเมตร)

แถบแนวนอน (Horizontal gap)

แถบแนวนอนมีข้อจำกัดของขนาดของส่วนประกอบต่างๆ เหมือนกับแถบแนวตั้งปกติแล้ว แถบแนวนอนจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 25 เซนติเมตร แถบแนวนอนแสดงดังรูปที่ 2

จากรูปที่ 1 และ 2 เมื่อ

- 1 คือ ฉนวนรองรับ
 - 2 คือ ก้านยึดแถบทรงกลม
 - 3 คือ เกียร์ขับเคลื่อนทรงกลมเพื่อปรับระยะ
 - 4 คือ สายแรงสูงอันดับกับความต้านทาน
 - 5 คือ ที่ต่อสายแรงสูง
- A คือ ความสูง P เหนือพื้นดิน
 B คือ รัศมีย่านปลอดภัยจากวัตถุอื่น
 P คือ จุดเกิดการ Break down



รูปที่ 1 แถบแนวตั้ง (เส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 25 เซนติเมตร)

ความสูงของทรงกลมเหนือพื้นดิน (Height of the spheres above the horizontal earthed plane) ระยะ A ของจุดที่เกิดเบรกดาวน เหนือพื้นที่ห้องปฏิบัติการจะต้องเป็นไปตามข้อจำกัด ดังแสดงในตารางที่ 2 ถ้าติดตั้งแถบทรงกลมแล้วส่วนที่ต่อลงดินใกล้กับเพดาน โดยที่พื้นผิวอื่นๆ เช่น ผนังห้องและพื้นห้อง มีระยะทางค่อนข้างห่างไกลมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระยะทางจากเพดานไปยังส่วนที่ต่อลงดิน เพดานจะถูกพิจารณาเป็นระนาบที่จะวัดไปหาจุดสปาร์กเป็นระยะ A ระยะปลอดภัยวัตถุอื่นใดของทรงกลมวัดแรงดัน (Clearance around the spheres) คือ ระยะจากจุดเบรกดาวนไปยังวัตถุแปลกปลอมอื่นๆ เช่น เพดาน ผนัง และตัวนำต่างๆ รวมทั้งอุปกรณ์ใดๆที่ต่อลงดิน เช่นเดียวกับตัวรองรับโครงสร้างสำหรับทรงกลม ถ้าเป็นวัตถุตัวนำจะต้องมีระยะห่างน้อยที่สุดเป็นระยะ B ดังตารางที่ 2 ในกรณีนี้ยอมให้ต่ำกว่า B ได้ แต่จะต้องไม่น้อยกว่า $2D$ ตัวรองรับโครงสร้างสำหรับทรงกลมที่ทำจากวัสดุฉนวน โดยมีเงื่อนไขว่าต้องสะอาด

และแห้งและทรงกลมนี้ใช้สำหรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหรือแรงดันอิมพัลส์เท่านั้น ระยะ B ระหว่างจุดเกิดเบรกดาวนและโครงสร้างรองรับทรงกลมอาจจะน้อยกว่าตามข้อกำหนดในตารางที่ 2 ได้ แต่อย่างไรก็ตามต้องไม่น้อยกว่า $1.6 D$

ค่าพีคของแรงดันเบรกดาวนนิ่ง ตาราง ค (ภาคผนวก) ใช้ได้กับที่ระยะปลอดภัยอื่นได้ รอบทรงกลม ภายในข้อกำหนดที่ให้ไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความสูงของแกปทรงกลมเหนือพื้นดิน(A)และระยะปลอดภัยตัวนำ(B)

เส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลม (D),cm	ค่าต่ำสุดของ A	ค่าสูงสุดของ A	ค่าต่ำสุดของ B
U_p to 6.25	7D	9D	14S
10-15	6D	8D	12S
25	5D	7D	10S
50	4D	6D	8S
75	4D	6D	8S
100	3.5D	5D	7S
150	3D	4D	6S
200	3D	4D	6S

2.5 การต่อลงดินและการต่อสายด้านแรงสูง

ทรงกลมด้านแรงต่ำจะต้องต่อลงดินโดยอาจผ่านความต้านทาน เพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆเช่น วัตถุประสงค์สำหรับทรงกลมด้านแรงสูงตัวนำที่ต่อรวมทั้งความต้านทานอนุกรมเข้ากับก้านยึดทรงกลม จะต้องห่างจากจุดที่เกิดการเบรกดาวนนิ่งอย่างน้อยที่สุด 2D โดยจะต้องอยู่เหนือระนาบ X

2.6 ตัวต้านทานป้องกันในการวัดแรงดันกระแสสลับ กระแสตรง และแรงดันอิมพัลส์

ในการวัดแรงดันกระแสสลับและกระแสตรง ค่าความต้านทานด้านแรงสูงควรมีค่าระหว่าง 100 กิโลโอห์ม ถึง 1 เมกะโอห์ม เพื่อป้องกันการเกิดออสซิลเลชัน อันอาจจะเป็น

สาเหตุของการเกิดเบรกดาวนนิ่งที่ผิดปกติในวงจรที่ทำการทดสอบ โดยที่ค่าความต้านทานดังกล่าวทำให้สามารถละลายผลของแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานได้ แต่ถ้าในวงจรทดสอบหรือวัสดุทดสอบไม่เกิดการดิสชาร์จชนิดนี้ ค่าความต้านทานสามารถลดค่าลงได้ แต่จะต้องเพียงพอแก่การป้องกันการเกิดความร้อนสูงที่ทรงกลม ในกรณีการวัดแรงดันอิมพัลส์ ตัวต้านทานที่ใช้จะมีค่าไม่เกิน 500 โอห์มและควรจะเป็นประเภทตัวนำที่ปราศจากความเหนียวนำ (ไม่ควรมีความเหนียวนำเกิน 30 ไมโครเฮนรี)

2.7 การใช้งานแกปทรงกลม

แกปทรงกลมจะถือว่าเป็นเครื่องมือวัดที่ถูกต้องตามมาตรฐานเมื่อค่าเบี่ยงเบน(Conventional deviation; Z) ดูได้จาก IEC 60 – 1[5] น้อยกว่า 1% ในการวัดแรงดันกระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า และ Z มีค่าน้อยกว่า 1.5% ในการวัดแรงดันอิมพัลส์แบบสวิตชิง ค่าความคลาดเคลื่อนจะมีผลจากลักษณะผิวทรงกลม ความสามารถในการหาอิเล็กตรอนอิสระ (อาจจะมี การฉายรังสี) ฝุ่นละอองในอากาศ รวมทั้งกระบวนการวัด

2.8 ผิวของทรงกลม

ผิวของทรงกลมจะต้องเรียบแห้งและสะอาดจะต้องไม่มีการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวชนิดต่างๆ หลังจากใช้งานไปแล้ว ผิวของทรงกลมจะมีลักษณะขรุขระให้ใช้กระดาษทรายละเอียด (fine abrasive paper) ขัดให้เรียบ บริเวณที่มีความขรุขระ ความชื้นอาจจะควบแน่นที่ผิวของทรงกลมซึ่งให้การวัดผิดพลาดได้ เพราะว่าการเกิดเบรกดาวนนิ่งของแกปทรงกลมจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการหาอิเล็กตรอนอิสระในช่องว่างทรงกลมในขณะที่ป้อนแรงดัน ซึ่งถ้าหากว่าในการทดลอง ค่าเบี่ยงเบนมากกว่าค่าที่กำหนดอาจจะต้องมีการฉายรังสีเข้าไปการฉายรังสีโดยปกติแล้วจะใช้ในการวัดค่าแรงดันที่ต่ำกว่า 50 กิโลโวลท์พีค สำหรับแกปทรงกลมทุกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและใช้ในกรณีที่แกปทรงกลม มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 12.5 เซนติเมตร

2.9 การวัดค่ายอดของแรงดันกระแสสลับความถี่

พลังงาน

จะต้องทำการเปรียบเทียบระบบวัดแรงดันด้วยช่องว่างทรงกลมจะได้กราฟความสัมพันธ์ ระหว่างแรงดันด้านที่อ่านจากโวลท์มิเตอร์กับแรงดันสูงที่ใช้ทดสอบ การเปรียบเทียบให้ทำตามข้อ-2.12โดยที่

1) การป้อนแรงดันให้กับวัสดุทดสอบ ค่อยๆ เพิ่มแรงดันอย่างช้าๆ เพื่อให้สามารถอ่านแรงดันจากเครื่องมือวัดแรงดันต่ำได้

2) เมื่อป้อนแรงดันจนเกิดเบรกดาวว์ บันทึกค่าแรงดันทางด้านแรงดันต่ำและจากตารางมาตรฐานก็จะสามารถรู้ค่าแรงดันสูงที่สภาวะบรรยากาศมาตรฐานได้ทันที

3) การป้อนแรงดันแต่ละครั้งจะต้อง ไม่น้อยกว่า 30 วินาที เพื่อให้ไอเลคตรอนคลายตัว

4) ค่าที่ถือว่าถูกต้องจะต้องทำการทดลองต่อเนื่อง 10 ครั้งแล้วทำการหาค่าเฉลี่ยออกมา โดยที่ค่า (Conventional deviation) จะต้องน้อยกว่า 1% ของค่าเฉลี่ย

หมายเหตุ: ค่าในตารางมาตรฐานที่ระยะแกปอยู่ในช่วง 0.5D – 0.7D ซึ่งเป็นค่าอยู่ในวง เล็บจะเป็นค่าที่ไม่รู้ระดับความเชื่อมั่นสำหรับการวัดแรงดันสูงกระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์และในกรณีการวัดแรงดันสูงกระแสตรงไม่สามารถที่จะหาค่าความแน่นอนได้

2.10 การวัดแรงดันสูงกระแสตรงด้วยช่องว่างทรงกลม

การวัดแรงดันสูงกระแสตรงด้วยช่องว่างทรงกลม มาตรฐาน IEC 60052 ไม่ได้แนะนำให้ใช้เพราะอาจจะเกิดความผิดพลาดของการเกิดเบรกดาวว์ที่ระดับแรงดันต่ำได้เนื่องมาจากอนุภาคไฟเบอร์ในอากาศ (fibrous particle) และในกรณีที่มีความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศอยู่ในช่วง $1 \text{ gm}^{-3} - 13 \text{ gm}^{-3}$ ได้แนะนำให้ใช้ช่องว่าง รีด - รีด ในการวัดแรงดันสูงกระแสตรง แต่อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ไม่สามารถวัดแรงดันสูงกระแสตรงด้วยช่องว่าง รีด - รีด ได้ ก็แนะนำให้ใช้แกปทรงกลมในการวัดโดยที่อากาศที่เคลื่อนที่ผ่านช่องว่างทรง

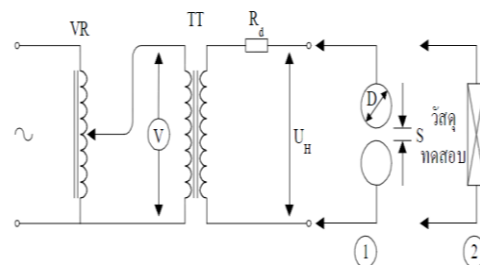
กลมจะต้องเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ไม่น้อยกว่า 3 m/s และวิธีการวัดก็ใช้วิธีเดียวกับการวัดแรงดันกระแสสลับ

2.11 การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยช่องว่างทรงกลม

การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยช่องว่างทรงกลมสามารถทำได้ทั้งแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าและสวิตชิง รายละเอียดดูได้จากมาตรฐาน [2, 3]

2.12 การเปรียบเทียบระบบวัดแรงดันสูงด้วยช่องว่างทรงกลม [1]

การวัดแรงดันสูงด้วยช่องว่างทรงกลมเป็นการวัดด้วยอุปกรณ์ที่ไม่มีตัวชี้ คือไม่ทราบว่าจะขณะนี้แรงดันที่ป้อนเข้าไบนั้นมีค่าเท่าใดจนกว่าจะเกิดสปาร์กขึ้นในช่องว่าง ดังนั้นเพื่อให้ทราบค่าแรงดันที่ป้อนได้ตลอดเวลาจึงต้องทำการแบ่งเทียบโวลท์มิเตอร์ที่วัดด้านแรงต่ำก่อนดังวงจรแบ่งเทียบในรูปที่ 3 ที่ระยะช่องว่างหนึ่งจะได้แรงดันสปาร์กทางแรงสูง UH1 ค่าหนึ่ง ซึ่งขณะนั้นโวลท์มิเตอร์ด้านแรงต่ำจะอ่านค่า UL1 เมื่อเปลี่ยนระยะช่องว่างหลายๆค่าก็จะให้ได้เส้นกราฟแบ่งเทียบ (calibration curve) UHในเทอมของ UL ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 วงจรวัดแรงดันสูงโดยใช้ช่องว่างทรงกลมเปรียบเทียบเมื่อ

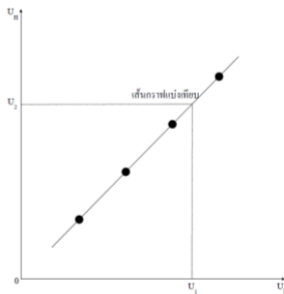
VR คือ ตัวปรับแรงดัน TT คือ หม้อแปลงทดสอบแรงสูง

UL คือ แรงดันด้านแรงต่ำ UH คือ แรงดันด้านแรงสูง

Rd คือ ความต้านทานหน่วง D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลม

S คือ ระยะช่องว่าง

ค่า UH ที่ระยะช่องว่างทรงกลมใดๆ ที่สภาวะมาตรฐานหาได้จากตารางในมาตรฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวัดแรงดันด้วยช่องว่างทรงกลม เช่น มาตรฐาน IEC 60052 ดังที่ได้นำมาแสดงไว้ในภาคผนวก ค ถ้านำค่า UH ที่ได้ดังกล่าวมาเขียนกราฟในเทอมของ UL เส้นกราฟแบ่งเทียบที่ได้จะเป็นค่าที่สภาวะมาตรฐานดังรูปที่ 4 ฉะนั้นเมื่อนำเอาเส้นกราฟนี้ไปใช้ประกอบกับช่องว่างทรงกลมวัดแรงดัน ถ้าต้องการทราบค่าแรงดันที่สภาพห้องจะต้องใช้ตัวประกอบแปลงผันความหนาแน่นอากาศและตัวประกอบแปลงผันความชื้นดังแสดงไว้ในสมการที่ 3



รูปที่ 4 เส้นกราฟแบ่งเทียบมาตรฐาน

เมื่อ

UL คือ แรงดันด้านแรงต่ำอ่านจากโวลต์มิเตอร์ (V)

UH คือ แรงดันสูงที่ใช้ทดสอบ (kV)

3. ชุดทดสอบ เครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรง 600 kV, 10mA ของ สจล. [6]

แหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงกระแสตรง (DC High-Voltage) ขนาดพิกัด 600 kV, 10 mA พร้อมด้วยชุดควบคุมการทำงาน และชุดเครื่องมือวัด เครื่องมือชุดนี้ได้รับการสนับสนุนจากรัฐบาลญี่ปุ่นในยุคเริ่มก่อตั้งห้องปฏิบัติการ ปัจจุบันเครื่องมือ

นี้ ได้รับการดูแลรักษาเป็นอย่างดีและยังสามารถใช้งานได้ตามปกติ ใช้งานสำหรับการศึกษาวิจัยและการทดสอบคุณสมบัติของฉนวนทางไฟฟ้าแรงสูง

3.1 ขนาดพิกัดของเครื่อง

- อินพุตแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 0-220 V
- เอาท์พุทแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 0-600 kV
- กระแสเอาท์พุทสูงสุด 10 mA
- ชนิดของแรงดันเอาท์พุทเป็นแบบ Negative



รูปที่ 5 เครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรง

3.2 แกบทรงกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 เซนติเมตร

เซนติเมตร

แกบทรงกลม ได้มาพร้อมกันกับเครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรง แกบทรงกลมที่ใช้อยู่เป็นแกบทรงกลมแนวตั้ง ซึ่งยังสามารถใช้งานได้แต่มีปัญหาเรื่องรอยบุบมุม ซึ่งอาจจะทำให้การทดสอบที่ได้ผิดพลาดไปบ้าง



รูปที่ 6 แกบทรงกลมมาตรฐานเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 เซนติเมตร

STANDARD SPHERE GAP

TYPE: G-250 V

DIAMETER 250 mm.

DATE 3.1982.

Pulse Electronic Engineering CO.,Ltd. JAPAN

3.3 ตู้ควบคุม



รูปที่ 7 ตู้ควบคุมการป้อนแรงดันให้กับ
เครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรงเมื่อ

- 1 คือ มิเตอร์สำหรับวัดแรงดันอินพุท 9 คือ ปุ่ม INDICATOR RESET
- 2 คือ Input Voltage Meter 10 คือ ปุ่ม PREPARE
- 3 คือ Input Current Meter 11 คือ ปุ่ม ON
- 4 คือ Output Voltage Meter 12 คือ ชุดปรับขนาดแรงดันแบบละเอียด
- 5 คือ Output Current Meter 13 คือ ชุดปรับขนาดแรงดันแบบหยาบ
- 6 คือ หลอดแสดงสถานะ การทำงาน 14 คือ EMERGENCY STOP
- 7 คือ ปุ่ม OFF 15 คือ Power Source Circuit Breaker
- 8 คือ ปุ่ม ALARMS STOP 16 คือ Control Source Circuit Breaker

ขั้นตอนและวิธีการควบคุมชุดควบคุมเพื่อทำการทดสอบ

1. เปิดไฟให้สัญญาณว่าจะทำการทดสอบ และกดกริ่งเพื่อให้ผู้ที่อยู่ในบริเวณนั้นทราบ
2. เปิดสวิตเซอร์กิตเบรกเกอร์เมน
3. เปิดสวิตเซอร์กิตเบรกเกอร์ของวงจรกำลัง
4. เปิดสวิตเซอร์กิตเบรกเกอร์ของวงจรชุดคอนโทรล
5. ทำการหมุนชุดปรับขนาดแรงดันแบบปรับละเอียดให้อยู่ในตำแหน่งศูนย์ทุกครั้งก่อนทำการทดสอบ จนกระทั่งปุ่ม Low Limit มีไฟสว่างขึ้น
6. กดปุ่ม Prepare
7. กดปุ่ม ON
8. เพิ่มแรงดันที่ชุดควบคุมด้วยชุดปรับแรงดันแบบปรับหยาบ จนถึงค่าประมาณ 75%ของค่าแรงดันที่คาดหวัง แล้วจึงทำการปรับละเอียดจนเกิดเบรกดาวน์
9. เมื่อเกิดเบรกดาวน์ที่ช่องว่างทรงกลม ให้รีบกดปุ่ม EMERGENCY STOP แล้วรีบลดแรงดันลง โดยการหมุนชุดปรับขนาดแรงดันแบบปรับหยาบและแบบปรับละเอียดให้กลับสู่ตำแหน่งศูนย์จนกระทั่งปุ่ม Low Limit มีไฟสว่างขึ้น
10. กดปุ่ม OFF และกดปุ่ม Indicator reset

4. การทดลอง

การทดลองตอนที่ 1.1 การปรับเทียบระบบวัดแรงดันสูง กระแสตรงด้วยช่องว่างทรงกลม (เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 เซนติเมตร)

1. สภาพบรรยากาศการทดลอง

อุณหภูมิ.....oC
ความชื้นสัมพัทธ์.....%
ความดันบรรยากาศ.....mmHg
ความชื้นสัมบูรณ์.....gm

2. ต่อดวงจรการทดลองดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 การต่อวงจรการปรับเทียบระบบวัดแรงดันสูง

จากรูปที่ 8 เมื่อ

- 1 คือ แกปทรงกลมมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 เซนติเมตร
- 2 คือ ตัวต้านทานน้ำ
- 3 คือ ตัวนำโตะทรงกระบอกกลวง ช่วยลดการเกิดโคโรนา
- 4 คือ ตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

3. ปรับระยะช่องว่างอากาศเท่ากับ 3 เซนติเมตร ค่อยๆ บ้อนแรงดันจนเกิดการเบรกดาวน์ บันทึกค่าแรงดันจากเครื่องมือวัดแรงดันต่ำในตารางที่ 3 โดยทำซ้ำกัน 10 ครั้ง

4. หาค่าเฉลี่ยของแรงดันเบรกดาวน์ในตารางที่ 3 ออกมา บันทึกค่าในตารางที่ 4 และบันทึกค่าแรงดันสูงจากตารางมาตรฐานลงไปด้วย

5. ปรับระยะช่องว่างอากาศเป็น 6,9,12 และ 15 เซนติเมตร ตามลำดับและทำซ้ำข้อ 3 และ 4

6. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านแรงต่ำที่อ่านจากโวลท์มิเตอร์กับแรงดันสูงที่ใช้ในการทดสอบจากตารางที่ 4

การทดลองที่ 1.2 การวัดแรงดันกระแสตรงด้วยช่องว่างทรงกลม

1. สภาพบรรยากาศการทดลอง
อุณหภูมิ..... $^{\circ}\text{C}$

ความชื้นสัมพัทธ์.....%

ความดันบรรยากาศ.....mmHg

ความชื้นสัมบูรณ์..... gm-3

2. ต่อวงจรการทดลองดังรูปที่ 9 โดยให้ใช้วัสดุทดสอบเป็นลูกถ้วยฉนวนแบบพินโพส



รูปที่ 9 การต่อวงจรวัดแรงดันสูงกระแสตรงด้วยช่องว่างทรงกลม

จากรูปที่ 9 เมื่อ

- 1 คือ โวลท์เตจดีไวเดอร์
- 2 คือ แกปทรงกลมมาตรฐานเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 25 เซนติเมตร
- 3 คือ ลูกถ้วยฉนวนที่ใช้ทดสอบ
- 4 คือ ตัวต้านทานน้ำ
- 5 คือ ตัวนำโตะทรงกระบอกกลวง ช่วยลดการเกิดโคโรนา
- 6 คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

3. ป้อนแรงดันจนเกิดวาทไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนบันทึกค่าแรงดันทางด้านแรงต่ำในตารางที่ 5 และบันทึกค่าแรงดันที่อ่านได้จากโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบตัวต้านทานในตารางที่ 6 โดยที่โวลต์เตจดีไวเดอร์มีอัตราส่วนเท่ากับ.....

4. ทำจนครบ 5 ครั้งหาค่าแรงดันวาทไฟตามผิวเฉลี่ย

5. คำนวณหาค่าแรงดันวาทไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนที่สภาวะห้องทดลอง

ตารางที่ 3 ผลการทดลองตอนที่ 9

ระยะแก๊ป (ซม.)	ค่าแรงดันที่อ่านได้จากด้านแรงดันต่ำ (V)										ค่าเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ครั้งที่ 7	ครั้งที่ 8	ครั้งที่ 9	ครั้งที่ 10	
3											
6											
9											
12											
15											

เกิดสปาร์คขึ้นได้ที่แรงดันต่างๆ ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนของการเบรคดาวน์จึงมีค่ามาก มีความคลาดเคลื่อนอยู่ถึง $\pm 5\%$ ถ้าใช้ช่องว่างชั่วคราวทรงกลม (Rod Gap) ความคลาดเคลื่อนจะน้อยลง แต่มีข้อเสียที่แรงดันเบรคดาวน์เปลี่ยนแปลงไปตามความชื้นได้ง่าย ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดสปาร์คหรือเบรคดาวน์ขึ้นอยู่กับความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของอากาศ หรือก๊าซ ระยะห่างระหว่างทรงกลมและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกลม นั่นคือ

$$V_b = f(d, D, \delta)$$

V_b คือ แรงดันที่ทำให้เกิดสปาร์ค

d คือ ระยะช่องว่างระหว่างทรงกลม

D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกลม

δ คือ ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของ

อากาศขึ้นอยู่กับความดันบรรยากาศ

3. วิธีดำเนินการ

3.1 การเตรียมอุปกรณ์

3.1.1 เตรียมไม้อัดตัดขนาด กว้าง 50

เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตร

ตารางที่ 4 ผลการทดลองการปรับเทียบระบบวัด

ระยะแก๊ป (ซม.)	ค่าแรงดันเบรคดาวน์	
	$U_{LV}(V)$	U_b (สภาวะมาตรฐาน(15°C))
3		
6		
9		
12		
15		



รูปที่ 3.1.1 ไม้อัดที่ใช้ในโครงการงาน

3.1.2 เตรียมแผ่นอาคีลิก ตัดขนาด

กว้าง 50 เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตร และเตรียม

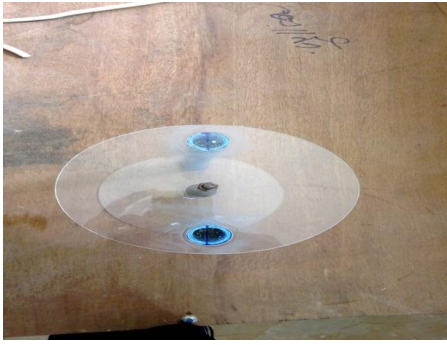
แผ่นอาคีลิกตัดให้เป็นรูปวงกลมใช้เส้นผ่านศูนย์กลาง

15 เซนติเมตร

การวัดไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสดตรงโดยวิธีช่องว่างทรงกลม

สำหรับในกรณีของแรงดันกระแสดตรง ฝุ่นละอองใน

อากาศจะเรียงตัวกันเป็นแนวเดียวกันกับสนามไฟฟ้าทำให้



รูปที่ 3.1.2 แผ่นอะคริลิกที่นำมาใช้งาน

3.1.3 สายไฟที่ใช้การทำโครงการนี้ใช้สาย VAF 2x2.5 ทนแรงดัน 75°C ทนกระแสได้ 20A ดังรูปที่ 3.1.3



รูปที่ 3.1.3 สายไฟ VAF 2x2.

3.1.4 ลูกโลหะทรงกลมใช้เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร นำมาเจาะรูเพื่อให้สะดวกต่อการใช้งานและเหล็กยาว 12 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.1.4



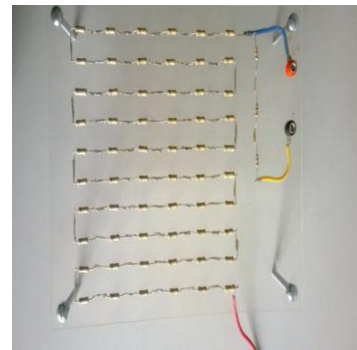
รูปที่ 3.1.4 ลูกโลหะทรงกลมและเหล็ก

3.1.5 ท่อ PVC โปรงตัดขนาน ยาว 20 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.1.5



รูปที่ 3.1.5 ท่อ PVC โปรง

3.1.6 ตัวต้านทาน 500 K Ω 1W 1% จำนวน 60 ตัว และ 100 K Ω 0.5 W 1% จำนวน 3 ตัว นำมาต่อแบบอนุกรมสามารถดูได้ดังรูปที่ 3.1.6



รูปที่ 3.1.6 ตัวต้านทาน

3.1.7 ชุดโพลีคาร์บอเนตที่ใช้ในโครงการ ดังรูปภาพที่ 3.1.7



3.1.7 ชุดโพลิตซ์

3.1.8 หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในโครงการ ดังรูปภาพที่ 3.1.8



3.1.8 หม้อแปลงไฟฟ้า

4. ผลการทดลอง

4.1 การดำเนินโครงการ เรื่อง เครื่องวัดแรงดัน ด้วยโลหะทรงกลม ซึ่งผลงานสามารถดูได้ ดังรูปที่ 4.1



เราจะมี การตรวจเช็คระบบและการทำงานต่อไปนี้

4.2 ตารางการตรวจเช็คระยะเวลาแกป

ลำดับ	V ต่ำ	V สูง
1	35	32.29
2	34	32.65
3	33	32.59
4	33	32.29
5	34	32.59
6	35	31.59
7	33	32.59
8	34	32.09
9	33	31.29
10	34	33.29

การวัดระยะเวลาแกป 2 มม

ลำดับ	V ต่ำ	V สูง
1	60	50.64
2	59	51.98
3	59	51.39
4	60	52.29
5	59	52.59
6	55	49.39
7	55	49.29
8	55	48.54
9	55	49.42
10	55	49.49

การวัดระยะเวลาแกป 3 มม

ลำดับ	V ต่ำ	V สูง
1	80	57.3
2	85	57.3
3	86	57.20
4	85	62.6
5	84	58.09
6	84	57.36
7	84	57.2
8	85	58.02
9	84	56.40
10	84	56.36

การวัดระยะแบบ 3. mm

ลำดับ	V ต่ำ	V สูง
1	190	117.06
2	190	119.05
3	190	120.3
4	189	119.00
5	190	119.00
6	185	119.0
7	189	118.0
8	189	117.0
9	189	118.2
10	189	118.2

การวัดระยะแบบ 6 mm

กะทัดรัดซึ่งสะดวกในการย้ายเคลื่อนที่ และเหมาะกับการนำไปใช้งาน

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 แผ่นอาศลิคมีขนาดบางจึงเสี่ยงต่อการเกิดไฟฟ้าลัดวงจรอาจทำให้ไฟช็อต หรืออาจดูดเอาได้ ควรใช้แผ่นอาศลิคที่มีขนาดหนามากกว่านี้

5.2.2 ท่อ PVC โปรง เบาและบางจนเกินไป ควรใช้ท่อ PVC แบบตัน

อ้างอิง

หนังสือเรียนวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และศึกษาค้นข้อมูลจากอินเทอร์เน็ต
www.kmitl.ac.th/eeml/PDF/DC1..pdf
www.geocities.ws/highvolt_ubu/CIRCLE.htm

4.3 ทดลองใช้เครื่องวัดแรงดันด้วยโลหะทรงกลม มีการใช้งานได้ตามปกติสามารถนำมาใช้งานวัดกระแสไฟฟ้าแรงสูง และใช้เป็นเครื่องมือสำหรับเป็นเครื่องประกอบการเรียนการสอน

5. สรุปและข้อเสนอแนะ

จากการจัดทำโครงการ เรื่องเครื่องมือวัดด้วยโลหะทรงกลม โดยจัดทำเป็นชุดโครงสร้างซึ่งดำเนินการเสร็จและสามารถนำไปใช้งานได้โดยจากการดำเนินงาน สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผล

5.1.1 เครื่องวัดแรงดันด้วยโลหะทรงกลมทำจากลูกโลหะทรงกลม และอุปกรณ์ อื่น ๆ ประกอบด้วย ไม้อัด แผ่นอาศลิค ตัวต้านทาน สายไฟ เหล็กและท่อ PVC ฯลฯ

5.1.2 เครื่องวัดแรงดันด้วยโลหะทรงกลมสามารถวัดค่าไฟฟ้าได้ทั้งกระแสตรง และกระแสสลับ

5.1.3 เครื่องวัดแรงดันด้วยโลหะทรงกลมนี้จัดทำเป็นชุดโครงสร้างที่มีขนาด

นายอัคราภูติ ดีโคตร

นักศึกษาสาขาวิชาช่างไฟฟ้า

วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมศรี

สงคราม มหาวิทยาลัยนครพนม