ชุดทดสอบไฟฟ้าแรงดัน
(AC High Voltage Testing Test)

กิตติพงษ์ วังวิสัย, อาจารย์ที่ปรึกษา เจษฎา สารสุข
สาขาวิชาช่างไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมศรีสงคราม มหาวิทยาลัยนครพนม
129 ม.7 ต.ศรีสงคราม อ.ศรีสงคราม จ.นครพนม 48150

บทคัดย่อ

โครงการฉบับนี้กล่าวถึงการศึกษาความสัมพันธ์ของผลของความชื้นในอากาศมีผลกระทบอย่างไรต่อการเกิดเบรกดาวน์ไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบ ตามมาตรฐาน IEC 60-1 (1989) ที่ซึ่งประเทศไทยบางครั้งมีความชื้นสัมบูรณ์ที่สภาวะความหนาแน่นมาตรฐานหรือ h/δ มีค่าสูงเกินขอบเขตการยอมรับการใช้สมการปรับแก้สภาวะบรรยากาศสำหรับไฟฟ้ากระแสตรงที่ไม่เกิน13 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร (อ้างอิงที่สูงมากกว่า 20g/m^3) เพื่อให้เกิดความชัดเจนจึงได้อ้างอิงแนวทางการศึกษาและขั้นตอนการปฏิบัติต่างๆตามมาตรฐาน IEC 60-1 (1989) การทดสอบได้เลือกวิธีแบบหลายระดับ (Multiple level) เพื่อทดสอบหาค่าแรงดัน $U_{50\%}$ ที่ความชื้นต่างๆกัน ตัวนำทดสอบชนิดแกปชนิดแท่งปลายแหลม-ระนาบมีระยะแกปทดสอบที่ 1,2, และ 3 มิลลิเมตร และตัวนำแกปทรงกลม-ทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร มีระยะแกปทดสอบที่ 1,2,3 และ 4 มิลลิเมตร

Abstract

This thesis aimed to study the relationship of the moisture result in the air that how affect to the negative DC electrical break down by the standard of IEC 60-1 (1989) that Thailand sometimes has the density humidity standard or h/δ the value exceeded the acceptable scope to the equation usage adjusted the atmospheric state for DC Electricity that not exceeding 13 grams per cubic meter (Referred that higher than 20g/m^3). For more clearly purpose thereby referred to the study guidance and a various practices by standard of IEC 60-1 (1989). The test was made by choosing a Multiple Level to test the pressure $U_{50\%}$ value at the different moisture. The tester was bar gap with point end-horizon with the test gap distance at 1, 2, and 3 mm. and the rounded lead gap-diameter 2 centimeters with the test gap distance at 1, 2, 3 and 4 mm. as well.

คำนำ

ปัจจุบันพลังงานที่สำคัญที่มนุษย์ใช้มีความหลากหลาย พลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานหนึ่งที่มนุษย์นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่พบเห็นได้ง่ายคือการส่งผ่านไปตามสายไฟฟ้าทั้ง

แรงสูงและแรงต่ำ ไปยังผู้บริโภค แต่การที่จะส่งจ่ายพลังงานโดยแนวทางปฏิบัติที่ใช้กันคือการส่งแบบแรงดันไฟฟ้าสูง ทั้งนี้เพื่อให้ความสูญเสียระหว่างทางน้อยที่สุด แต่ทั้งนี้แนวทางการปฏิบัติที่เกี่ยวกับการใช้งานพลังงานไฟฟ้าที่มีระดับแรงดันสูงๆซึ่งต้องอาศัยหลายๆองค์ประกอบเพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพสามารถดำเนินการได้รวมถึงการพิจารณาด้านความปลอดภัยต่างๆ เทคนิคและวิธีการฉนวนจึงเป็นส่วนประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งที่น่าสนใจ

โดยความสำคัญของฉนวนอากาศ ซึ่งบรรยากาศมีผลกระทบต่อฉนวนโดยเฉพาะประเทศที่มีความชื้นสูง ซึ่งมาตรฐานกำหนด IEC 60-1 สูงสุดที่ 15 g/m^3 DC = 13 g/m^3 แต่ในประเทศไทยมีความชื้นสูงกว่ามาก โดยส่วนมากอยู่ในระหว่าง 15-30 g/m^3 ดังนั้นจึงสนใจที่จะศึกษาการเกิดเบรกดาวน์ของแรงดัน AC และ DC เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลผลของความชื้น ที่ความชื้นสูงโดยใช้แก๊ปแท่งปลายแหลมระนาบและแก๊ปทรงกลม-ทรงกลม ภายใต้ฉนวนอากาศ

2. ทฤษฎีและหลักการ

2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีเกี่ยวกับผลของความชื้นที่ส่งผลต่อแรงดันเบรกดาวน์ ซึ่งจะมีหัวข้อหลักๆอยู่หลายหัวข้อด้วยกัน ก่อนที่จะทราบถึงคุณลักษณะต่างๆของผลของความชื้นที่ส่งผลต่อแรงดันเบรกดาวน์นั้นจำเป็นต้องทราบทฤษฎีประกอบด้วย ซึ่งในโครงงานนี้จะได้กล่าวถึงส่วนต่างๆของทฤษฎีดังนี้คือ การเกิดเบรกดาวน์ การวัดแรงดันสูงด้วยแกปชนิดแท่งปลายปลายแหลม-ระนาบและแก๊ปชนิดทรงกลม-ทรงกลม ผลของความชื้นต่อแรงดันเบรกดาวน์โวลเตจดไวเดอร์

2.2 การเกิดเบรกดาวน์

ลักษณะสมบัติของวัสดุฉนวนนับว่ามีความสำคัญยิ่งต่อเทคนิคการฉนวนด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ความชื้นนั้นเป็นฉนวนชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญต่อเทคนิคการฉนวน สภาพการเป็นฉนวนอย่างสมบูรณ์ของความชื้นจะเสียไปเมื่อมีดีสชาร์จ (Discharge) ในความชื้นเกิดขึ้น ดีสชาร์จในความชื้นเป็นการอธิบายปรากฏการณ์การไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านความชื้น

2.2.1 การเกิดเบรกดาวน์แบบสมบูรณ์

เบรกดาวน์แบบสมบูรณ์ (Complete Breakdown) หมายถึงการเกิดเบรกดาวน์ตลอดแกปเชื่อมโยงระหว่างอิเล็กโตรด ทำให้วัสดุฉนวนเสียสภาพการฉนวนโดยสิ้นเชิง แรงดันที่ตกคร่อมอิเล็กโตรดจะมีค่าน้อยและมีกระแสสูงมากไหลตามแนวที่เกิดเบรกดาวน์ซึ่งค่ากระแสเบรกดาวน์นี้ขึ้นอยู่กับวงจรไฟฟ้า เรียกแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์สมบูรณ์ว่าแรงดันเบรกดาวน์ Ub (Breakdown Voltage)

2.2.2 การเกิดเบรกดาวน์เพียงบางส่วน

เบรกดาวน์เพียงบางส่วน (Partial Breakdown) หรือเบรกดาวน์ไม่สมบูรณ์จะเกิดขึ้นกับระบบฉนวนที่มีสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูง เบรกดาวน์เพียงบางส่วนจะเกิดก่อนเบรกดาวน์สมบูรณ์ โดยเป็นการเกิดไอออไนเซชั่นในแกปเพียงบางส่วน เช่น ดีสชาร์จแบบโคโรน่า เรียกแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์บางส่วนว่า แรงดันเริ่มเกิด Ui (Inception Voltage)

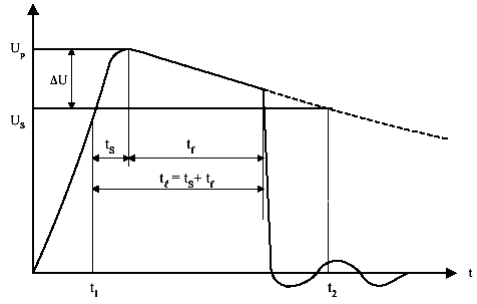
2.2.3 กลไกการเกิดเบรกดาวน์

การเกิดเบรกดาวน์ หมายถึง การเปลี่ยนสภาพการฉนวนไปสู่สภาพนำไฟฟ้าคือเป็นช่วงต่อระหว่างสถานภาพที่กระแสไหลประทังตัวเองไม่ได้ (Nonself-sustained) ไปสู่สถานภาพที่กระแสไหลประทังตัวเองได้ (Self-sustained) ช่วงต่อดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้เมื่อใน

อิเล็กโตรดมีจำนวนอิเล็กตรอนหรือไอออนมากพอจนทำให้อิเล็กโตรดมีสภาพนำไฟฟ้าสูงและโดยทฤษฎีแล้วกระแสไหลเป็นค่าอนันต์ คือกระแสจะถูกจำกัดด้วยค่าของวงจรภายนอกเท่านั้น

2.3 การเบรกดาวน์ของแรงดันอิมพัลส์

แรงดันกระแสสลับ หรือ แรงดันกระแสตรงเป็นกรณีของแรงดันอยู่ตัว (steady statevoltage) แรงดันที่ป้อนมีค่าคงตัว Ub แต่แรงดันอิมพัลส์ แรงดันจะคงอยู่ในช่วงระยะเวลาอันสั้นนั่นคือ สนามไฟฟ้าจะคงอยู่ในเวลาอันสั้นด้วย เมื่อขนาดของ แรงดันอิมพัลส์เท่ากับขนาดของแรงดันอยู่ตัวที่ควรจะเกิดเบรกดาวน์ได้แต่ปรากฏว่ายังไม่เกิดเบรกดาวน์ จะต้องรอเวลาอีกช่วงระยะหนึ่งเบรกดาวน์จึงจะเกิดขึ้นได้ ช่วงเวลานับตั้งแต่ขนาดของแรงดันอิมพัลส์เท่ากับแรงดันสถานะอยู่ตัวไปจนถึงเวลาเบรกดาวน์เกิดขึ้นจริงของแรงดันอิมพัลส์เรียกว่า เวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวน์ t_1



รูปที่ 2.1 เวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวน์ t_1 [4]

2.3.1 เวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวน์

เวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวน์ t_1 (Time lag of Breakdown) ในแรงดันอิมพัลส์นั้นสนามไฟฟ้าคงอยู่ในช่วงเวลาเพียงไมโครวินาที อิเล็กตรอนที่พอเหมาะจากธรรมชาติ อาจจะไม่เพียงพอที่จะเริ่มต้นทำให้เกิดอะวาลานซ์ไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ได้ ขึ้นอยู่กับปริมาตรของช่องว่างอากาศที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงพอ อิเล็กตรอน ที่อยู่ในปริมาตรของช่องว่างอากาศกระจายเป็นสถิติ ฉะนั้น ตั้งแต่แรงดันอิมพัลส์เพิ่มสูงเท่ากับแรงดันสถานะคงตัว Us จนกระทั่งพบอิเล็กตรอนเริ่มต้น จึงเป็นสถิติด้วย เรียกว่า เวลาล่าช้าสถิติ ts (Statistic time lag) เมื่อพบอิเล็กตรอนเริ่มต้น แล้วจะต้องใช้เวลาในการไอออไนเซชั่น สร้างอะวาลานซ์ตามกระบวนการกลไกเบรกดาวน์เพื่อให้ได้อิเล็กตรอนตามเงื่อนไข ช่วงเวลานี้เรียกว่า เวลาล่าช้าก่อตัว tf (formative timelag) จะเห็นว่าเวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวน์ประกอบด้วย

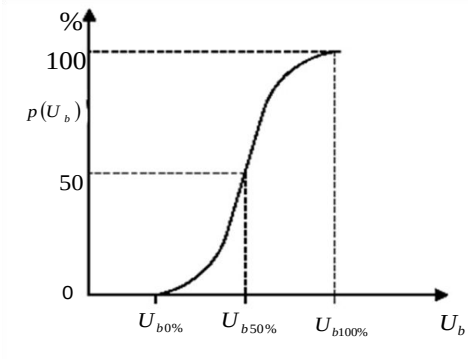
เวลาล่าช้ารวม $t_1 = t_s + t_f$ (2.2)

แรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์ Up จะต้องมีค่าสูงกว่าแรงดันเบรกดาวน์สถานะอยู่ตัว Us โดยอัตราส่วนแรงดัน Up ต่อแรงดัน Us คือ Up / Us เรียกว่าอัตราส่วนอิมพัลส์ (Impulse Ratio)Us = Static Breakdown Voltage (กระแสสลับ หรือ กระแสตรง)Up = ค่ายอดแรงดันอิมพัลส์Up - Us เรียกว่า แรงดันเกินอัตราส่วน Up / Us และ Up - Us มีประโยชน์ในการออกแบบอุปกรณ์ป้องกันแรงดันอิมพัลส์มีความชันสูง (dU/dt) ช่วงเวลาหน้าคลื่นสั้นหรือเวลาที่แรงดันเพิ่มขึ้นถึงค่ายอดแล้วลดลงก็ยิ่งสั้น แสดงว่าสนามไฟฟ้าคงอยู่สั้นมาก โอกาสเกิดเบรกดาวน์ก็น้อยลง จะให้เกิดเบรกดาวน์ต้องเพิ่มความเครียดสนามไฟฟ้าซึ่งก็คือเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้นนั่นเอง

2.3.2 ความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวน์

การป้อนแรงดันให้กับอุปกรณ์ทดสอบที่ระดับแรงดันหนึ่งมีโอกาสทีจะเกิดเบรกดาวน์หรือไม่เกิดก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระดับแรงดันป้อน โดยค่ายอดแรงดันอิมพัลส์สูงสุดที่ไม่ว่าจะป้อนแรงดันอิมพัลส์ที่ระดับแรงดันนี้กี่ครั้งก็ไม่ทำให้เกิดการเบรกดาวน์ได้เลย เราเรียกระดับค่ายอดแรงดันนั้นว่า $U_{0\%}$ หรือค่าคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ (Impulse Withstand Voltage) นั่นคือ

ค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ที่มีโอกาสเบรกดาวน์เป็น 0% ซึ่งเป็นค่าที่กำหนดการทดสอบการฉนวนที่ต้องทนต่อแรงดันอิมพัลส์ได้ (Basic Impulse Insulation Level,BIL) แต่เมื่อเพิ่มค่ายอดแรงดันขึ้นเรื่อยๆจนค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ต่ำสุดค่าหนึ่งที่ไม่ว่าจะป้อนแรงดันกี่ครั้งก็จะเกิดเบรกดาวน์ขึ้นทุกครั้งเราเรียกระดับแรงดันนั้นว่า $U_{100\%}$ หรือเรียกว่าระดับแรงดันป้องกัน (Protective Level) ซึ่งก็คือค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ที่มีโอกาสเบรกดาวน์เป็น 100% ถ้าเพิ่มแรงดันสูงกว่าแรงดัน $U_{100\%}$ นี้ก็จะเกิดเบรกดาวน์ทุกครั้งและ $U_{50\%}$ คือ ค่ายอดแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์เป็นจำนวนครั้งครึ่งหนึ่งของจำนวนครั้งที่ป้อนทั้งหมด แสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ความน่าจะเป็นในการเกิดแรงดันเบรกดาวน์ $U_{50\%}$ [1]

ถ้าข้อมูลแรงดันเบรกดาวน์มีจำนวนน้อยฟังก์ชันการกระจายของแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ อาจจะไม่เป็นฟังก์ชันการกระจายแบบปกติ เช่น เป็นแบบล็อกปกติแบบเอ็กซ์โปเน็นเชียลหรือแบบอื่นๆแต่อาจแทนการกระจายของข้อมูลนี้ด้วยฟังก์ชันการกระจายแบบปกติได้เพราะให้ผลการคำนวณค่า $U_{50\%}$ และ σ ไม่ผิดพลาดมากนักเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณจากฟังก์ชันที่ถูกต้องจึงถือได้ว่าฟังก์ชันกระจายของแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์มีลักษณะเป็นฟังก์ชันการกระจายแบบปกติ (Normal Distribution) ซึ่งสามารถหาค่า $U_{0\%}$ และ $U_{100\%}$ ได้โดย

$$U_{0\%} = U_{50\%} - 3\sigma \qquad (2.3)$$

$$U_{100\%} = U_{50\%} + 3\sigma \qquad (2.4)$$

σ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งสามารถหาค่า $U_{50\%}$ และ σ จากการทดลองได้หลายวิธีด้วยกัน วิธีการทดลองที่นิยมใช้หาคือ วิธีเส้นกราฟแรงดันหลายระดับ, วิธีปรับขึ้นลง ซึ่งจะกล่าวถึงในบทต่อไปนอกจากนี้ข้อมูลที่ได้จากทั้ง 2 วิธีข้างต้นสามารถใช้วิธี Maximum Likelihood Methodซึ่งเป็นวิธีทางคณิตศาสตร์คำนวณหาค่า $U_{50\%}$ และ σ ได้โดยตรงโดยไม่ต้องใช้กราฟทางสถิติ (วิธีคำนวณแสดงใน ภาคผนวก ข.)

2.4 การวัดแรงดันสูงด้วยแก๊ปชนิดแท่งปลายปลายแหลม-ระนาบและแก๊ปชนิดทรงกลม-ทรงกลม

2.4.1 แกปทรงกลม

การวัดแรงดันสูงด้วยแกปทรงกลม เป็นวิธีที่ง่ายและมีความแน่นอนเชื่อถือได้ โดยอาศัยการเกิดสปาร์กหรือเบรกดาวน์ระหว่างทรงกลมโลหะ ที่วางอยู่ในอากาศ หรือ ความชื้น ซึ่งเป็นไปตามกฎการเกิดดีสชาร์จของความชื้น คือสปาร์กหรือเบรกดาวน์จะเกิดขึ้น เมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าถึงค่าหนึ่ง นั่นก็คือจะเกิดเบรกดาวน์ขึ้นเมื่อแรงดันสูงถึงค่า ๆ หนึ่ง ซึ่งเป็นค่าแรงดันเบรกดาวน์สถิติ(Statistic Breakdown Voltage) ที่ทราบค่าความคลาดเคลื่อนแน่นอน ทำซ้ำเดิมได้

2.4.2 ลักษณะสมบัติของแกปอากาศทรงกลม

- สนามไฟฟ้าระหว่างทรงกลมที่เท่ากันจะมีลักษณะเกือบสม่ำเสมอ ถ้าระยะช่องแกป S น้อยกว่าครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลาง D ($S < D/2$)

- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมาตรฐานตั้งแต่ 2 ซม. ถึง 200 ซม. ดังแสดงในตาราง 2.1

ตารางที่ 2.1 ขนาดทรงกลมมาตรฐานและระยะแกปวัดแรงดัน [1]

ที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตามมาตรฐาน (cm)	ระยะแกป S ห่างไม่เกิน (cm)	วัดแรงดันได้สูงสุด (kV)
1	2	1	30.7
2	5	2.5	65.5
3	6.25	3	79.5
4	10	5	123
5	12.5	6	146
6	15	7.5	177
7	25	12	275
8	50	25	515
9	75	36	750
10	100	50	1010
11	150	75	1440
12	200	100	1840

- เป็นอุปกรณ์วัดที่ไม่มีตัวชี้จะสังเกตได้จากการเกิดสปาร์กหรือเบรกดาวน์

- วัดได้ทั้ง กระแสตรง,กระแสสลับ และ แรงดันอิมพัลส์

- มีความถูกต้องเที่ยงตรง ± 3 %

ค่าแรงดันเบรกดาวน์ของแกปทรงกลม จะมีความถูกต้องตามเกณฑ์ดังกล่าวเมื่อ S ≤ D/2ฉะนั้นการเลือกขนาดทรงกลมจึงขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันที่ต้องการวัด ทรงกลมแต่ละขนาดวัดแรงดันได้สูงสุด ดังแสดงในตารางที่ 2.1

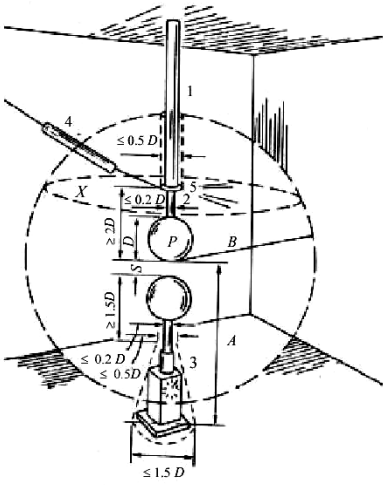
2.4.3 มาตรฐาน IEC 60052

ในการวิจัยนี้ได้ใช้มาตรฐาน IEC 60052 อันเป็นมาตรฐานสากล ในการทดลองและอ้างอิงศึกษาวิจัย

2.4.3.1 ข้อกำหนดเกี่ยวกับทรงกลม

มาตรฐานได้กำหนดไว้ว่าทรงกลมที่จะใช้ทำแกปทรงกลมนั้นจะต้องมีค่าความคลาดเคลื่อนของเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 2 % และควรจะเรียบมาก โดยเฉพาะในพื้นที่ 0.3D ซึ่งวัดโดยใช้จุด สปาร์ก P เป็นจุดศูนย์กลาง ผิวทรงกลมจะต้องสะอาดปราศจากฝุ่นละออง คราบมันหรือสารที่ใช้เคลือบ นอกจากนั้นยังต้องแห้งสนิทและจะไม่ใช้แกปทรงกลมมาตรฐานวัดแรงดันเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเกิน 90% เนื่องจากไอน้ำในอากาศอาจกลั่นตัวมาเกาะที่ผิวทรงกลม ทำให้สนามไฟฟ้าระหว่างแกปทรงกลมมีการเปลี่ยนแปลง

ระยะ A และ B (ดูรูปที่ 2.3 และรูปที่ 2.4 ประกอบ) เป็นค่าที่มีความสำคัญมาก เนื่องจากระยะดังกล่าวเป็นตัวกำหนดพื้นที่ว่างที่ต้องการในการทดสอบ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือระยะที่จะต้องไม่มีวัตถุใดซึ่งสามารถจะทำให้สนามไฟฟ้าระหว่างแกปทรงกลมมีการเปลี่ยนแปลง ระยะ Aและ B ได้กำหนดตามมาตรฐาน IEC แสดงดังตารางที่ 2.1 (เมื่อ S คือ ระยะห่างของแกปทรงกลม)



รูปที่ 2.3 การติดตั้งแกปทรงกลม > 25 cm Φ แนวตั้ง [4]

ความหมายของสัญลักษณ์ในรูปทั้งสอง

1 ฉนวนรองรับ

2 ก้านยึดทรงกลม

3 เกียร์ขับเคลื่อนทรงกลมเพื่อปรับระยะ

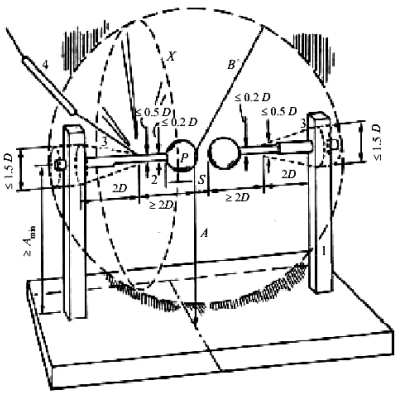
4 สายแรงสูงต่อกับความต้านทานหน่วง

5 ที่ต่อสายแรงสูง

P จุดที่เกิดสปาร์กของแกปทรงกลม

A ความสูงของ P เหนือพื้นดิน

B รัศมีของย่านปลอดภัยจากวัตถุอื่นใดฉะนั้น ความต้านทานหน่วงจะต้องอยู่เหนือระนาบ X



รูปที่ 2.4 การติดตั้งแกปทรงกลม ≤ 25 cm Φ แนวนอน [4]

ตารางที่ 2.2 ระยะ A และ B ตามมาตรฐาน IEC 60052 [1]

เส้นผ่านศูนย์กลาง D (cm)	ค่าที่น้อยที่สุดของความสูง A	ค่าที่มากที่สุดของความสูง A	ค่าที่น้อยที่สุดของระยะ B
≤ 6.25	7D	9D	14S
10-15	6D	8D	12S
25	5D	7D	10S
50	4D	6D	8S
75	4D	6D	8D
100	3.5D	5D	7S
150	3D	4D	6S
200	3D	4D	6S

2.4.3.2 ข้อพึงปฏิบัติในการใช้แกปทรงกลม

- ต้องติดตั้งและยึดตามมาตรฐาน IEC 60052 แนะนำไว้ ถ้าทรงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 25 เซนติเมตร มักจะติดตั้งในแนวนอน ถ้าใหญ่กว่า 25 เซนติเมตร มักจะติดตั้งในแนวตั้ง ดังรูป 2.3 และรูปที่ 2.4

- ระยะห่างระหว่างทรงกลมจะต้องไม่เกินครึ่งหนึ่งของ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลม

- กระแสที่เกิดจากการสปาร์กไม่ควรเกิน 1 แอมแปร์ โดยต่อความต้านทานอันดับไว้กับทรงกลมเพื่อจำกัดกระแส และความต้านทานตัวนี้จะทำหน้าที่หน่วง (damp) ความถี่สูง อันเกิดจากมี L และ C

- ควรจะตัดวงจรที่ป้อนแรงดันให้กับวงจรทันทีหลังจากเกิดสปาร์กแล้ว เพื่อป้องกันผิวทรงกลมเสีย

- ค่าที่ถือว่าถูกต้องนั้นได้จากการหาค่าเฉลี่ยจากการวัดหลายๆ ครั้ง (ประมาณ 5 ครั้ง) ค่าที่วัดได้ครั้งแรกมักจะมีค่าต่ำ อันเนื่องมาจากมีฝุ่นละอองที่ผิวของทรงกลม ดังนั้นก่อนใช้ควรขัดมันและทำความสะอาดพื้นผิว ทรงกลมก่อนเสมอ

2.4.3.3 การวัดแรงดันเบรกดาวน์ของแกปอากาศทรงกลม

การวัดแรงดันสูงด้วยแกปทรงกลมมาตรฐานเป็นการเปรียบเทียบค่าแรงดันสูงโดยอาศัยค่าแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ (เกิดสปาร์ก) ในอากาศระหว่างทรงกลม 2 ลูก ที่ระยะต่างๆกันขึ้นอยู่กับความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของอากาศ ระยะช่องว่างอากาศทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลม ,ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของอากาศ และตัวประกอบแก้ไขความชื้น คือ

$$U_b = f(S,D,\delta,k) \quad (2.5)$$

เมื่อ U_b เป็นค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่ความหนาแน่นอากาศสัมพัทธ์ (δ)

ตามมาตรฐาน IEC 60052 ได้กำหนดค่าแรงดันเบรกดาวน์ของแกปอากาศ ระหว่างทรงกลมไว้ที่สภาวะมาตรฐาน คือ

- อุณหภูมิ t_0 = 20 องศาเซลเซียส
- ความดันอากาศ P_0 = 760 มม.ปรอท (101.3 kPa)
- ความชื้นสัมบูรณ์ h = 8.5 g/m^3

ค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่ภาวะอากาศของห้องทดลอง สามารถหาได้จากการแปลงค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน (ภาคผนวก ค.) คือ

$$U_b = \delta.k.U_0 \quad (2.6)$$

เมื่อ U_0 = แรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ที่สภาวะมาตรฐาน

U_b = แรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ที่สภาวะอากาศของห้องทดลอง

δ คำนวณได้จากสมการ

$$\delta = \left(\frac{P}{Po}\right) \times \left(\frac{273+t_\circ}{273+t}\right) \quad (2.7)$$

โดยที่ P = ความดันของอากาศที่สภาวะทดสอบ,มีหน่วยเดียวกับ P_0

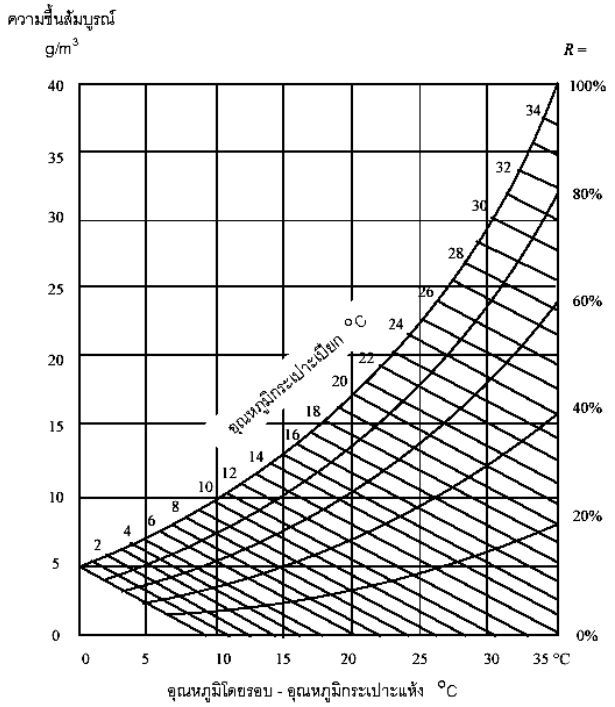
t = อุณหภูมิของห้องในขณะที่ทดสอบ เป็นองศาเซลเซียส

ที่สภาวะมาตรฐาน ความหนาแน่นอากาศสัมพัทธ์ (δ) = 1 โดยที่ δ แปรผันตามความดันของอากาศที่สภาวะทดสอบและผกผันกับอุณหภูมิของห้องในขณะที่ทดสอบ

การวัดแรงดันด้วยแกปทรงกลมตามมาตรฐาน IEC 60052 นั้นได้มีการคำนึงถึงผลของความชื้นในบรรยากาศด้วย กล่าวคือ ค่าแรงดันเบรกดาวน์ของแกปทรงกลมจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความชื้นสัมบูรณ์ด้วยอัตรา 0.2% ต่อ g/m3 ดังนั้นค่าตัวประกอบแก้ไขความชื้นสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.8)

$$K = 1 + \left(0.001 \times \left(\frac{h}{\delta} - 8.5\right)\right) \quad (2.8)$$

โดยที่ความชื้นสมบูรณ์ สามารถหาได้จากกราฟความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศในเทอมอุณหภูมิเทอร์โมมิเตอร์กระเปาะแห้งและเปียกของ Psychrometer แสดงดังรูป ที่ 2.5

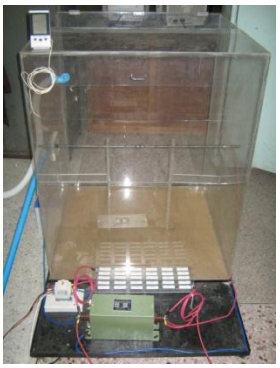


รูปที่ 2.5 กราฟอุณหภูมิกระเปาะแห้ง-กระเปาะเปียกเพื่อหาความชื้นสัมบูรณ์ [4]

3.วิธีการดำเนินงาน

3.1 โครงสร้างเครื่องทดสอบความชื้น

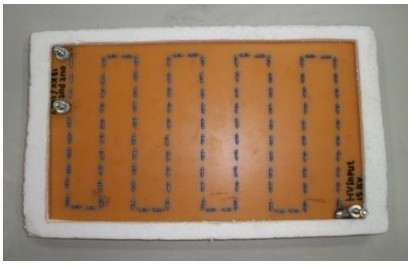
การออกแบบโครงสร้างเครื่องทดสอบความชื้นเราจะต้องพิจารณาถึงข้อกำหนดของอุปกรณ์แต่ละตัวด้วย เช่น ระยะห่างระหว่างตัวโครงกับแกปทรงกลมและหม้อแปลงไฟฟ้า เป็นต้นข้อกำหนดต่างๆ แสดงไว้ในบทที่ 2 สำหรับการออกแบบโครงสร้างเครื่องทดสอบความชื้นแสดงไว้ดังรูปที่ 3-3



รูปที่ 3.3 แสดงโครงสร้างเครื่องทดสอบฉนวนเหลว

3.2 โวลต์เตจดิไวเดอร์

โวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทานประกอบด้วยความต้านทานภาคแรงสูง R_1 และความต้านทานภาคแรงต่ำ R_2 ซึ่งเราจะต้องออกแบบโวลต์เตจดิไวเดอร์ที่พิกัดแรงดัน 15 kV ความต้านทานที่ใช้จะเป็นทำนองเดียวกับความต้านทานที่ใช้ต่ออันดับกับแอมมิเตอร์วัดแรงสูง คือจะต้องคำนึงถึงขีดจำกัดของกระแสที่ไหลผ่าน



รูปที่ 3.6 โวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทาน R

การออกแบบโวลเตจดิไวเดอร์

ภาคแรงดันสูง

เลือกตัวต้านทานขนาด 0.5 W 100kΩ โดยไม่ต้องการให้ชุดโวลเตจดิไวเดอร์เป็นโหลด จึงกำหนดกระแสที่ไหลผ่านชุดโวลเตจดิไวเดอร์ให้มีค่าน้อยกว่ากระแสที่ไหลผ่านชุดทดสอบ จึงกำหนดค่ากระแสที่จะผ่านชุดดิไวเดอร์ที่ขนาด 1.5mA ทำการคำนวณหากำลังไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานแต่ละตัว

จากสมการ $P = I^2R$

$= (1.5mA)^2 \times (100k\Omega)$

= 0.225 W

จะเห็นว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานแต่ละตัวนั้น ตัวต้านทานสามารถทนได้

การหาความต้านทานรวมทั้งหมด สามารถหาได้จากสมการ

$$R = V / I$$

$$R_T = \frac{15kV}{1.5mA} = 10\,M\Omega$$

$$\therefore R_T + R_1 + R_2$$

ภาคแรงดันต่ำ

สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$V = \left(\frac{R_1 + R_2}{R_2}\right) V_2$$

$$15kV = \left(\frac{10M\Omega}{R_2}\right) \times 100V$$

$$R_2 = \left(\frac{10M\Omega}{15kV}\right) \times 100V$$

$$R_2 = 66.67\ k\Omega$$

จากการคำนวณความต้านทานจะได้ว่า

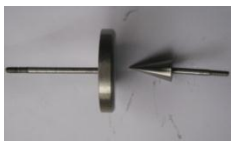
เลือกใช้ความต้านทาน 100 kΩ 0.5 W จำนวน 100 ตัว

เลือกใช้ความต้านทาน 33 kΩ 0.5 W จำนวน 3 ตัว

3.4.1 การออกแบบอิเล็กโตรด

ลักษณะของตัวนำที่ใช้ทดสอบนั้นเป็นเหล็กกลึงเรียบอย่างดี โดยตัวนำที่ใช้เป็นแบบทรงกลม-ทรงกลม และปลายแหลมระนาบแผ่นกลมเพื่อทดสอบหาค่าแรงดันเสียสภาพฉับพลับในสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ ซึ่งขนาดของตัวนำ

รูปที่ 3.12 แกปทรงกลม-ทรงกลม



รูปที่ 3.13 แกปแท่งปลายแหลม-ระนาบ

3.4.2 การตั้งระยะแกป

การตั้งระยะแกประหว่างอิเล็กโตรดตัวนำขั้นแรกนั้นจะต้องมีการปรับระยะศูนย์ โดยใช้โอห์มมิเตอร์วัดค่าความต้านทานที่แท่งตัวนำแรงสูงบริเวณจุดที่จ่ายไฟกับด้านกราวด์ โดยถ้าวัดความต้านทานได้เป็นศูนย์ก็แสดงว่าหน้าสัมผัสของอิเล็กโตรดทั้งสองด้านชิดกันพอดี ก็ตั้งค่าระยะแกปนี้ไว้เป็นระยะศูนย์ จากนั้นจึงปรับระยะแกปให้ได้ค่าตามที่ต้องการโดยใช้ไมโครมิเตอร์ที่มีความแม่นยำสูงเป็นตัวปรับผ่านแกนดันที่ทำทำลักษณะเป็นบาดันเพื่อให้ปรับตั้งระยะแกปได้โดยหมุนที่ตัวไมโครมิเตอร์โดยตรง

3.4.3 การเตรียมชุดทดสอบ

เพื่อเป็นการลดผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นความเรียบของอิเล็กโตรด การเจือปนของอากาศ และการรั่วไหลของความชื้นซึ่งมีผลต่อค่าแรงดันเสียสภาพฉับพลันและค่าสนามไฟฟ้าในการทดสอบ จึงได้มีการเตรียมการในการทดสอบดังต่อไปนี้

3.4.3.1 การเตรียมชุดทดสอบและการสร้างความชื้น

หลังจากประกอบชุดทดลองแล้ว ต้องสร้างความชื้นก่อนการทดสอบทุกครั้ง จะต้องตรวจสอบชุดทดลองว่ามีการรั่วของความชื้นออกมาหรือไม่ เครื่องสร้างความชื้นที่นำมาทดลองสามารถสร้างความชื้นอยู่ที่ 20%-90% พอได้ค่าความชื้นที่ต้องการแล้วเตรียมปรับระยะห่างของแกปแล้วก็เตรียมเครื่องวัดโวลเตจดิไวเดอร์แล้วจ่ายไฟ 15 KV เพื่อทำการทดลองวัดค่าแรงดันเบรกดาวน์

4.การทดลองและผลการทดลอง

4.2 การวัดแรงดันกระแสสลับด้วยช่องว่างแกปทรงกลม-ทรงกลมและแกปแท่งปลายแหลม-ระนาบ ที่สภาวะความชื้นสมบูรณ์ที่ 25 g/m^3

1. สภาพบรรยากาศการทดลอง

อุณหภูมิ 30 °C

ความชื้นสัมพัทธ์ 85 %

ความดันบรรยากาศ 750 mmHg

ความชื้นสัมบูรณ์ 25 g/m^3

2. ตารางทดสอบแสดงค่าแรงดันที่อ่านได้จากโวลท์เตจดิไวเดอร์

ตารางที่ 4.2.1 แกปทรงกลม-ทรงกลม

ระยะแกป (mm)	ค่าแรงดันที่อ่านได้จากโวลท์เตจดิไวเดอร์ (V_2)					เฉลี่ย	แรงดันเบรกดาวน์(kV)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5		
1	23	24	23	24	24	23.6	3.563
2	32	32	33	33	33	32.6	4.922
3	49	50	50	50	49	49.6	7.489
4	60	62	60	62	62	61.2	9.240

ตารางที่ 4.2.3 แกปแท่งปลายแหลม-ระนาบ

ระยะแกป (mm)	ค่าแรงดันที่อ่านได้จากโวลท์เตจดิไวเดอร์ (V_2)					เฉลี่ย	แรงดันเบรกดาวน์(kV)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5		
1	15	16	15	16	16	15.8	2.255
2	20	21	21	21	20	20.6	3.110
3	24	25	25	25	26	25.0	3.774
4	30	29	30	30	29	29.6	4.446

4.4 การวัดแรงดันกระแสสลับด้วยช่องว่างแกปทรงกลม-ทรงกลมและแกปแท่งปลายแหลม-ระนาบ ที่สภาวะความชื้นสมบูรณ์ที่ 32 g/m^3

1. สภาพบรรยากาศการทดลอง

อุณหภูมิ 33 °C

ความชื้นสัมพัทธ์ 90 %

ความดันบรรยากาศ 750 mmHg

ความชื้นสัมบูรณ์ 32 g/m^3

2. ตารางทดสอบแสดงค่าแรงดันที่อ่านได้จากโวลท์เตจดิไวเดอร์

ตารางที่ 4.4.1 แกปทรงกลม-ทรงกลม

ระยะแกป (mm)	ค่าแรงดันที่อ่านได้จากโวลท์เตจดิไวเดอร์ (V_2)					เฉลี่ย	แรงดันเบรกดาวน์(kV)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5		
1	31	30	35	33	34	32.6	4.922
2	45	43	42	47	48	45.0	6.794
3	60	61	61	59	63	60.8	9.180
4	72	70	69	70	70	70.2	10.599

ตารางที่ 4.4.3 แกปแท่งปลายแหลม-ระนาบ

ระยะแกป (mm)	ค่าแรงดันที่อ่านได้จากโวลท์เตจดิไวเดอร์ (V_2)					เฉลี่ย	แรงดันเบรกดาวน์(kV)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5		
1	17	18	20	18	19	18.4	2.778
2	22	23	21	23	23	22.4	3.382
3	25	28	27	29	28	27.4	4.137
4	33	31	33	32	33	32.4	4.892

4.5 การวัดแรงดันกระแสตรงด้วยช่องว่างแกปทรงกลม-ทรงกลมและแกปแท่งปลายแหลม-ระนาบ ที่สภาวะความชื้นสมบูรณ์ที่ 22 g/m^3

1. สภาพบรรยากาศการทดลอง

อุณหภูมิ 28 °C

ความชื้นสัมพัทธ์ 80 %

ความดันบรรยากาศ 750 mmHg

ความชื้นสัมบูรณ์ 22 g/m^3

2. ตารางทดสอบแสดงค่าแรงดันที่อ่านได้จากโวลท์เตจดิไวเดอร์

ตารางที่ 4.5.1 แกปทรงกลม-ทรงกลม

ระยะแกป (mm)	ค่าแรงดันที่อ่านได้จากโวลท์เตจดิไวเดอร์ (V_2)					เฉลี่ย	แรงดันเบรกดาวน์(kV)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5		
1	25	26	24	26	25	25.2	3.804
2	29	30	30	31	30	30.0	4.529
3	34	33	34	34	33	33.6	5.073

ตารางที่ 4.5.3 แกปแท่งปลายแหลม-ระนาบ

ระยะแกป (mm)	ค่าแรงดันที่อ่านได้จากโวลท์เตจดิไวเดอร์ (V_2)					เฉลี่ย	แรงดันเบรกดาวน์(kV)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5		
1	22	23	22	22	23	22.4	3.382
2	28	27	28	28	27	27.6	4.167
3	32	32	32	31	31	31.6	4.771

4.7 การวัดแรงดันกระแสตรงด้วยช่องว่างแกปทรงกลม-ทรงกลมและแกปแท่งปลายแหลม-ระนาบ ที่สภาวะความชื้นสมบูรณ์ที่ 30 g/m^3

1. สภาพบรรยากาศการทดลอง

อุณหภูมิ 30 °C

ความชื้นสัมพัทธ์ 85 %

ความดันบรรยากาศ 750 mmHg

ความชื้นสัมบูรณ์ 30 g/m^3

2. ตารางทดสอบแสดงค่าแรงดันที่อ่านได้จากโวลท์เตจดิไวเดอร์

ตารางที่ 4.7.1 แกปทรงกลม-ทรงกลม

ระยะแกป (mm)	ค่าแรงดันที่อ่านได้จากโวลท์เตจดิไวเดอร์ (V_2)					เฉลี่ย	แรงดันเบรกดาวน์(kV)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5		
1	28	27	29	29	27	28.0	4.227
2	32	34	33	34	34	33.4	5.043
3	39	40	37	37	38	38.2	5.767

ตารางที่ 4.5.3 แกปแท่งปลายแหลม-ระนาบ

ระยะแกป (mm)	ค่าแรงดันที่อ่านได้จากโวลท์เตจดิไวเดอร์ (V_2)					เฉลี่ย	แรงดันเบรกดาวน์(kV)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5		
1	28	26	28	27	26	27.0	4.076
2	30	31	29	30	30	30.0	4.529
3	32	33	33	33	34	33.0	4.982

5.สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

จากการทดลองได้ทำการเก็บข้อมูลค่าแรงดันเบรกดาวน์และวิเคราะห์ผลผลโครงงาน นำผลที่ได้จากการทดลองต่าง ๆ มาสรุปผล และข้อเสนอแนะวิธีการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นขณะทำโครงงาน มีรายละเอียดดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาค้นคว้ารวบรวมข้อมูลต่าง ๆ แล้วทำการออกแบบชุดสร้างความชื้นเพื่อทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ แกปที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ แกปทรงกลม-ทรงกลมและแกปแท่งปลายแหลม-ระนาบ ที่ระยะ 1,2,3 และ 4 ไฟ AC และทดลองแกปทรงกลม-ทรงกลมและแกปแท่งปลายแหลม-ระนาบ ที่ระยะ 1,2, และ 3 ไฟ DC ที่ความชื้นที่แตกต่างกัน ขนาดพิกัด 12 กิโลโวลท์ โดยจากการวิเคราะห์ผลในบทที่ 4 ได้ดังนี้

จากการทดลองแกปทรงกลม-ทรงกลมและแกปแท่งปลายแหลม-ระนาบ ที่ระยะ 1,2,3 และ 4 ไฟ AC เมื่อมีความชื้นสัมบูรณ์เพิ่มขึ้นมีผลทำให้แรงดันเบรกดาวน์เพิ่มขึ้นและปรับระยะห่างของแกปเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าแรงดันเบรกดาวน์เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันทั้งแกปทรงกลม-ทรงกลมและแกปแท่งปลายแหลม-ระนาบ แต่แกปแท่งปลายแหลม-ระนาบจะมีค่าแรงดันเบรกดาวน์ต่ำกว่าแกปทรงกลม-ทรงกลม

จากการทดลองแกปทรงกลม-ทรงกลมและแกปแท่งปลายแหลม-ระนาบ ที่ระยะ 1,2 และ 3 ไฟ DC เมื่อมีความชื้นสัมบูรณ์เพิ่มขึ้นมีผลทำให้แรงดันเบรกดาวน์เพิ่มขึ้นและปรับระยะห่างของแกปเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าแรงดันเบรกดาวน์เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันทั้งแกปทรงกลม-ทรงกลมและแกปแท่งปลายแหลม-ระนาบ แต่แกปแท่งปลายแหลม-ระนาบจะมีค่าแรงดันเบรกดาวน์ต่ำกว่าแกปทรงกลม-ทรงกลมและค่าแรงดันไฟ DC จะมีค่าสูงกว่าไฟ AC ก็เพราะว่าไฟ DC เป็นไฟที่แรงดันคงที่ทำให้แรงดันเบรกดาวน์สูงกว่า

5.2 ปัญหาและอุปสรรค์

1.การควบคุมความชื้นให้อยู่คงที่นั้นต้องใช้ระยะเวลาในการ
ควบคุมนานพอสมควรถึงจะ ทดลองได้

2.การทดสอบต้องเทียบกราฟความชื้นกับอุณหภูมิเพื่อที่จะหา
ความชื้นสัมบูรณ์ทำให้ต้องดูความชื้นกับอุณหภูมิให้สัมพันธ์กัน

5.3 ข้อเสนอแนะ

1.สร้างชุดควบคุมอุณหภูมิและความชื้นให้คงที่

2.ศึกษาเกี่ยวกับเครื่องมือวัดที่จะมาใช้ในการทดลอง

3.ศึกษาลักษณะความชื้นที่ส่งผลต่อแรงดันเบรกดาวน์ใน
สภาวะที่สูงขึ้น

6.กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลงได้ก็เนื่องมาจากพื้นฐานทางด้านวิชาการ ความรู้ที่คณะผู้จัดทำได้รับการอบรม

และการถ่ายทอดจากท่านคณาอาจารย์ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาการต่างๆ ให้แก่คณะผู้จัดทำดังนั้นคณะผู้จัดทำจึงขอมอบกิตติคุณความดีนี้ ให้ท่านคณาอาจารย์และมหาวิทยาลัยที่คณะผู้จัดทำได้ศึกษาเล่าเรียนมา คณะผู้จัดทำขอขอบคุณท่านอาจารย์ที่ปรึกษาคือ อาจารย์เจษฎา สารสุข ตลอดจนอาจารย์ท่านอื่นอีกหลายท่านที่ไม่ได้กล่าวถึงในที่นี้ ที่ท่านได้ให้คำปรึกษาและแนะแนวทาง จนปริญญานิพนธ์นี้บังเกิดความสำเร็จขึ้นได้