



การพัฒนาคุณภาพอิเล็กทรอนิกส์ภายใต้อุณหภูมิต่ำ

ELECTRODATION IN LOW TEMPERATURE



โดย

นายเกษม	วงศ์ชนะโสภณ	32/03/
นางสาวจารุรัตน์	สินธุสนธิชาติ	32/053
นายปิยะดิษฐ์	ละไมเสถียร	32.1190.

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
 สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ปีการศึกษา 2535

๕

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณ

032672

ปีการศึกษา 2535
การพัฒนาคณาภิเษกโทรคภษได้อหุมิต้า

โดย

นสเกษม วงศ์ชนะโสภณ
น.ส.จอรุรัตน์ สิ้นชสนธิษฐติ
นสปิษะดิษฐ ละไมเสถียร

อจอรฐที่ปรักษ

อจอรฐ จงรักษ บญเส็ง

ปริศยานิพนธ์ปีการศึกษา 2535

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การพัฒนาคุณภาพอิเล็กทรอนิกส์ภายใต้กฎหมายต่ำ

ผู้จัดทำ

1. นาย เกษม วงศ์ชนะโสภณ

2. นางสาว จารุรัตน์ สีนุสนธิชาติ

3. นาย ปิยะดิษฐ์ ละไมเสถียร

..........อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ จงรักษ์ บุญเส็ง)

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 การเบรคความถี่ของว่างทรงกลมในอากาศ	
2.1 บทนำ	2
2.2 หลักการเบรคความถี่ด้วยช่องว่างทรงกลม	2
2.3 การคำนวณแรงดันเบรคความถี่ในอากาศ	15
2.4 แพลตฟอร์มที่มีผลต่อเนื่องจากการวัดแรงดันเบรคความถี่	16
2.5 วิธีการวัดแรงดันเบรคความถี่ไฟฟ้ากระแสตรงและแรงดันเบรคความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับ	19
2.6 สรุป	19
บทที่ 3 การเกิดเบรคความถี่ในฉนวนน้ำมัน	
3.1 บทนำ	20
3.2 คุณสมบัติต่างๆของน้ำมันในการทำงานฉนวนไฟฟ้า	20
3.3 คุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ทดสอบ	22
3.4 กลไกการเบรคความถี่ของฉนวนน้ำมัน	24
3.5 ผลของระยะแก๊ปที่มีต่อแรงดันเบรคความถี่	27
3.6 ผลของลักษณะอิเล็กโตรดที่มีต่อแรงดันเบรคความถี่	28
3.7 ผลของรูปร่างแรงดันต่อแรงดันเบรคความถี่	29
3.8 สรุป	30
บทที่ 4 ขบวนการแช่เย็น	
4.1 บทนำ	31
4.2 กรรมวิธีในการแช่เย็น	31
4.3 คุณสมบัติของไนโตรเจนเหลว	31
4.4 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโลหะเมื่อถูกนำมาผ่านขบวนการแช่เย็น	32
4.5 สรุป	33
บทที่ 5 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	
5.1 บทนำ	34
5.2 อุปกรณ์การทดลอง	34

5.3	ระบบอิเล็กทรอนิกส์	34
5.4	การเตรียมชุดภาชนะทดลอง	45
5.5	การเตรียมน้ำมันหม้อแปลง	47
5.6	การวัดแรงดันเบรคคาว์ของฉนวนเหลว	47
5.7	ผลของอุปกรณ์ตัดคอนวงจรไฟฟ้า	47
5.8	การวัดแรงดันสูง	47
5.9	การควบคุมความดัน	48
5.10	สรุป	51
บทที่ 6	ผลการทดลอง	53
บทที่ 7	วิเคราะห์ผลการทดลอง	
7.1	บทนำ	71
7.2	วิเคราะห์ข้อมูลทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในฉนวนอากาศ	72
7.3	วิเคราะห์ข้อมูลทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในฉนวนน้ำมัน	75
7.4	วิเคราะห์ข้อมูลเมื่อทำการทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในฉนวนอากาศและเปลี่ยนค่าความดันในภาชนะทดสอบ	83
บทที่ 8	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
8.1	บทนำ	87
8.2	ความผิดพลาดจากการทดลอง	87
8.3	กราฟการวัดแรงดันเบรคคาว์	88
8.4	สรุปผลการทดลอง	88
8.5	ข้อเสนอแนะ	89
ภาคผนวก		90
กิตติกรรมประกาศ		105
หนังสืออ้างอิง		106

	หน้า
รูปที่ 2.1	3
รูปที่ 2.2 การเกิดอะวาลานซ์ของอิเลคตรอน	7
รูปที่ 5.1 หม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง	35
รูปที่ 5.2 ส่วนควบคุมสัญญาณ	36
รูปที่ 5.3 เครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 600 KV	37
รูปที่ 5.4 ควบคุมเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	38
รูปที่ 5.5 ชุดภาชนะทดสอบ	39
รูปที่ 5.6 ชุดภาชนะที่ใช้ทดสอบ	40
รูปที่ 5.7 แผนผังแบบขนาดจริงของภาชนะชุดทดสอบสร้างตามข้อกำหนด มาตรฐาน IEC ขนาดบรรจุ 500 มิลลิเมตร	40
รูปที่ 5.8 ภาพแสดงวิธีการวัดระยะแกป	41
รูปที่ 5.9 เครื่องมือการวัดระยะแกป	42
รูปที่ 5.10 ถังบรรจุไนโตรเจนเหลว	43
รูปที่ 5.11 เครื่องห้อนอิเลคโตรด	43
รูปที่ 5.12 ตู้อบ (Hot air oven)	44
รูปที่ 5.13 อิเลคโตรดใหม่ผ่านกรรมวิธีการแช่เย็น	46
รูปที่ 5.14 อิเลคโตรดผ่านกรรมวิธีการแช่เย็น	46
รูปที่ 5.15 วิธีการวัดแรงดันสูงแบบอนุกรมระหว่างความต้านทานและ ไมโครแอมป์	48
รูปที่ 5.16 ปีมโรตารี	50
รูปที่ 5.17 ภาชนะทดสอบอัลลูมิเนียมแช่เย็นแรงดันสูง	50
รูปที่ 5.18 วงจรการทดลอง	51
รูปที่ 7.1 กราฟแสดงค่าเบรคดาวน์แรงดันกระแสสลับในอากาศของเหล็กสแตนเลส	72
รูปที่ 7.2 กราฟแสดงค่าเบรคดาวน์แรงดันกระแสสลับในอากาศของโลหะทองแดง	73
รูปที่ 7.3 กราฟแสดงค่าเบรคดาวน์แรงดันกระแสสลับในอากาศของโลหะทองเหลือง	73
รูปที่ 7.4 กราฟแสดงค่าเบรคดาวน์แรงดันกระแสตรงในอากาศของเหล็กสแตนเลส	74
รูปที่ 7.5 กราฟแสดงค่าเบรคดาวน์แรงดันกระแสตรงในอากาศของโลหะทองแดง	74
รูปที่ 7.6 กราฟแสดงค่าเบรคดาวน์แรงดันกระแสตรงในอากาศของโลหะทองเหลือง	75

รูปที่ 7.7	กราฟแสดงค่าเบรคควาน์แรงดันกระแสสลับในน้ำมันของเหล็กสแตนเลส	80
รูปที่ 7.8	กราฟแสดงค่าเบรคควาน์แรงดันกระแสสลับในน้ำมันของโลหะทองแดง	80
รูปที่ 7.9	กราฟแสดงค่าเบรคควาน์แรงดันกระแสสลับในน้ำมันของโลหะทองเหลือง	81
รูปที่ 7.10	กราฟแสดงค่าเบรคควาน์แรงดันกระแสตรงในน้ำมันของเหล็กสแตนเลส	81
รูปที่ 7.11	กราฟแสดงค่าเบรคควาน์แรงดันกระแสตรงในน้ำมันของโลหะทองแดง	82
รูปที่ 7.12	กราฟแสดงค่าเบรคควาน์แรงดันกระแสตรงในน้ำมันของโลหะทองเหลือง	82
รูปที่ 7.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับระยะแยกที่ความดันต่างๆของเหล็กสแตนเลส	84
รูปที่ 7.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับระยะแยกที่ความดันต่างๆของเหล็กสแตนเลสแช่เย็น	84
รูปที่ 7.15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับระยะแยกที่ความดันต่างๆของโลหะทองแดง	85
รูปที่ 7.16	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับระยะแยกที่ความดันต่างๆของโลหะทองแดงแช่เย็น	85
รูปที่ 7.17	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับระยะแยกที่ความดันต่างๆของโลหะทองเหลือง	86
รูปที่ 7.18	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับระยะแยกที่ความดันต่างๆของโลหะทองเหลืองแช่เย็น	86

ขบวนการผลิตอิเล็กทรอนิกส์ภายใต้ร่มเงา

เกษม วงศ์ณะโสภณ
 จารุรัตน์ สิบสุพรรณิชาติ
 ปิยะดิษฐ์ ละไมเสถียร

จงรักษ์ บุญเลี้ยง อาจารย์ที่ปรึกษา
 ปีการศึกษา 2535

บทคัดย่อ

ปริศยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการนำเอาอิเล็กทรอนิกส์มาพัฒนาคุณสมบัติเวอร์คฟังก์ชัน (Work function) ของโมเลกุล ภายในอิเล็กทรอนิกส์และทำการปรับปรุง เพื่อใช้ให้เกิดประโยชน์ในทางไฟฟ้าแรงสูง (High Voltage) มากขึ้น ซึ่งทำการเพิ่มคุณภาพโดยการเพิ่มขึ้นคอนในขบวนการผลิตอิเล็กทรอนิกส์ก่อนนำมาใช้งาน เพื่อให้อิเล็กทรอนิกส์สามารถทนแรงดันเบรคดาวน์ได้สูงขึ้นที่ระแยะแก่เท่าเดิม รวมทั้งมีประสิทธิภาพสูงขึ้นและความทนทานต่อการใช้งานมากกว่าอิเล็กทรอนิกส์ที่ขบวนการผลิตธรรมดา (แบบเดิม) และทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบอิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านขบวนการเพิ่มคุณภาพ กับ อิเล็กทรอนิกส์ธรรมดา

ในขบวนการเพิ่มคุณภาพนั้น จะทำโดยการนำอิเล็กทรอนิกส์ไปผ่านขบวนการแช่เย็นแล้วจึงนำมาผ่านขบวนการอบด้วยความดันอุณหภูมิสูง

สำหรับการทดลองเปรียบเทียบอิเล็กทรอนิกส์เดิมกับอิเล็กทรอนิกส์ใหม่ จะทำโดยการวัดแรงดันเบรคดาวน์ที่ระแยะต่างๆของฉนวนอากาศและฉนวนน้ำมัน โดยใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ทดสอบ

ELECTRODATION IN LOW TEMPERATURE

Kasem Wongthanasopon
 Jarurut Sinthusonthichart
 Piyadit Lamaisathien

Chongruk Boonseng Advisor

ABSTRACT

In this paper, take the electrodes to develop work-function property of molecule in the electrodes and improve them for the advantage using in high voltage. We can increase the quality by adding procedure in the process of produce the electrode before use. They can make the electrode endure higher breakdown voltage in the same distance include higher efficiency and the longer time in use more than the electrode produce in normal process. We experiment for compare the property of them.

In the improve quality process to be made by take the electrodes through cooling process and take them to anneal in heat flow oven at high temperature.

For the experiment, comparing the electrodes can do by measure breakdown voltage invarious distance of gap in air insulator and oil insulator by use alternating current(ac) and direct current(dc).

บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันอุปกรณ์ไฟฟ้าที่นำมาใช้ในอุปกรณ์ส่งจ่าย และอุปกรณ์ร่วม มีการพัฒนา และ นำไปใช้กันอย่างแพร่หลาย มีการปรับปรุงทั้งทางด้านรูปร่าง และ คุณภาพ ให้เหมาะสมกับการใช้งานอุปกรณ์นั้นๆ ดังนั้น เพื่อพัฒนาคุณสมบัติที่ดีขึ้น ทั้งทางกายภาพและทางไฟฟ้า จึงจำเป็นต้องทำการทดสอบมาตรฐานการใช้งาน โดยการวัดค่าแรงดันสูงสุด ที่สามารถปฏิบัติงานได้ โดยไม่เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์นั้น และ ไม่ส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์อื่นๆ เพราะฉะนั้นการพัฒนาคุณสมบัติทางไฟฟ้าให้สามารถทนแรงดันได้สูงขึ้นจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก การปรับปรุงคุณภาพของอุปกรณ์ อาจประสบผลสำเร็จได้หลายวิธี ดังนั้นจึงมีการเสนอแนวความคิดหนึ่งที่จะนำเอาอุปกรณ์มาทำการปรับปรุงคุณภาพโดยผ่านกระบวนการแช่เย็น และ อบด้วยความดันอุณหภูมิสูง เพื่อพัฒนาคุณสมบัติให้ดีขึ้น ในการทดสอบนี้ ใช้โอเลคโตรด 2 ชุด ซึ่งแต่ละชุดประกอบด้วยโลหะ 3 ชนิด คือ โลหะสแตนเลส โลหะทองเหลือง และโลหะทองแดง ชุดแรกผ่านกระบวนการแช่เย็น และ อบด้วยความดันสูง อีกชุดหนึ่งไม่ผ่านกระบวนการดังกล่าว แล้วนำมาทดสอบวัดค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ และ ไฟฟ้ากระแสตรง โดยทดสอบทั้งในช่องว่างอากาศ และ ในฉนวนน้ำมัน จากผลการทดสอบที่ได้ นำค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ มาเปรียบเทียบกัน ซึ่งหากผลการทดสอบจากกระบวนการนี้ ผลออกมาเป็นที่น่าพอใจ ก็สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในเชิงอุตสาหกรรมได้

แนวทางการศึกษาวิชานี้

วิชานี้แบ่งออกเป็น 7 บท แต่ละบทประกอบด้วยเนื้อหาดังต่อไปนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงการเกิดเบรคดาวนของช่องว่างทรงกลมในอากาศ

บทที่ 3 กล่าวถึงการเกิดเบรคดาวนในน้ำมัน

บทที่ 4 กล่าวถึงกรรมวิธีในการแช่เย็น และบอกรายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของโลหะที่เปลี่ยนไปผ่านกระบวนการนี้

บทที่ 5 อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง เมื่อทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง รวมทั้งบอกถึงอุปกรณ์ และวิธีการทดลองของกระบวนการแช่เย็น

บทที่ 6 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์

บทที่ 7 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอนะ

บทที่ 2

การเบรคดาวน์ด้วยช่องว่างทรงกลมในอากาศ

2.1 บทนำ

ในการวัดค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ โดยอาศัยการสังเกตจากการเกิดเบรคดาวน์หรือสปาร์คจากช่องว่างทรงกลม เมื่อแรงดันไฟฟ้าถึงค่าที่ทำให้อากาศระหว่างช่องว่างเกิดเบรคดาวน์ ซึ่งจะเป็นค่ายอดหรือค่าเฉลี่ยของแรงดันนั้น การเบรคดาวน์ระหว่างทรงกลมจะเกิดขึ้นภายใน 2-3 ไมโครวินาที เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าถึงจุดแรงดันเบรคดาวน์สถิติ (Statistic breakdown discharge voltage) ซึ่งการเบรคดาวน์ของก๊าซหรืออากาศจะเกิดขึ้นเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าถึงค่าหนึ่ง ซึ่งแรงดันไฟฟ้าระดับนี้จะขึ้นอยู่กับแฟคเตอร์หลายอย่างได้แก่ เส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกลม ระยะห่างระหว่างทรงกลม ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของอากาศซึ่งขึ้นกับความดันและอุณหภูมิ ความชื้นของอากาศ เป็นต้น

2.2 หลักการการเบรคดาวน์ระหว่างช่องว่างทรงกลม

2.2.1 ความคงทนของฉนวนอากาศต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric strength)

หมายถึงค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field stress) สูงสุดที่ฉนวนสามารถทนได้ โดยไม่เกิดความเสียหายหรือเกิดการเบรคดาวน์ ซึ่งมีหน่วยเป็นโวลต์ต่อเซนติเมตร ความคงทนของฉนวนอากาศต่อแรงดันไฟฟ้า (E_b) ขึ้นอยู่กับแฟคเตอร์ต่างๆ ดังนี้

$$E_b = F(\text{ลักษณะของอิเล็กโตรด, ลักษณะของไดอิเล็กตริก, เวลา})$$

สามารถหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดที่มีค่าสนามไฟฟ้าต่างๆ ดังนี้

$$E_{max} = E_b = U_b/d * n^*$$

E_{max} = ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดต่อเซนติเมตร

E_b = ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเบรคดาวน์ต่อเซนติเมตร

d = ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด (เซนติเมตร)

U_b = แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนระหว่างอิเล็กโตรดทำให้เกิดการเบรคดาวน์

n^* = แฟคเตอร์สนามไฟฟ้า (Field utilization factor) มีนิยามได้ว่า

$$n^* = E_{av}/E_{max} \leq 1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

E_{av} = ค่าเฉลี่ยของสนามไฟฟ้า มีค่าเท่ากับ U_b/d

n^* คือตัวบอกให้ทราบว่าอิเล็กโตรดนั้นมีลักษณะของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอเพียงใด สมการนี้ใช้ได้กับกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ไม่มีโคโรน่า หรือพรีดีสชาร์จ คือเกิดก่อนเบรค-ดาวน์ จะไม่มีกระแสไหลผ่านอิเล็กโตรดเลย

ถ้าในกรณีที่สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมาก จะมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้นที่หัวแหลมกว่า ถึงแม้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะถึงค่าสูงสุดแล้วก็ตาม แต่ในกรณีนี้บริเวณที่ห่างหัวอิเล็กโตรดออกไปยังมีความเครียดสนามไฟฟ้าไม่ถึง ดังนั้นจึงเกิดโคโรน่าที่ปลายแหลมแทนการเกิดเบรคดาวน์ได้ คือ

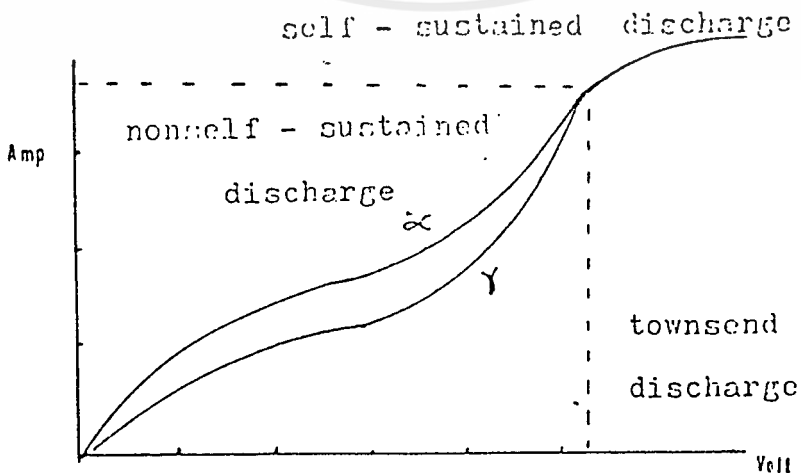
$$E_i = U_i/d * n^*$$

เมื่อ E_i = ความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรน่า

U_i = แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเมื่อโคโรน่าเริ่มเกิด

2.2.2 การเกิดดีสชาร์จในก๊าซ

การเกิดดีสชาร์จ คือปรากฏการณ์ที่อธิบายการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านก๊าซ โดยอาศัยการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุ (อิเล็กโตรด, ไอออน) ที่เกิดจากการไอออไนเซชันด้วยวิธีใดวิธีหนึ่ง ซึ่งอาศัยสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรด กระแสไฟฟ้ามักมีค่าตั้งแต่ไม่กี่ 10^{-10} แอมป์ จนถึงไมโครแอมป์ (μA) ซึ่งการทดลองจะป้อนแรงดันให้กับหัวอิเล็กโตรดที่มีการใส่ช่องจะได้ลักษณะของสัญญาณระหว่างแรงดันกับกระแส ดังรูป



ช่วงที่เกิดตอนต้นนั้นเรียกว่า การคายประจุแบบประทุตัวเองไม่ได้ (Nonself-sustained discharge) คือเมื่อป้อนแรงดันเริ่มต้น (Threshold voltage) และฉายแสงเข้าที่หัวอิเล็กโตรด กระแสจะเพิ่มขึ้นตามแรงดันที่ป้อนจนกระทั่งอิ่มตัวดังรูปเนื่องจากอิเล็กตรอนที่ออกจากคาโทด หรือเนื่องจากก๊าซทั้งหมดวิ่งไปถึงแอโนด ในช่วงนี้กระแสจะไม่เพิ่มตามแรงดันจนถึงค่าหนึ่งกระแสจะเริ่มเพิ่มขึ้นอีกในลักษณะเอกซ์โปเนนเชียล เรียกย่านนี้ว่า การคายประจุแบบทาวน์เซนด์ (Townsend discharge) ถ้าหากเพิ่มแรงดันต่อไปอีกกระแสจะเพิ่มมากขึ้นกว่าเอกซ์โปเนนเชียลจนถึงจุดหนึ่ง แรงดันคร่อมแก๊สจะหลุดตัวลงกระแสไหลเพิ่มขึ้นอย่างมากมายซึ่งจำกัดด้วยความต้านทานของวงจรรภายนอก จุดนี้เรียกว่าจุดเบรคดาวน์ เมื่อเกิดการเบรคดาวน์แล้วการคายประจุจะสามารถเกิดเองได้ (Self-sustained discharge) โดยสามารถเอาต้นกำเนิดแสงออกได้

การคายประจุแบบเบรคดาวน์ในแก๊ส อาจแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ

1. เบรคดาวน์เพียงบางส่วน (Partial breakdown)

เกิดขึ้นในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ซึ่งจะเกิดก่อนการเบรคดาวน์แบบสมบูรณ์ เป็นการไหลไอออไนเซชันในแก๊สเพียงบางส่วนหรือที่เราเรียกว่า คายประจุแบบโคโรนา (Corona discharge)

2. เบรคดาวน์แบบสมบูรณ์ (Complete breakdown)

หมายถึงการเกิดเบรคดาวน์ตลอดแก๊สเชื่อมโยงระหว่างอิเล็กโตรด ซึ่งสภาพการเป็นฉนวนจะเสียหายหลังจากการเกิดเบรคดาวน์แล้ว แรงดันจะเหลือน้อยลงมาก แต่มีค่ากระแสไหลอย่างมากตามแนวการเกิดเบรคดาวน์ จะจำกัดกระแสได้ด้วยความต้านทานภายนอก ในตัวจ่ายแรงดันหรือตัวกำหนดกระแส ขณะเกิดการเบรคดาวน์จะเป็นเวลาเดียวกับอาร์คเริ่มเกิด

2.2.3 ขบวนการไอออไนเซชัน (Ionization)

อะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซเมื่อได้รับพลังงานเพียงพอ จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาหนึ่งอิเล็กตรอน อะตอมหรือโมเลกุลนั้นจะมีประจุบวก เราเรียกว่าไอออไนเซชันหรือการแตกตัวของอิเล็กตรอนออกจากโมเลกุล ขบวนการที่อิเล็กตรอนหลุดออกจากอิเล็กโตรดก็เป็นขบวนการสำคัญที่ทำให้ก๊าซมีสภาพนำไฟฟ้าได้

ขบวนการที่ทำให้ก๊าซมีสภาพนำไฟฟ้าได้ เกิดขึ้นเมื่อมีประจุอิสระเป็นจำนวนมากโดยขบวนการเพิ่มทวีคูณของอิเล็กตรอนและไอออนในแก๊สนี้ แบ่งออกเป็น 2 อย่างคือ

1. ขบวนการแตกตัวของอิเล็กตรอนออกจากโมเลกุลของก๊าซในแก๊ป เนื่องจาก การชนกันของอนุภาคกับโมเลกุล

2. ขบวนการปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวอิเล็กโทรด เมื่อได้รับความเค็รียคสนาม ไฟฟ้าสูงๆ หรือได้รับพลังงานความร้อน รั้งสีหรือไอออนมากกระทบอิเล็กโทรด

ขบวนการไอออไนเซชันแบ่งออกเป็น

ก) ไอออไนเซชันโดยการชน (Collision ionization)

คือการเกิดการชนกันแล้วมีการเปลี่ยนพลังงานระหว่างพลังงานจลน์ (Kinetic energy) กับพลังงานศักย์ (Potential energy) จะทำให้อะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซที่ถูกชนมีการตื่นกระตุ้น (Excitation) ขึ้น ไอออไนเซชันโดยการชนเกิดจากอิเล็กตรอน รั้งสีและอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซ โดยอิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าขณะที่รั้งเข้าหา อานอด พลังงานที่ได้รับเป็นพลังงานจลน์ซึ่งถ้ามีมากกว่าพลังงานไอออไนเซชันของโมเลกุลของ ก๊าซ จะทำให้อิเล็กตรอนแตกตัวออกมา แต่ถ้าไม่ถึงก็จะเกิดภาวะตื่นกระตุ้น และจะคาย พลังงานออกมาเป็นโฟตอนเมื่อโมเลกุลเข้าสู่สภาวะเดิม

อิเล็กตรอนที่ทำให้เกิดไอออไนเซชันได้ ต้องมีพลังงานอย่างน้อยเท่ากับพลังงานไอออไนเซ ชัน (W_i) ของโมเลกุลของก๊าซ ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\frac{1}{2} M V^2 \geq W_i$$

เมื่อ M = น้ำหนักของอิเล็กตรอน

V = ความเร็วของอิเล็กตรอน

สัมประสิทธิ์การไอออไนเซชันของก๊าซ

ทาว์นเซนต์ได้แสดงให้เห็นว่า จำนวนการเกิดการชนไอออไนเซชันต่อหนึ่งระยะทางที่อนุ ภาคประจุเคลื่อนที่ไปนั้น กำหนดได้ด้วยแฟคเตอร์ที่เรียกว่าสัมประสิทธิ์การเกิดไอออไนเซชัน ของทาว์นเซนต์ โดยอนุภาคประจุรั้งสีของโมเลกุลของก๊าซในแก๊ป แบ่งเป็นสัมประสิทธิ์แอลฟา (α) และสัมประสิทธิ์เบต้า (β)

โดยที่ สัมประสิทธิ์แอลฟา เป็นสัมประสิทธิ์การชนไอออไนเซชันลำดับที่หนึ่งของทาว์นเซนต์ ซึ่ง เป็นการชนแตกตัวด้วยอิเล็กตรอน คือเป็นค่าเฉลี่ยของการชน ไอออไนซ์เซชันของอิเล็กตรอนหนึ่งตัวที่เคลื่อนที่ไปในแก๊ปเป็นระยะ ทาง 1 เซนติเมตร มีหน่วยเป็น เซนติเมตร⁻¹

สัมประสิทธิ์เบต้า เป็นสัมประสิทธิ์การชนของไอออน คือจำนวนการชนของไอออนเมวกับโมเลกุลเป็นกลาง ทำให้ไอเลคตรอนอิสระและไอออนบวกต่อหนึ่งหน่วยระยะทางในแก๊ปตามแนวสนามไฟฟ้า

แต่ขบวนการแตกตัวโดยมากเป็นขบวนการที่หนึ่ง (α) เหตุที่ขบวนการเบต้า ไม่ค่อยเกิดก็เพราะว่าไอออนมีมวลมาก การได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าจึงน้อย การถ่ายทอดพลังงานจึงน้อยด้วย

จะให้ความสัมพันธ์ของแอลฟา ระหว่างความดัน (P) และสนามไฟฟ้า (E) คือ

$$\frac{\alpha}{P} = f\left(\frac{E}{P}\right)$$

หรืออาจเขียนได้ว่า

$$\frac{\alpha}{P} = A \cdot \exp\left(-\frac{B}{E/P}\right)$$

โดยที่ A, B เป็นค่าคงตัวขึ้นอยู่กับชนิดของแก๊ส เช่น อากาศ มีค่า E/P อยู่ระหว่าง 100-800 โวลต์ต่อเซนติเมตร-ทอร์ มีค่า A เท่ากับ 15 เซนติเมตร-ทอร์ และ B มีค่าเท่ากับ 365 เซนติเมตร-ทอร์

ค่า α/P เป็นค่าแฟคเตอร์ที่สำคัญที่กำหนดการเพิ่มทวีคูณของอนุภาคประจุ และนำไปสู่การเบรคดาว์ของแก๊สหรืออากาศได้

การเกิดอะวาลานซ์ของอิเล็กตรอน (Electron avalanche)

เมื่ออิเล็กตรอนเกิดการแตกตัวหรือไอออไนเซชันมากขึ้น อิเล็กตรอนตัวใหม่จะได้พลังงานจากสนามไฟฟ้า เมื่อวิ่งไปชนโมเลกุลของแก๊ส จะเกิดอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นซึ่งการชนจะเกิดขึ้นมากมาย ทำให้เกิดอิเล็กตรอนขึ้นอีกเป็นจำนวนมาก จนกระทั่งเกิดเป็นปรากฏการณ์อะวาลานซ์ของอิเล็กตรอนขึ้น จำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นคือ

$$Nd = N_0 \cdot e^{\alpha d}$$

เมื่อ N_0 = จำนวนอิเล็กตรอนเริ่มต้น

Nd = จำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งไปถึงแอโนด

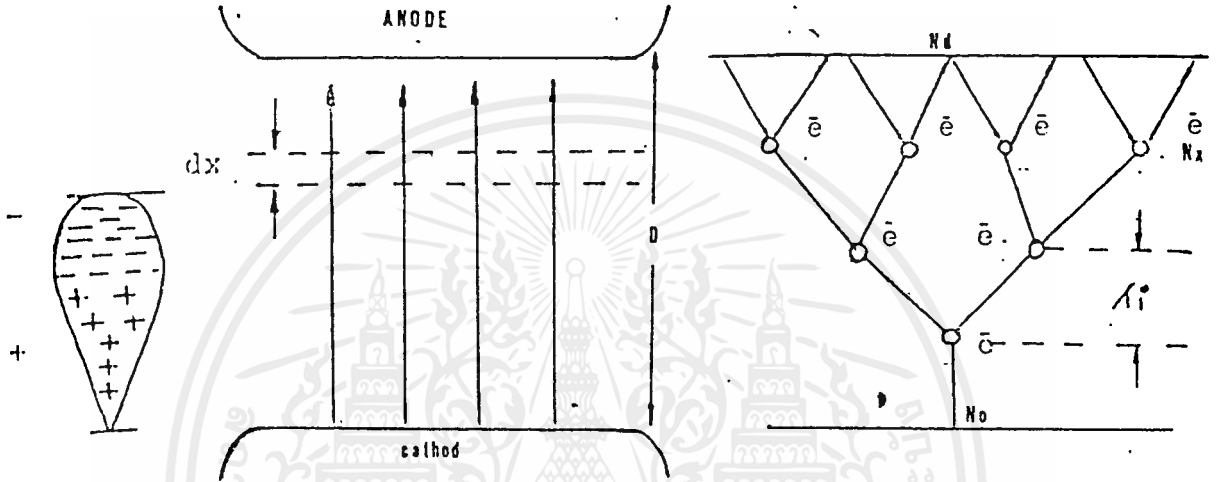
d = ระยะแก๊ป

α = สัมประสิทธิ์การไอออไนเซชันของทาว์นเซนต์

หรือจะให้ความสัมพันธ์ของกระแสคือ

$$I = I_0 * e^{-\alpha x}$$

เมื่อ I_0 = กระแสเริ่มต้น เป็นผลมาจากอิเล็กตรอนเริ่มต้นที่หลุดออกมาจากคาโทด เรียกกระแสโฟโตในกรณีที่มีความดันก๊าซต่ออิเล็กตรอนเริ่มต้นไม่สามารถจะเกิดไอออนในบริเวณใกล้ๆคาโทดได้ เพราะอิเล็กตรอนเหล่านั้นยังมีพลังงานต่ำอยู่ คือยังน้อยกว่าพลังงานไอออไนซ์เซชัน



รูปที่ 2.2 การเกิดอะวาลานซ์ของอิเล็กตรอน

ข) โฟโตไอออไนเซชัน (Photo ionization)

เกิดขึ้นเมื่ออะตอมหรือโมเลกุลได้รับพลังงานจากภายนอก ทำให้อิเล็กตรอนมีวงโคจรห่างออกไปจากนิวเคลียสมากขึ้น โดยวงโคจรแน่นอนแต่พลังงานที่ได้รับยังไม่ถึงพลังงานไอออไนซ์เซชัน ภาวะนี้เรียกว่า การกระตุ้น แล้วอะตอมจะกลับเข้าสู่สภาวะพื้น (Ground state) คายพลังงานออกมาในรูปของโฟตอน ถ้าพลังงานโฟตอนออกมาพอที่จะไปทำให้อะตอมหรือโมเลกุลใกล้เคียงเกิดการกระตุ้นหรือไอออไนซ์เซชันได้ก็ต่อเมื่อ

$$h\nu \geq W_i \text{ (We)}$$

เมื่อ

$h\nu$ = พลังงานโฟตอน

h = ค่าคงตัวของพลังค์ มีค่าเท่ากับ 6.625×10^{-34} จูล-วินาที

ν = ความถี่ของแสงที่เกิด

W_e = พลังงานของการกระตุ้น

ค) เทอร์มัลไอออไนเซชัน (Thermal ionization)

คือการเกิดการไอออไนเซชันโดยการได้รับพลังงานความร้อน ในกาชที่อุณหภูมิสูงๆ การไอออไนเซชันอาจเกิดจาก

1. โดยการชนของอะตอมหรือโมเลกุล เนื่องจากอุณหภูมิสูงทำให้ความเร็วสูง จึงได้พลังงานจลน์สูง ทำให้เกิดไอออไนเซชันได้
2. กาศร้อนทำให้มีโฟตอนปล่อยออกมา และเกิดโฟตอนไอออไนเซชันได้
3. การชนของอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงในข้อ 1 และ 2

ปรากฏการณ์จากข้อ 1 เกิดได้ยากเนื่องจากพลังงานจลน์ของโมเลกุลที่อุณหภูมิห้องมีค่าน้อย ดังนั้นเทอร์มัลไอออไนเซชันจึงเกิดจากผลของโฟตอน ไอออไนเซชันที่อุณหภูมิสูงหรือจากอิเล็กตรอนชนโมเลกุล ได้แสดงการคำนวณหาขีดขึ้นการเกิดไอออไนเซชันในการชนในเทอมของความดัน (P) และอุณหภูมิ (T)

$$\frac{a^2}{1-a^2} = \frac{2.4 \times 10^{-4}}{P} * T^{2.5} * e^{-W_e / kT}$$

เมื่อ

P = ความดันมีหน่วยเป็นทอร์

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ มีหน่วยเป็นองศาเคลวิน

X = ค่าคงตัวของโบล์ตซ์มานน์

a = อัตราส่วนของจำนวนอนุภาคไอออไนซ์ต่อจำนวนอนุภาคทั้งหมด

2.2.4 ขบวนการเกิดไอออนลบ (Negative ion formative)

โอกาสที่อิเล็กตรอนจะรวมตัวกับอะตอมหรือโมเลกุลที่เป็นกลาง หลังจากทีอิเล็กตรอนเกิดการไอออไนเซชันแล้ว ซึ่งเราเรียกว่า Electron attachment ทำให้เป็นอนุภาคประจุลบที่มีมวลเพิ่มขึ้นประมาณเท่ากับไอออนบวก เป็นผลทำให้เคลื่อนที่ช้าคือจะได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าน้อยกว่าพลังงานไอออไนซ์ ดังนั้นโอกาสที่จะเกิดไอออไนเซชันโดยไอออนลบจึงเป็นไปได้ยาก เท่ากับเป็นการหน่วงการเกิดไอออไนเซชัน เพราะมันจะรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นและแบ่งพลังงานออกไป การหน่วงจะเป็นผลอย่างยิ่งในบริเวณใกล้ๆคาโทด อันเป็นที่เริ่มต้นของอิเล็กตรอน คืออิเล็กตรอนตัวที่เริ่มสร้างอวาลานซ์จะลดลง และจะมีผลมากกับระยะแกปกว้างๆ เพราะอิเล็กตรอนใช้เวลาในการเดินทางไปถึงคาโทดมาก ทำให้โอกาสที่อิเล็กตรอนจับกับอะตอมหรือโมเลกุลได้มาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ลักษณะการเกิดไอออนมีหลายแบบคือ

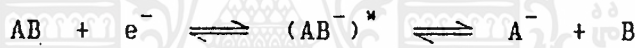
1) การเกาะของอิเล็กตรอนโดยการปล่อยรังสี (Radiative attachment)

เมื่ออิเล็กตรอนจับกับโมเลกุลหรืออะตอมที่เป็นกลางกลายเป็นไอออนลบพลังงานของไอออนลบต้องมีค่าน้อยกว่าอนุภาคที่เป็นกลาง ดังนั้นพลังงานที่เพิ่มนี้จะเปลี่ยนไปเป็นควันทัมในขณะทีอิเล็กตรอนไปเกาะหรือแผ่รังสีออกมา ดังสมการข้างล่าง ซึ่งขบวนการนี้สามารถย้อนกลับได้



2) ขบวนการแยก (Dissociative attachment)

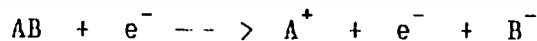
เกิดขึ้นโดยอิเล็กตรอนวิ่งชนโมเลกุลแล้วเกิดสภาวะกระตุ้นแล้วแยกเป็นสองอะตอม โดยแยกพลังงานที่ถ่ายเทจากอิเล็กตรอนวิ่งชนออกมา คือ



ขบวนการนี้สามารถย้อนกลับได้

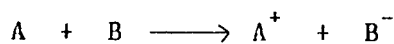
3) ไอออนลบเกิดจากผลการชน

เกิดจากการชนของอิเล็กตรอนกับโมเลกุล แล้วโมเลกุลแตกออกเป็นอนุภาคบวกและลบ โดยไม่มีอิเล็กตรอนวิ่งไปเกาะบนโมเลกุล เราเรียกว่าไอออนคู่ (Ion pair) ขบวนการนี้ย้อนกลับไม่ได้



4) ไอออนลบจากการชนกันเอง

เกิดจากอะตอมหรือคอนภาคหนึ่งๆวิ่งชนกันเอง โดยไม่มีอิเล็กตรอนอิสระมีการถ่ายเทประจุเกิดขึ้นแยกออกเป็นไอออนคู่คือ



χ_{ph} = ผลมาจากโฟตอน

χ_m = ผลมาจากเมตาเสถียร

2.2.5.2 การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะด้วยพลังงานแสง (Photo electric emission)

มีผลให้แรงดันเบรคควาน์ระหว่างอิเล็กโตรลลดลง เมื่อมีแสงจากการสปาร์คที่อเนิงเข้ามากระทบ และแสดงให้เห็นว่ารังสีอุลตราไวโอเลตให้ผลลักษณะนี้ [4] อิเล็กตรอนที่ออกมาจากคาโทดโคธวินี อาจมีพลังงานเหลือมากพอที่จะวิ่งไปดึงอาโนดได้โดยไม่มีสนามไฟฟ้า ในการที่จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวของโลหะ จะต้องใช้พลังงานมากกว่าพลังงานศักย์ที่พื้นผิว ซึ่งพลังงานส่วนนี้จะอยู่ในรูปของแสงอุลตราไวโอเลตที่ความถี่ที่เหมาะสม และการแพร่ของอิเล็กตรอนจะเกิดขึ้นที่สภาวะวิกฤตโดย

$$hf \geq \phi$$

และความถี่เป็นไปตามความสัมพันธ์

$$f = \phi/h$$

เมื่อ $f =$ ความถี่ขีดเริ่ม

$\phi =$ พลังงานที่ทำให้เกิดการไอออไนเซชัน (Work function) มีหน่วยเป็นลิบปะระสิทธิ์การ-โวลต์

ถ้าในการเกิดปฏิกิริยามีค่าความถี่มากกว่าความถี่ขีดเริ่ม พลังงานส่วนเกินจะเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ออกจากอิเล็กตรอน และพลังงานจลน์นี้จะทำให้เกิดความร้อนที่ขั้วไฟฟ้าหรือที่อิเล็กโตรดในโลหะ ปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กตริก มีประสิทธิภาพน้อยกว่า 10^{-3} อิเล็กตรอนต่ออนุภาค ในบางกรณีการปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะด้วยพลังงานแสง ประกอบด้วยอิเล็กตรอนที่ถูกทำให้เป็นไอสระต่ออนุภาคสูงถึง 20% ทำให้ความถี่ขีดเริ่มสามารถขยายไปสู่ช่วงรังสีอินฟราเรด

2.2.5.3 การปล่อยอิเล็กตรอนด้วยความร้อน (Thermionic emission)

ในขณะที่ผิวของคาโทดมีอุณหภูมิสูงขึ้น อิเล็กตรอนในโลหะจะมีพลังงานมากพอจะเอาชนะข้ามกำแพงศักย์ (Potential band) จากแถบนำไฟฟ้า (Conduction band) ซึ่งการปล่อยอิเล็กตรอนจากผิวของโลหะโดยความร้อน โดยไม่มีแหล่งพลังงานใดๆ เรียกว่า การปล่อยอิเล็กตรอนด้วยความร้อน ซึ่งริชาร์ดสันได้กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส (J) และ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (T) ของโลหะ ซึ่งแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$J = \frac{6.2 \times 10^{19} \cdot \gamma \cdot E^2 \cdot \exp(-6.8 \times 10^{-7} \cdot \gamma^{0.3})}{(\gamma + \phi) \phi^{1/2} E}$$

- เมื่อ
- J = ความหนาแน่นกระแส มีหน่วยเป็น แอมป์ต่อตารางเซนติเมตร
 - E = ความเข้มสนามไฟฟ้า มีหน่วยเป็น โวลต์ต่อตารางเซนติเมตร
 - ϕ = เวกต์ฟังก์ชัน มีหน่วยเป็น อิเล็กตรอน-โวลต์
 - γ = ระดับเฟอร์มี (fermi) ในอิเล็กตรอน-โวลต์

สมการนี้ได้รับการยอมรับ แต่อย่างไรก็ตามการก่อตัวของฝุ่นผง, ฝุ่นละอองออกไซด์ และกาซในบริเวณของขั้วไฟฟ้า สามารถทำให้สนามไฟฟ้าลดการปลดปล่อยกระแสไฟฟ้าลงได้ เช่นเดียวกับความเข้มของสนามไฟฟ้าอาจเกิดขึ้นได้โดย การลัดประจุภายในระยะทางสั้นๆแม้ในการดีส์ชาร์จแรงต่ำ ซึ่งผลต่างๆเหล่านี้ก่อให้เกิดการทำงาน และการแตกตัวของผิวหน้าคาโทด

2.2.6 กลไกการเกิดเบรคดาวน์ของกาซ

ในอากาศเป็นลักษณะของการผสมประกอบด้วย ไนโตรเจน 75% ออกซิเจน 21% กาซเฉื่อย (ได้แก่ อาร์กอน, นีออน, ฮีเลียม เป็นต้น) 1% และอื่นๆอีก 3% ดังนั้นการศึกษาการเกิดเบรคดาวน์ของห้องว่างอากาศจึงอาศัยการเกิดเบรคดาวน์ในกาซแทน

การเกิดเบรคดาวน์จะเกิดได้ก็ต่อเมื่อมีจำนวนอิเล็กตรอนหรือไอออนในอะวาลานซ์มากพอจนทำให้แก๊ปมีสภาพนำไฟฟ้าสูง ในช่วงการเกิดดีส์ชาร์จแบบประทังตัวเองไม่ได้ต่อกับช่วงการดีส์ชาร์จแบบประทังตัวเองได้ จำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นเท่าที่กระแสไหลประทังตัวเองได้นั้นเกิดจากขบวนการต่างๆ ข้างต้นซึ่งมีขบวนการที่สำคัญคือ

- 1) อิเล็กตรอนลำดับที่สองของทาว์นเซนต์ เป็นอิเล็กตรอนที่ปล่อยออกจากคาโทด โดยการวิ่งชนของไอออนบวก
- 2) ไอออนไนเซชันในกาซเนื่องจากพลังงานโฟตอน
- 3) การปล่อยอิเล็กตรอนจากผิวโลหะคาโทดโดยโฟตอนไฟฟ้า

2.2.6.1 การดีส์ชาร์จแบบทาว์นเซนต์

ใช้กับกรณีสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอโดยไม่มีประจุค้าง (Space charge) กลไกนี้เกิดขึ้นโดยการปล่อยอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้นเป็นลำดับต่อเนื่องในแก๊ป ระหว่างอิเล็กโตรดเกิดจากขบวนการแอลฟา และขบวนการเบต้า หรือเกิดขบวนการไอออนไนเซชันโดยไอออนบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนโมเลกุลของก๊าซ (β -process) ซึ่งกระบวนการเบต้าเกิดขึ้นได้ยากมาก ดังนั้นกลไกที่สำคัญในการเกิดเบรคดาว์ของแกปคือกระบวนการลำดับที่สองของทาว์เนนด์

กระบวนการเบต้าไม่สามารถเกิดได้มากเนื่องจากสาเหตุดังนี้

- 1) ไอออนบวกไม่สามารถเกิดไอออนไนเซชันได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ความเครียดสนามไฟฟ้าเบรคดาว์ เพราะจะเกิดได้ต้องใช้พลังงานถึงสองเท่า โอกาสเกิดจึงน้อย
- 2) กระบวนการเบต้าเป็นส่วนทำให้เกิดเบรคดาว์ โลหะผิวของคาโทดจะไม่มีผลต่อค่าแรงดันเริ่มเกิดเบรคดาว์ แต่จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าเวอร์คฟังก์ชันของโลหะคาโทดมีผลอย่างมากต่อแรงดันเบรคดาว์
- 3) กลไกเบรคดาว์ของกระบวนการเบต้าต้องใช้เวลามากในการเคลื่อนที่ของไอออนข้ามแกปมากกว่าเวลาเกิดเบรคดาว์ที่วัดได้

2.2.6.2 การคัสซาร์จแบบสตรีมเมอร์

จากกลไกเบรคดาว์ของทาว์เนนด์ ไม่สามารถอธิบายการเกิดเบรคดาว์ในด้านเวลาที่ใช้ในการก่อตัวของอะวาลานซ์ (Formative time) ที่ทำให้เกิดการคัสซาร์จแบบประทังตัวเองได้ในแกปที่มีความดัน เช่นการเกิดเบรคดาว์ในช่องแกปกว้างๆในบรรยากาศของการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ เพราะเวลาที่ใช้คำนวณตามกระบวนการของทาว์เนนด์ที่ใช้สร้างอะวาลานซ์มีค่ามากกว่าเวลาของคลื่นแตรคิมพัลส์

อีกประการหนึ่งคือกลไกของทาว์เนนด์ไม่สามารถอธิบายผลของประจุค้าง ที่สามารถทำให้เกิดอิเล็กตรอนอะวาลานซ์ได้

กลไกการเกิดเบรคดาว์สตรีมเมอร์ อธิบายการเกิดสปาร์คคัสซาร์จจากอะวาลานซ์เดี่ยวซึ่งมีประจุค้างเกิดขึ้นจากอะวาลานซ์เอง เปลี่ยนจากอะวาลานซ์ไปเป็นพลาสมาสตรีมเมอร์ ทำให้มีสภาพนำไฟฟ้าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และเกิดเบรคดาว์ในแนวนี้ หลักการเกิดเบรคดาว์ตามตามทฤษฎีของสตรีมเมอร์ เป็นผลสืบเนื่องมาจากกระบวนการวิ่งชนไอออนไนเซชันลำดับที่หนึ่งของทาว์เนนด์ คือจะมีการไอออนไนเซชันเป็นจำนวนมากจากพลังงานโฟตอน ที่เรียกว่าโฟตอนไอออนไนเซชันของโมเลกุลก๊าซที่ส่วนหน้าของสตรีมเมอร์ กลุ่มประจุค้างของไอออนที่ส่วนหัวของสตรีมเมอร์ทำให้สนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและทำให้เกิดการไอออนไนเซชันเพิ่มขึ้นอย่างมาก ไอออนบวกเคลื่อนที่ช้าเกือบจะอยู่กับที่ เมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่วิ่งข้ามช่องแกปไปสู่แอโนด เกิดหมอกของอิเล็กตรอนเป็นลำระหว่างอิเล็กโตรด ปล่องให้ไอออนบวกอยู่เบื้องหลังรวมกันเป็นหมอก ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ส่วนหัวและส่วนหลังอะวาลานซ์เพิ่มสูงขึ้น แต่ใน

บริเวณระหว่างอิเล็กตรอนกับหมอกไอออนความถี่คลื่นสนามไฟฟ้าจะลดลง การเพิ่มสูงของความถี่คลื่นสนามไฟฟ้าตามจุดต่างๆทำให้เกิดโฟโตไอออไนเซชันขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หมอกประจุเพิ่มขึ้นทำให้ความนำไฟฟ้าสูงขึ้น มีลักษณะเป็นสตรีมเมอร์ระหว่างอาโนดกับคาโทด และเกิดเบรคดาวันตามแนวนี้จึงเรียกกลไกเบรคดาวันลักษณะนี้ว่า สตรีมเมอร์เบรคดาวัน

2.3 การคำนวณแรงดันเบรคดาวันในอากาศ

จาก

$$U_b = E_b * d * n^*$$

เมื่อ

$$n^* = \text{ค่าแฟคเตอร์สนามไฟฟ้า}$$

$$U_b = \text{แรงดันเบรคดาวันของอากาศ}$$

$$E_b = \text{ค่าความถี่คลื่นสนามไฟฟ้าของอากาศ}$$

$$d = \text{ระยะห่างของแกป}$$

เราสามารถหาค่าความถี่คลื่นสนามไฟฟ้าของอากาศ ได้จากสมการ

$$d(E_b - E_c)^2 = K/C$$

เมื่อ

$$E_c = 24.4 \text{ กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร}$$

$$K/C = 45.1 \text{ (กิโลโวลต์)}^2 / \text{เซนติเมตร}$$

$$E_b = 24.4 + \frac{6.72}{\sqrt{d}} \text{ กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร}$$

จากเงื่อนไขของการเบรคดาวัน

$$\alpha(e^{\alpha d} - 1) = 1$$

ให้

$$K = \alpha d$$

จะได้

$$\alpha = C(E_b - E_c)^2$$

ซึ่งสอดคล้องกับสมการของชูมันน์ (Schumann's equation) ที่ได้จาก

เส้นกราฟ การวัดสัมประสิทธิ์ α/P ของอากาศ ได้คือ

$$\frac{\alpha}{P} = 0.191 \frac{(E - 24.4)^2}{P}$$

$$P \quad P$$

α = สัมประสิทธิ์ของการไอออไนเซชันในอากาศ

ที่ความดัน (P) และระยะแกป (D) ค่าแรงดันเบรคดาวันอาจหาได้โดยการใช้เงื่อนไข

ของ $K = \alpha d$ แทนในสมการ

$$U_b = 24.4 pd + 2.24\sqrt{pd} + K$$

Zaengl[5] ได้หาค่า K จากเส้นกราฟ α/P ของชุกซ์แมนและได้ค่า K ของอากาศเท่ากับ 8.63 นำไปแทนค่าจะได้

$$U_b = 24.4 pd + 6.72\sqrt{pd}$$

d = ระยะห่างระหว่างแกน มีหน่วยเป็นเซนติเมตร

P = ความดันบรรยากาศ มีหน่วยเป็นบรรยากาศ (atm)

ซึ่งสมการนี้ใช้ได้กับสภาวะมาตรฐาน

2.4 แฟลคเตอร์ที่มีผลเนื่องจากการวัดแรงดันเบรคดาวน์

การวัดแรงดันเบรคดาวน์ของช่องว่างทรงกลมจะขึ้นอยู่กับแฟลคเตอร์ต่างๆ หลายอย่าง ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$U_b = f(D, S, \&, H)$$

D = เส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกลม

S = ระยะห่างระหว่างทรงกลม

$\&$ = ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของอากาศ

H = ความชื้นของอากาศ

2.4.1 แฟลคเตอร์เนื่องมาจากทรงกลม

รูปร่างของทรงกลมจะมีลักษณะของสนามไฟฟ้าเกือบสม่ำเสมอ ดังนั้นค่าความเค้นของสนามไฟฟ้าสูงสุดกับค่าเฉลี่ยจะแตกต่างกันมาก ค่าแรงดันเริ่มต้น (Threshold voltage) กับแรงดันเบรคดาวน์จะดิ่งขึ้นค่าเดียวกัน เมื่ออะวาลานซ์วิกฤติได้ตามเงื่อนไขก็จะเกิดเบรคดาวน์ทันที โดยไม่มีโคโรน่าเกิดขึ้นก่อนเบรคดาวน์จึงเรียกว่าเป็นเบรคดาวน์โดยตรง แต่ในกรณีอัตราส่วน S/D เพิ่มขึ้น จะทำให้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากขึ้น ทำให้ผลของสิ่งแวดล้อมของทรงกลมมีอิทธิพลมากขึ้น รวมทั้งแรงดันที่เกิดเบรคดาวน์จะมีการกระจายมากขึ้น ดังนั้นอัตราส่วน S/D จึงไม่ควรมากเกินไป ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดมาตรฐานเมื่อเทียบกับขนาดของแรงดันที่จะวัดพอที่จะประมาณได้ดังนี้

$$D \text{ (ในหน่วย มม.)} \geq U \text{ (ในหน่วย กิโลโวลต์)}$$

และตามมาตรฐาน ไออีซี กำหนดค่าระยะห่างระหว่างทรงกลม (S) ไม่ควรเกินครึ่ง

หนึ่งของเส้นผ่าศูนย์กลาง และการกำหนดขนาดเริ่มแรกของช่องว่างทรงกลม ขนาดของทรงกลมจะมีความสัมพันธ์กับแรงดันสูงสุดที่จะใช้ การเกิดเบรคดาวน์หรือสปาร์คระหว่างทรงกลมจะเกิดขึ้นที่จุดใกล้กันมากที่สุดของทรงกลมทั้งสองเรียกว่าจุดสปาร์ค (Sparking point) แต่อาจจะเกิดขึ้นที่บริเวณรอบๆจุดสปาร์คนี้ได้ ทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่าหรือเท่ากับ 25 ซม. จะติดตั้งในแนวนอน แต่ถ้าเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่าจะติดตั้งในแนวตั้งดังรูป

2.4.1.1 มาตรฐานการติดตั้งทรงกลม

พื้นผิวของทรงกลมจะต้องมีความเรียบ และลักษณะของทรงกลมต้องสม่ำเสมอ ซึ่งอาจจะพิจารณาได้ดังต่อไปนี้

- 1) รูปร่างโดยทั่วไปนั้น ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของแต่ละทรงกลมต้องไม่ต่างกันเกินกว่า $\pm 2\%$ จากค่ามาตรฐาน
- 2) พื้นผิวบริเวณจุดสปาร์คหรือบริเวณใกล้จุดสปาร์ค จำเป็นต้องสม่ำเสมอหรือภายในบริเวณที่คิดจากจุดสปาร์คขึ้นมา 0.3 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางทรงกลม
- 3) การวัดความสม่ำเสมออาจใช้เครื่องมือวัด ที่เรียกว่า สเฟียร์โรมิเตอร์
- 4) ลักษณะผิวทรงกลมที่บริเวณใกล้ๆ และที่จุดสปาร์คต้องไม่มีรอยขีดข่วน น้ำมัน ชนิดต่างๆ ต้องมีความสะอาดปราศจากฝุ่นละออง และต้องมีความแห้ง

2.4.2 แพลเตอร์เนื่องมาจากความหนาแน่นของอากาศ

ผลของความดันและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงทำให้ความหนาแน่นของอากาศเปลี่ยนไป ทำให้แรงดันเบรคดาวน์ที่วัดได้มีค่าขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอากาศด้วย ซึ่งอธิบายได้ด้วยระยะทางอิสระ (Mean free path -) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิ (T) และเป็นสัดส่วนกลับกับความดัน ดังสมการต่อไปนี้

$$\lambda = \frac{KT}{42r^2 p} \propto \frac{T}{P}$$

ตามมาตรฐาน[3]แรงดันเบรคดาวน์ค่าที่สภาวะความดัน 760 ทอร์ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส แต่ขณะทำการทดลองไม่ได้ทำที่สภาวะนี้ จึงต้องมีการเทียบค่าที่ถูกคลง (Calibration) โดยการคูณค่าคงที่ตามตารางที่ 2.3 ซึ่งค่าที่ถูกคลง (Collection factor) จะเท่ากับความหนาแน่นของอากาศสัมพัทธ์ (Relative air density - RAD) ระหว่าง 0.95-1.05 ค่าความหนาแน่นของอากาศสัมพัทธ์หาได้จากความสัมพันธ์

$$RAD = \frac{P}{Po} \frac{273+t_0}{273+t}$$

$$Po = 273+t$$

เมื่อ Po = ความดันบรรยากาศที่สภาวะมาตรฐาน

P = ความดันบรรยากาศที่สภาวะห้อง

t = อุณหภูมิที่สภาวะมาตรฐาน

t_0 = อุณหภูมิที่สภาวะห้อง

ความหนาแน่นของอากาศสัมพัทธ์	ตัวคูณที่ถูกต้อง
0.70	0.72
0.75	0.77
0.80	0.82
0.85	0.86
0.90	0.91
0.95	0.96
1.00	1.00
1.05	1.05
1.10	1.09
1.15	1.13

ตาราง 2.3 แสดงค่าตัวคูณที่ถูกต้อง

2.4.3 แพลตฟอร์มเนื่องจากความชื้นในบรรยากาศ

โมเลกุลของน้ำในอากาศมีลักษณะของก๊าซไฟฟ้าลบอ่อนๆ เพราะมีอะตอมของออกซิเจนประกอบอยู่ ทำให้อากาศมีความชื้นอยู่มีผลทำให้ความคงทนทางไฟฟ้าสูงขึ้นตามเท่าที่ความชื้นนี้ยังไม่กลั่นตัวเป็นหยดน้ำ หรือยังไม่ถึงจุดน้ำค้าง แต่ผลของความชื้นที่มีผลต่อสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย มีค่าไม่มากนัก ค่าแรงดันเบรคดาวน์จะเปลี่ยนแปลงไม่แน่นอนแต่จะอยู่ภายในช่วง 2-3% ของทุกช่วงความชื้นที่เปลี่ยนแปลง แต่เนื่องจากไม่มีค่าตัวคูณที่แน่นอนจึง

ต้องอาศัยการทดลองของกัฟเฟิลล์[4]

2.4.4 แฟลคเตอร์อื่นๆที่มีผลต่อแรงดันเบรคดาวน

ผลของฝุ่นละออง คิววัน หรือสิ่งเปราะเปื้อนบนผิวทรงกลม จะมีผลอย่างมากต่อแรงดันเบรคดาวน คือจะทำให้แรงดันลดลงมาก ดังนั้นจึงต้องทำความสะอาดทรงกลมอยู่เสมอ และอากาศจะต้องปราศจากฝุ่นละอองด้วย

ผลของรูปทรงตันอิมพัลส์จะมีผลต่อแรงดันเบรคดาวนคือ แรงดันเบรคดาวนของอิมพัลส์ขั้วบวกจะมีความมากกว่าแรงดันเบรคดาวนของอิมพัลส์ขั้วลบ ในช่วงระยะแกปกว้างๆ ส่วนสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ จะไม่มีผลมากนัก ผลของประจุค้างจะไม่มีผลมากนักต่ออิลคโตรดแบบทรงกลม แต่จะมีผลต่ออิลคโตรดแบบที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง

2.5 วิธีการวัดแรงดันเบรคดาวนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

แรงดันตอนแรกควรที่จะมีขนาดต่ำ พอที่จะไม่ให้เกิดเบรคดาวนก่อนในสภาวะทรานเซียน (Switching transient) แล้วจึงค่อยๆเพิ่มอย่างช้าๆ โดยดูจากด้านความดันต่ำที่มีโวลต์มิเตอร์อยู่ หรืออีกวิธีหนึ่งคือให้แรงดันคงที่ตามที่ประมาณไว้ แล้วจึงค่อยๆลดระยะแกปจนเกิดการเบรคดาวน แต่ถ้าเขม่าคิววันหรือฝุ่นละอองในอากาศจะทำให้เกิดเบรคดาวนที่แรงดันต่ำกว่าที่เป็นจริง โดยเฉพาะแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง สามารถหลีกเลี่ยงด้วยการทำข้อมูลหลายๆครั้งก่อนนำไปใช้ เพื่อไล่ฝุ่นและเขม่าเหล่านี้ ค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดไม่ควรเกิน $\pm 3\%$

2.6 สรุป

การเบรคดาวนด้วยช่องว่างทรงกลมในอากาศ เป็นการที่อิลคโตรดเกิดการแตกตัวซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยกลไกการเบรคดาวนของกาส์โดยใช้กลไกการดีส์ซาร์จแบบทาวนเซนด์และกลไกการดีส์ซาร์จแบบสตีร์มเมอร์ ค่าแรงดันที่วัดได้จากการการเกิดเบรคดาวนด้วยช่องว่างทรงกลมในอากาศขึ้นอยู่กับแฟคเตอร์หลายอย่างด้วยกันคือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกลม, ระยะแกปของช่องว่างระหว่างทรงกลม, ลักษณะพื้นผิวของทรงกลม, ฝุ่นละออง เขม่าคิววัน หรือสิ่งเปราะเปื้อนบนผิวทรงกลม รวมทั้งสภาพแวดล้อมต่างๆขณะทำการทดลอง ได้แก่ความหนาแน่นของอากาศ, ความชื้นในบรรยากาศ และขึ้นอยู่กับชนิดรูปร่างของแรงดันทดสอบด้วย

บทที่ 3

การเกิดเบรคดาวน์ในฉนวนน้ำมัน
(BREAKDOWN IN INSULATING OIL)

3.1 บทนำ

การเบรคดาวน์ในฉนวนเหลวมีกลไกเกิดขึ้นที่ซับซ้อนมาก ในปัจจุบันยังไม่มีทฤษฎีหรือข้อสรุปที่แน่นอนอธิบายการเกิดกลไกนี้ นักวิจัยหลายท่านได้นำเอาพื้นฐานของการเบรคดาวน์ในก๊าซและของแข็งเป็นแนวทางในการอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น เนื่องจากการเบรคดาวน์ในฉนวนเหลวมีปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องในการเบรคดาวน์หลายตัว มีผลให้แรงดันเบรคดาวน์ในฉนวนเหลวลดลง ดังนั้นในการพัฒนาฉนวนเหลวตัวใหม่ขึ้นมาใช้งานในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงต้องศึกษาผลกระทบจากปัจจัยนั้นๆ เพื่อจะได้ทำการป้องกันและปรับปรุงคุณภาพของฉนวนเหลวให้ดีขึ้นและมีความปลอดภัยในการใช้งานมากขึ้น

การศึกษาแรงดันเบรคดาวน์ของฉนวนน้ำมันในระบบไฟฟ้าแรงสูง เพราะฉนวนน้ำมันจะต้องมีคุณสมบัติของการทนแรงดันได้สูง เพื่อทำหน้าที่เป็นฉนวนในหม้อแปลงหรือในเซอร์กิตเบรคเกอร์ แต่ถ้าแรงดันที่ใช้งานเกินกว่าแรงดันเบรคดาวน์ของฉนวนน้ำมัน ก็จะทำให้เสียสภาพการเป็นฉนวนได้ ดังนั้นจึงต้องมีการทดสอบแรงดันสูงสุดก่อนการใช้งานเสมอ

ในการศึกษาแรงดันเบรคดาวน์ของฉนวนน้ำมันนั้น จะศึกษาถึงแฟคเตอร์ต่างๆที่มีผลต่อการวัดแรงดันเบรคดาวน์ เช่น ระยะเวลา ชนิดและขนาดของอิเล็กโตรดรวมทั้งโลหะที่มากำหนด อิเล็กโตรดด้วย อุณหภูมิ ความดัน และสิ่งเจือปนเป็นความชื้นหรือของแข็ง กับผลของระยะเวลาและผลของปริมาณสิ่งเจือปน

3.2 คุณสมบัติต่างๆของน้ำมันในการทำเป็นฉนวนไฟฟ้า

น้ำมันเป็นสารไดอิเล็กทริก (Dielectric) ประเภทหนึ่ง คือเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ในการคั่นระหว่างอิเล็กโตรด โดยสามารถทนแรงดันสูงๆได้ โดยส่วนมากแล้วจะมีความเครียดสนามไฟฟ้าหรือความคงทนต่อแรงดันเบรคดาวน์เป็นหลายๆเท่าของฉนวนอากาศที่สภาวะห้อง (atmospheric) ซึ่งในการปฏิบัติงานแล้วจะต้องมีตัวบอกคุณสมบัติของไดอิเล็กทริก เช่น คุณสมบัติทางด้านเคมี ฟิสิกส์ เทคโนโลยีทางการประกอบ และคุณสมบัติทางไฟฟ้า เพื่อให้ได้คุณสมบัติของฉนวนน้ำมันตามต้องการซึ่งมีดังนี้

1. การวัดค่าความนำไฟฟ้า (Conductivity Measurement) หรือค่าความต้านทานของฉนวนน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ค่าเปอร์มิติวิตีหรือค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (Permittivity or dielectric constant)
3. การวัดค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสีย (Dissipation factor measurement)
4. การวัดค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของไดอิเล็กตริก (Dielectric strength)

3.2.1 การวัดค่าความนำไฟฟ้าของน้ำมัน

ฉนวนไฟฟ้าที่ดีต้องไม่มีการนำกระแสเลยเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง คือจะไม่มีค่าความนำไฟฟ้า นั่นคือมีค่าความต้านทานสูงมากๆ แต่ในทางปฏิบัติแล้วจะไม่มี การนำไฟฟ้า อยู่บ้างแต่มีค่าน้อยมาก ดังนั้นฉนวนน้ำมันที่ดีควรมีค่าความนำไฟฟ้าต่ำที่สุด การวัดนั้นทำได้โดยป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จนกระทั่งอิ่มตัวแล้วจะมีกระแสรั่ว (Leakage current) เกิดขึ้นไหลผ่านน้ำมัน หรือผ่านผิวของฉนวน เนื่องจากมีความเปราะเปื้อน

ค่าความนำไฟฟ้า (Conductivity, K) ของฉนวนน้ำมันจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไอออน อิมพัลส์และสิ่งเจือปนที่มีอยู่ซึ่งเป็นผลของการเคลื่อนที่ของไอออน จะเปลี่ยนแปลงประมาณ 10^{-15} ถึง 10^{-13} ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร สำหรับน้ำมันที่มีส่วนผสมของน้ำอยู่ถึง 200 พีพีเอ็ม ค่าความนำไฟฟ้านั้น จะบอกความบริสุทธิ์ของน้ำมันได้ดี ไอออนบวกและไอออนลบ จะเกิดจากขบวนการอิเล็กโตรไลต์ของสิ่งเจือปน ซึ่งมีประจุเป็น q_1 และความหนาแน่นเป็น n_1 จะสามารถหาค่าความหนาแน่นของกระแสในขณะที่มีสนามไฟฟ้าไม่สูงนัก เป็น

$$S = q_1 * n_1 * V$$

แต่ $V = b_1 * E$

เมื่อ $S =$ ความหนาแน่นของกระแส

$V =$ ความเร็วของไอออน

$b_1 =$ ความสามารถในการเคลื่อนที่ของไอออน

$E =$ สนามไฟฟ้า

ให้ $K = q_1 * n_1 * b_1$ เป็นไปตามกฎของโอห์ม จะได้

$$S = KE$$

ค่าความนำไฟฟ้ายังขึ้นกับเวลาอีกด้วย เนื่องจากเมื่อมีสนามไฟฟ้าให้แก่ไดอิเล็กตริกขบวนการชดเชยจะเกิดขึ้น ในลักษณะที่จะสมดุลกับความหนาแน่นของไอออนแต่ละชนิด จนกระทั่งมีการสมดุลกันระหว่างการสร้างและการรวมตัวกันใหม่ (Generation-regeneration) และไอออนที่รั่ว (Leakage ion) เข้าไปที่อิเล็กโทรด เนื่องมาจากมีค่าความสามารถในการเคลื่อนที่ (Mobility-b) ของไอออนต่างกันขบวนการชดเชยจะมีอัตราการเกิดต่างกัน ดังนั้นในการวัดค่าความนำไฟฟ้าควรรอจนกระทั่ง ภาวะทรานเซียนเริ่มแรกหมดไปก่อนแล้วจึงค่อยวัด

3.2.2 ค่าเปอร์มิตทิวิตี (Permittivity)

ค่าเปอร์มิตทิวิตี หรือค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (Dielectric constant-) ไม่มีหน่วย เป็นตัวกำหนดถึงลักษณะของไดอิเล็กตริก หรือฉนวนไฟฟ้าของน้ำมันเป็นตัวกำหนดความสามารถของการสร้าง คະປາซิเตนจ์ของน้ำมัน หรือกล่าวว่ามีค่าคະປາซิเตนจ์ เป็นกึ่งตัวของคະປາซิเตนจ์ของสุญญากาศ นั่นคือ

$$C = \epsilon C_0$$

เมื่อ

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$$

ϵ_0 = ค่าเปอร์มิตทิวิตีของสุญญากาศ มีค่า 8.854×10^{-12} ฟารัดต่อเมตร

ϵ_r = ค่าเปอร์มิตทิวิตีสัมพัทธ์ของน้ำมัน

ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ คือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าจะเพิ่มมากขึ้น

3.2.3 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กตริก

ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนน้ำมัน (E_b) หมายถึงความเครียดสนามไฟฟ้า (electric field stress) สูงสุดของน้ำมัน นั้นสามารถทนอยู่ได้โดยไม่มีความเสียหาย เกิดเบรคดาวน หรือทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพ มีหน่วยเป็นกิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร หรือแรงดันไฟฟ้าต่อความกว้างของอิเล็กโทรด การหาความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กตริกจะหาจากสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ เช่นการใช้อิเล็กโทรดเป็นทรงกลมแล้วป้อนแรงดันให้จนกระทั่งเบรคดาวนซึ่งความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนน้ำมันนี้จะทำการทดลองในวิทยานิพนธ์ต่อไป

3.3 คุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ทดสอบ

คุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งก็คือ การทนต่อแรงดันสูงสุดของน้ำมันหม้อแปลง และเนื่องจากของเหลวที่เป็นน้ำมันหม้อแปลงนี้ มีความต้านทานสูงมาก และไม่เปลี่ยนสภาพทางฟิสิกส์ในช่วงเวลานานพอสมควร แต่การที่จะให้มีความมั่นใจในคุณสมบัติของน้ำมัน เมื่อนำไปใช้ใน

ระบบแรงดันสูงได้อย่างปลอดภัย ไม่เกิดความผิดพลาด มีอายุการใช้งานนาน และถูกหลัก
 ประหยัด จึงจำเป็นต้องมาศึกษาคุณสมบัติต่างๆของน้ำมันหม้อแปลงก่อนนำไปใช้งาน คุณสมบัติ
 ของน้ำมันหม้อแปลงพอจะสรุปออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

1. คุณสมบัติทางฟิสิกส์
2. คุณสมบัติทางเคมี
3. คุณสมบัติทางไฟฟ้า

โดยขอบเขต และข้อจำกัดลักษณะคุณสมบัติของน้ำมัน ขึ้นอยู่กับลักษณะอุปกรณ์ไฟฟ้า
 แรงสูงที่จะนำไปใช้งาน เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า เซอร์คิตเบรกเกอร์ เคเบิล และ คาปาซิเตอร์
 และกระดาษซับน้ำมัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดของฉนวนในหม้อแปลงตามมาตรฐาน IEC
 Publ. 296 [2]

โดยหลักการแล้วฉนวนน้ำมันควรทำหน้าที่ได้ดีกว่าฉนวนที่เป็นของแข็งและก๊าซที่ดี
 กว่าก๊าซเพราะว่ามีความหนาแน่นสูงกว่าจึงมีความคงทนต่อแรงดันสูงกว่า และดีกว่าของแข็งก็
 เพราะว่าน้ำมันสามารถกลับคืนสู่สภาพการเป็นฉนวนได้หลังจากเบรคดาว์นแล้ว และสามารถระ
 บายความร้อนได้ดีกว่า แต่ในทางปฏิบัติฉนวนน้ำมันไม่บริสุทธิ์ จึงมีความคงทนต่อแรงดันต่ำมาก
 จึงไม่นิยมใช้ ซึ่งคุณสมบัติอื่นๆ ของน้ำมันหม้อแปลงจะมีดังนี้

3.3.1 จุดติดไฟ (flash point)

คือน้ำมันหม้อแปลงจะมีคุณสมบัติของจุดติดไฟสูง ทำให้โอกาสที่จะเกิดการลุกไหม้
 ยากขึ้น และจะต้องไม่เกิดการระเบิด หรือกาชพิษเมื่อติดไฟ รวมทั้งมีความทนต่อความร้อนสูง

3.3.2 ความหนืด (viscosity)

จะเป็นตัวกำหนดการระบายความร้อนของน้ำมัน ถ้าความหนืดมาก การหมุนเวียน
 ของน้ำมันจะต่ำ การระบายความร้อนจึงน้อย และอาจทำให้ทนแรงดันได้ต่ำลง เพราะไม่สาม
 ารถกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นได้ออกไป จึงเป็นการเพิ่มความสกปรกในน้ำมันให้มากขึ้น

3.3.3 ความเป็นกรด (total acid)

3.3.4 ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity)

ดังนั้นในการเลือกฉนวนน้ำมันที่ดี ต้องเลือกน้ำมันที่มีคุณสมบัติทนต่อแรงดันได้สูง
 มีการระบายความร้อนที่ดี ทนต่อปฏิกิริยาทางเคมีได้ มีแฟลคเตอร์พลังงานสูญเสียต่ำและ
 สามารถทนต่อความร้อนได้สูง หรือติดไฟได้ยาก ไม่เกิดกาชพิษเมื่อติดไฟ รวมทั้งราคาประ
 หยัด คุณสมบัติต่างๆ

เหล่านี้ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันที่ใช้

3.4 กลไกการเกิดเบรคดาว์ของฉนวนน้ำมัน

ลักษณะการเกิดเบรคดาว์ของน้ำมันเมื่อแปลงในภาชนะทดสอบโดยใช้อิเลคโตรด เป็นทรงกลม จะเกิดกระแสรั่วระหว่างอิเลคโตรด เมื่อเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้นจะทำให้เกิดการสปาร์คระหว่างอิเลคโตรดผ่านน้ำมัน ทำให้เกิดกระแสไหลอย่างมากมาย โดยจะจำกัดกระแสเหล่านี้ โดยความต้านทานภายนอกของวงจร มีกระแสรั่วระหว่างอิเลคโตรด เกิดฟองก๊าซจำนวนมาก มีเขม่าสีดำนวลยที่สัมผัสของน้ำมัน และส่วนประกอบอื่นๆ เนื่องมาจากปฏิกิริยาทางเคมี ความต้านทานของน้ำมันจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ค่าแรงดันเบรคดาว์ที่วัดได้นี้จะถูกกำหนด ในการหาความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันต่อไป

เนื่องจากยังไม่มีทฤษฎีที่จะอธิบายการเกิดเบรคดาว์ของฉนวนน้ำมันได้ดี เพราะ ว่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้านั้นขึ้นอยู่กับแฟคเตอร์หลาย ๆ อย่าง เช่น ลักษณะคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของฉนวนดังกล่าวมาแล้ว ชนิดและปริมาณของสิ่งเจือปน ตลอดจนลักษณะของอิเลคโตรดจึง ได้มีทฤษฎีในการอธิบายการเกิดเบรคดาว์ในฉนวนเหล่านี้เป็นน้ำมันออกเป็น 2 แนวคือ

ทฤษฎีที่ 1 โดย Lewis, Sharbaugh, Watson, Swan [4] สมมติว่าฉนวนของเหลวเป็นเนื้อเดียวกันตลอด โดยไม่มีสิ่งเจือปน ซึ่งอธิบายการเกิดเบรคดาว์ได้เช่นเดียวกับก๊าซ โดยอาศัยการเกิดอะวาลานซ์ของอิเลคตรอนจากขบวนการไอออไนเซชันในสนามไฟฟ้า

ทฤษฎีที่ 2 คำนึงถึงสิ่งแปลกปลอม โดยไม่คำนึงถึงว่าการเกิดเบรคดาว์นั้นอาจเกิดจากฉนวนเหลวได้เช่นกัน ซึ่งทฤษฎีนี้อาจแบ่งออกเป็นกาเกิดเบรคดาว์เนื่องมาจากโพรงหรือ ฟองก๊าซ (Cavitation or Bubble Breakdown) ซึ่งความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า น้อยกว่าฉนวนเหลวจึงทำให้เกิดการเบรคดาว์เสนอโดย Kao [4] และการเบรคดาว์เนื่องมาจากสิ่งเจือปนของแข็ง (Suspended Particle Breakdown) ซึ่งเป็นต้นเหตุให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงขึ้นเป็นบางแห่ง ทำให้นำไปสู่การเกิดเบรคดาว์ของของเหลวทั้งหมด เสนอโดย J. A. Kok, Corbey, etc. [4]

3.4.1 การเกิดเบรคดาว์ของของเหลวบริสุทธิ์โดยสนามไฟฟ้า (Electronic Breakdown)

ของเหลวบริสุทธิ์จะมีเนื้อเดียวกันตลอดปราศจากสิ่งเจือปน จึงศึกษาได้จากการเบรคดาว์ของก๊าซ โดยขบวนการที่อิเลคตรอนแตกตัวออกจากคาโทด (field emission and thermal emission) ซึ่งพิจารณากระแสที่คาโทด จะเกิดสภาพนำไฟฟ้าขึ้นเมื่อ

ป้อนสนามไฟฟ้าให้ จะได้กระแสสังกการชอตกี้ (Schottky's equation) คือ

$$J = J_t \cdot \exp (4.44 \sqrt{E}) / T$$

$$J_t = AT^2 \cdot \exp (-\phi) / KT$$

เมื่อ J = ความหนาแน่นของกระแส

T = อุณหภูมิของขงเหลว

A = พื้นที่หน้าตัดของขงเหลว

ϕ = เส้นแรงไฟฟ้า

E = สนามไฟฟ้า

เมื่อ J_t จะแทนค่ากระแสเนื่องจากอุณหภูมิ (thermionic current density) สนามไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อความขรุขระของผิวอิเล็กโตรดเพิ่มขึ้น (M) ต้องนำมาคำนวณด้วย โดยการแทนค่า E ด้วย MEa

เมื่อ M เป็นแฟคเตอร์ที่กำหนดความขรุขระของผิวจะมีค่าเท่ากับ 10 สำหรับผิวมัน

Ea คือสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป

จากสมการแสดงให้ เห็นว่าความหนาแน่นกระแสขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ แต่จากการทดลองจะมีผลน้อยมากในช่วงอุณหภูมิมากๆ แสดงให้เห็นว่าขบวนการเกิดการนำไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดนั้นขึ้นอยู่กับขบวนการแตกตัวโดยสนามไฟฟ้ามากกว่า หรือขึ้นอยู่กับแรงดันที่ไออนให้

ในการเกิดการนำไฟฟ้านั้น เกิดเมื่ออิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวอิเล็กโตรดเข้าไปในขงเหลว จะได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นจากสนามไฟฟ้า ในทฤษฎีของอิเล็กโตรนิคส์แบเรคควานนี้ สมมุติว่าอิเล็กตรอนบางตัวมีพลังงานมากพอ คือมากกว่าการสูญเสียเนื่องจากการชนกันกับโมเลกุลของขงเหลว อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกเร่งโดยสนามไฟฟ้าจนกระทั่งมีพลังงานมากพอที่จะโคกลไนท์โมเลกุลโดยการชน และเป็นจุดเริ่มต้นของอะวาลานซ์

เงื่อนไขของการเกิดอะวาลานซ์ของอิเล็กตรอน ได้จากที่อิเล็กตรอนมีพลังงานมากกว่าพลังงานไออนไนท์เซฟี่ของโมเลกุลคือ

$$eE\lambda = C \cdot h\nu$$

เมื่อ $E =$ สนามไฟฟ้าที่ป้อน

$\lambda =$ ระยะอิสระเฉลี่ยของอิเล็กตรอน

$h\nu =$ พลังงานควอนตัมที่สูญเสียในการไอออไนซ์เซชันของโมเลกุล

$C =$ ค่าคงที่

ทฤษฎีนี้จะสามารถทำนายความสัมพันธ์ของขนาดของแรงดันที่ทำให้เบรคควาน์ได้ แต่อย่างไรก็ตามไม่สามารถอธิบายเรื่องเวลาล่าช้า (Time lag) ที่เกิดในกลไกการเกิดเบรคควาน์ได้

3.4.2 การเกิดเบรคควาน์เนื่องจากโพรงและฟองก๊าซ

Kao กล่าวว่า การเกิดเบรคควาน์ในของเหลวอาจเกิดฟองก๊าซ (Bubble) ได้หลายสาเหตุเนื่องจาก

1. มีฟองก๊าซอยู่ที่ผิวของอิเล็กโทรด
2. เนื่องจากแรงทางอิเล็กโตรสแตติกระหว่างกลุ่มประจุด้วยกัน ซึ่งอาจมีค่ามากกว่าแรงดึงผิวที่อิเล็กโทรด
3. เกิดฟองก๊าซเนื่องจากการแตกตัวของโมเลกุลของของเหลว เนื่องมาจากการชนของอิเล็กตรอน
4. เกิดโคโรนาดีสชาร์จทำให้ของเหลวระเหยกลายเป็นไอ

เมื่อมีฟองก๊าซเกิดขึ้น ฟองก๊าซจะพยายามเรียงตัวหรือขยายตัวในแนวสนามไฟฟ้า เพื่อลดพลังงานศักย์ลง Kao สมมุติว่าฟองก๊าซมีปริมาตรคงที่ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแทนเบรคควาน์จะเกิดขึ้นเมื่อแรงดันความยาวตกคร่อมของฟองก๊าซมีค่าเท่ากับค่าต่ำสุดของเส้นโค้งพาสเซิน ของฟองก๊าซนั้น

Alton ได้คำนวณความเค้นตึงสนามไฟฟ้าของฟองก๊าซ E_g ของของเหลวที่มีค่าเปอร์มิททิวิตี คือ

$$E_g = 2E_0 / 2 + 1$$

เมื่อ $E_0 =$ ความเค้นตึงสนามไฟฟ้าของของเหลวเมื่อไม่มีฟองก๊าซ

จะเกิดเบรคควาน์เมื่อมีค่า Eg เท่ากับความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติของภาชนะนี้จะทำให้เกิดดีสชาร์จผ่านฟองภาชนะ ทำให้โมเลกุลของทองเหลืองแตกตัวออกทำให้เกิดเบรคควาน์ทั้งหมดระหว่างอิเล็กโตรด ถ้าอิเล็กโตรดมีความทึบจะทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงจนทองเหลืองกลายเป็นไอ ทำให้เกิดการดีสชาร์จผ่านไอทำให้เกิดฟองภาชนะขึ้นอีกได้ นำไปสู่การเกิดเบรคควาน์ต่อไป

กรณีหยดน้ำป้อนอยู่มีลักษณะเป็นทรงกลม สนามไฟฟ้าจะเกิดขึ้นเนื่องมาจากการยึดของหยดน้ำตามแนวสนามไฟฟ้า ทำให้เกิดการเบรคควาน์ตามแนวนี้

แต่กรณีทีอิเล็กโตรดเป็นทรงกลม อาจจะมีเกิดเนื่องมาจากโมเลกุลของน้ำเล็กๆ เรียงตัวกันตามแนวสนามไฟฟ้า และเกิดเบรคควาน์ตามกลไกที่กล่าวมาแล้ว

3.5 ผลของระยะแกปที่มีต่อแรงดันเบรคควาน์

แฟลคเตอร์ที่มีผลต่อแรงดันเบรคควาน์ของฉนวนไฟฟ้าของเหลวคือ ระยะห่างของแกป กระบวนการเกิดเบรคควาน์ที่กล่าวมาทั้งหมดเป็นเพียงการกล่าวถึงความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงสุด แต่ไม่ได้รวมผลของระยะแกปไว้ด้วย

ระยะแกปที่มีผลต่อแรงดันเบรคควาน์ในฉนวนเหลวคือ แรงดันเบรคควาน์จะแปรตามระยะแกป สาเหตุที่ทำให้แรงดันเบรคควาน์สูงขึ้น เนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของไอออนที่เป็นประจุบวกเคลื่อนที่มากขึ้นจึงต้องใช้แรงดันสูงกว่าเดิม ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอถ้าระยะแกปมากขึ้นสนามไฟฟ้าจะมีค่าคงที่ นั่นคือสนามไฟฟ้าจะไม่แปรตามระยะแกป และภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสนามไฟฟ้าจะลดลงเมื่อระยะแกปมากขึ้นมีลักษณะ

การหาความสัมพันธ์ของระยะแกป(d) และแรงดันเบรคควาน์ (U_b) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$U_b = kd^n$$

เมื่อ k = ค่าคงตัว

d = ระยะแกป

n = ค่าคงตัวปกติน้อยกว่าหนึ่ง

ในการประมาณโดยวิธีนี้ให้ข้อผิดพลาดมากเมื่อระยะแกปมากขึ้น

3.6 ผลของลักษณะอิเล็กโตรดที่มีผลต่อแรงดันเบรคดาวน์

3.6.1 รัศมีความโค้งของอิเล็กโตรด

รัศมีความโค้งของอิเล็กโตรดที่มีผลต่อแรงดันเบรคดาวน์ มากในกรณีที่จำนวนเหลวอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ผลของรัศมีความโค้งที่มีผลต่อแรงดันเบรคดาวน์ ถ้าลดค่า r_0 ให้น้อยลง สนามไฟฟ้า E_r จะเพิ่มมากขึ้น ความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าจะเพิ่มมากขึ้น ถ้าเพิ่มค่า r_0 ให้มากขึ้น สนามไฟฟ้า E_r ลดน้อย ความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าลดลง และมีผลให้แรงดันเบรคดาวน์ มีค่ามากขึ้น(ไม่คิดประจุค้าง)

3.6.2 รูปร่างทางเรขาคณิตของอิเล็กโตรด

ลักษณะรูปร่างทางเรขาคณิตของอิเล็กโตรดที่แตกต่างกันมีผลให้การกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าแตกต่างกัน เป็นแบบสม่ำเสมอ แบบสม่ำเสมอเล็กน้อย แบบไม่สม่ำเสมอ และรูปร่างทางเรขาคณิตจะมีผลต่อแรงดันเบรคดาวน์ มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะของสนามไฟฟ้าว่าเป็นแบบสม่ำเสมอ หรือไม่สม่ำเสมอ อธิบายได้โดยค่า ส.ป.ส. แฟคเตอร์สนามไฟฟ้าสามารถบอกการกระจายของสนามไฟฟ้าระหว่างแกป ถ้าสนามไฟฟ้าเป็นแบบไม่สม่ำเสมอมาก ๆ ค่าส.ป.ส. แฟคเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่าสูง แบบสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอค่านี้เท่ากับหนึ่ง ความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้ามีผลทำให้ความเครียดของสนามไฟฟ้าสูง เกิดประจุค้างง่ายมีผลให้แรงดันเบรคดาวน์เปลี่ยนไปกรณีไอออนแรงดันลบ และลดลงกรณีไอออนแรงดันบวก คั่งนี้รูปร่างเรขาคณิตของอิเล็กโตรดที่ต่างกัน ทำให้ค่าส.ป.ส. แฟคเตอร์สนามไฟฟ้าต่างกันมีผลให้แรงดันเบรคดาวน์ ของจนวนเหลวมี่ค่าต่างกันด้วย

3.6.3 สารโลหะที่ใช้ทำอิเล็กโตรด

สารโลหะที่ใช้ทำอิเล็กโตรดมีส่วนสำคัญในขบวนการเบรคดาวน์ แรงดันเบรคดาวน์ เป็นฟังก์ชันของสารโลหะที่ใช้ทำอิเล็กโตรด สาเหตุที่ทำให้แรงดันเบรคดาวน์ ในจนวนเหลวมี่ค่าต่างกัน เนื่องมาจากอิเล็กโตรดจะปลดปล่อยอิเล็กตรอนเนื่องจากการให้พลังงานเข้าไป เมื่ออิเล็กตรอนมีพลังงานมากพอที่จะเอาชนะแรงยึดเหนี่ยว (Work function) ของผิวอิเล็กโตรด อิเล็กตรอนจะถูกปลดปล่อยออกมา และการเกิดอิเล็กตรอนโดยลักษณะนี้มีทฤษฎีอธิบาย 3 แบบคือ การปลดปล่อยแบบความร้อนและสมการของช็อคกี การปลดปล่อยแบบโฟโตอิเล็กทริก; $h\nu > \phi$ และการปลดปล่อยแบบสนามไฟฟ้า ตัวแปรสำคัญคือ ค่าแรงยึดเหนี่ยวภายในโลหะ ในโลหะแต่ละชนิดมีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวแตกต่างกันออกไป และเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่าแรงดันเบรคดาวน์มีค่าต่างกันเมื่อใช้โลหะต่างชนิดกันทำอิเล็กโตรด

3.6.4 พื้นที่ผิวของอิเล็กโทรด

จากการสืบสวนผลของพื้นที่ผิวของอิเล็กโทรดต่อค่าแรงดันเบรคดาวน์ในของเหลว n-hexane โดย Sharbaugh ได้รายงานว่า ถ้าพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าจะลดลง และเมื่อพื้นที่ผิวของอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้นประมาณ 50% ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าจะลดลงประมาณ 20% ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ขณะเกิดการเบรคดาวน์จะเกิดประกายไฟและเกิดการสีกกร่อนมีรูพรุนที่ผิวของอิเล็กโทรด การเบรคดาวน์ครั้งต่อไปจะไม่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งเดิมแต่จะเกิดที่ตำแหน่งใหม่บนผิว ถ้าอิเล็กโทรดมีพื้นที่ผิวมาก โอกาสที่จะเกิดความไม่เรียบหรือมีรูพรุนจะมีมาก ในขณะที่เดียวกันจะมีพื้นที่ผิวส่วนที่เรียบมากเช่นกัน

3.6.5 อุดหนุน

ความเครียดทางไฟฟ้าของฉนวนเหลว ประเภทไฮโดรคาร์บอนจะสัมพันธ์กับอุดหนุนที่อยู่ที่อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรงและเป็นลูกคลื่น การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเบรคดาวน์รอบๆอุดหนุนที่ห้องมีน้อยมากและอย่างช้าๆ และจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากเมื่ออุดหนุนมีค่าต่ำหรือสูงมากๆ มีการเคลื่อนพลังงานจากคาโทด การเปลี่ยนแปลงอธิบายโดยใช้สมการของช็อดท์หรือสมการการปลดปล่อยแบบความร้อน จะเห็นได้ว่ากระแสเริ่มต้นจะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุดหนุนมีสูงขึ้น และถ้ากระแสเริ่มต้นไหลมีมาก การแตกตัวของอิเล็กตรอนในโมเลกุลเพิ่มขึ้นเป็นสาเหตุของการเบรคดาวน์ เนื่องจากการเบรคดาวน์ แต่ละครั้งขึ้นอยู่กับจำนวนอิเล็กตรอนหรือไอออน จะมีค่าแน่นอนในการทำให้เกิดการเบรคดาวน์ ดังนั้นที่อุดหนุนใกล้เคียงกันกระแสเริ่มต้นไม่แตกต่างกันมากเป็นผลให้ที่บริเวณอุดหนุนใกล้เคียงกันมีแรงดันเบรคดาวน์แตกต่างกันเล็กน้อย นอกจากนี้อุดหนุนยังทำให้ความหนาแน่นและความหนืดลดลง และเมื่ออุดหนุนสูงขึ้นยังทำให้เกิดการสิ้นสะเก็อน มีพลังงานสะสมในโพหังณะของโมเลกุลในฉนวนเหลวตามหลักสมดุลพลังงานของ Von Hippel และมีผลสรุปว่าแรงดันเบรคดาวน์ จะลดลงเมื่ออุดหนุนสูงขึ้น

3.7 ผลของรูปแรงดันต่อแรงดันเบรคดาวน์

ค่าแรงดันเบรคดาวน์ของของเหลวขึ้นอยู่กับรูปคลื่นแรงดันที่ป้อน และช่วงเวลาของการป้อน (Duration time) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าที่มีอยู่ ค่าความคงทนของฉนวนเหลวต่อแรงดันคงตัว (AC, DC) จะมีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันอิมพัลส์ ปรากฏการณ์เช่นนี้อธิบายได้ด้วยหลักการล่าช้าของการเบรคดาวน์

3.8 สรุป

จากการศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อแรงดันเบรคดาว์ในฉนวนเหลวพบว่า มีปัจจัยที่มีผลต่อแรงดันเบรคดาว์มากกว่าในก๊าซและของแข็ง ปัจจัยที่มีผลมากได้แก่ ความชื้น, ระยะแกป ฟองอากาศ, สิ่งเจือปนที่เป็นของแข็ง, โครงสร้างของโมเลกุล และผลของประจุค้าง ส่วนที่มีผลน้อย (มีผลมากในด้านเคมี) ได้แก่ อุณหภูมิ สารละลาย และออกซิเจนที่ปะปน เมื่อรู้ปัจจัยต่างๆแล้วสามารถนำไปออกแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่มีน้ำมันเป็นฉนวนไฟฟ้า



บทที่ 4

ขบวนการแช่เย็น

4.1 บทนำ

ขบวนการแช่เย็นเป็นการพัฒนาคุณสมบัติทางกลของวัสดุ ซึ่งในการทำขบวนการแช่เย็นนั้นจะนำโลหะไปแช่เย็น ซึ่งในโครงการนี้ใช้สารไนโตรเจนเหลวเป็นสารหล่อเย็น ในการใช้สารไนโตรเจนเหลวนั้น ต้องศึกษาถึงคุณสมบัติ และข้อควรระวัง[๒] ในการใช้สารนี้เนื่องจากไนโตรเจนเป็นสารที่มีพิษต่อร่างกายของมนุษย์ เมื่อวัสดุผ่านการแช่เย็นแล้วจะทำให้โครงสร้างภายในเปลี่ยนไป

4.2 กรรมวิธีการแช่เย็น

เมื่อทำการผลิตอิเล็กทรอนิกส์ โดยการกลึงและทำเกลียวให้ได้ตามมาตรฐานตามที่กำหนดจากนั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมด มาเจียขัดผิวให้เรียบเพื่อลบรอยกลึง หลังจากนั้นจึงนำอิเล็กทรอนิกส์ไปขัดเงาด้วยน้ำยาขัดเงาโลหะ (Brasso) แล้วนำไปผ่านขบวนการแช่เย็น

ขบวนการแช่เย็นเป็นขบวนการที่ทำให้วัสดุมีคุณสมบัติดีขึ้นมีความคงทนต่อการสึกกร่อน การแตกร้าว หรือการบิดงอมากขึ้น ทำให้มีอายุการใช้งานมากขึ้น ในการแช่เย็นนี้ไม่สามารถเปลี่ยนสภาพจากวัสดุที่มีคุณภาพต่ำให้มีคุณภาพสูงได้รวมทั้งจะไม่เพิ่มความแข็งหรือเปราะให้วัสดุ

กรรมวิธีในการแช่เย็น จะทำในห้องเย็นที่ออกแบบพิเศษ โดยมีผนัง 2 ชั้น ช่องว่างระหว่างผนังจะเป็นช่องสำหรับบรรจุไนโตรเจนเหลว ส่วนชิ้นงานจะอยู่ตรงกลางห้อง เมื่อเริ่มบรรจุไนโตรเจนเหลวเข้าระหว่างช่องผนัง อุณหภูมิภายในห้องจะลดลงอย่างช้าๆ การลดอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องไปจนมีอุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส (77 องศาเคลวิน เป็นจุดเดือดของไนโตรเจนเหลว) ใช้เวลานาน 8 ชั่วโมง การแช่อิเล็กทรอนิกส์ที่อุณหภูมินี้ใช้นาน 20 ชั่วโมง แล้วจึงเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นจนมีอุณหภูมิห้องอย่างช้าๆ ในการเพิ่มอุณหภูมิในตอนท้ายนี้ใช้เวลานาน 30 ชั่วโมง เมื่อผ่านขบวนการแช่เย็นแล้วต้องนำชิ้นงานไปอบคลายเครียด (Stress relieving) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง รวมทั้งกระบวนการกินเวลานาน 60 ชั่วโมง

การที่ต้องมีผนังกันไม่ให้ไนโตรเจนเหลวกระทบกับชิ้นงานโดยตรง เพื่อไม่ให้อุณหภูมิของชิ้นงานเปลี่ยนแปลงเร็วเกินไป ซึ่งจะทำให้ชิ้นงานแตกร้าวได้ การลดหรือเพิ่มอุณหภูมิอย่างรวดเร็วเป็นสิ่งที่ไม่ควรทำเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากอิเล็กทรอนิกส์ในโลหะนั้นมีความเร็วค่าหนึ่งที่อุณหภูมิห้อง เมื่อนำโลหะไปแช่เย็นความเร็วของอิเล็กทรอนิกส์จะลดลงและเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เมื่อ

ลดและเพิ่มอุณหภูมิให้กับชิ้นงานอย่างช้าๆ หากลดและเพิ่มอุณหภูมิอย่างรวดเร็วจะมีผลทำให้มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของอิเล็กตรอนอย่างรวดเร็วจากอิเล็กตรอนที่วิ่งอยู่บนหุคหนึ่ง และจากหุคหนึ่งกลับไปมีความเร็วค่าหนึ่ง จากปรากฏการณ์นี้จะทำให้เกิดรอยแตกร้าวที่ผิวของโลหะได้ เนื่องจากอิเล็กตรอนที่ผิวของโลหะมีช่วงเวลาในการปรับตัวน้อยเกินไป การอบคลายเครียดเป็นการเพิ่มความเหนียวและความแข็งแรง และยังทำให้เกิดผลึกของโลหะละเอียดมากขึ้น

4.3 คุณสมบัติของไนโตรเจนเหลว

ในขบวนการแช่แข็งชิ้นงานนี้ใช้สารไนโตรเจนเหลว เป็นตัวกลางในการแช่แข็ง ซึ่งสารไนโตรเจนเหลวมีคุณสมบัติ ดังนี้

1. สัญลักษณ์ (Symbol) คือ N_2
2. น้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight) เท่ากับ 28
3. จุดเยือกแข็ง (Melting temperature) เท่ากับ $-210^{\circ}C$
4. จุดเดือด (Boiling temperature) เท่ากับ $-196^{\circ}C$
5. สถานะ (State) ที่ $25^{\circ}C$ คือ ก๊าซ
6. การระเหย (Vaporize) เท่ากับ 24.6 ฟุต^3 (0.3 เมตร^3) ต่อ 1 ลิตร
7. สี (Colour) มีสีเงิน สีขาว หรือไม่มีสี
8. ไม่มีกลิ่น

4.4 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโลหะเมื่อถูกนำมาผ่านขบวนการแช่แข็ง

จากกรรมวิธีทางความร้อน เป็นปฏิบัติการในการให้ความร้อนแก่โลหะและทำให้เย็นตัวลงสภาพของแข็งเมื่อเปลี่ยนคุณสมบัติทางกายภาพ ทำให้โลหะเหล็กกล้ามีความแข็งแรงและต้านทานความกัดกร่อน หรือทำให้อ่อนลงจนสามารถทำการดัดงอ โดยการนำเนื้อโลหะออกได้รวมทั้งกำจัดความเค้นในเนื้อวัสดุ ลดขนาดเม็ดเกรน (grain) เพิ่มความเหนียวแน่น (Toughness) หรือแม้กระทั่งทำให้ผิวนอกแข็ง แต่เนื้อโลหะภายในมีความเหนียว ก็ตาม แต่ในสภาพอบอ่อน (annealing) เหล็กกล้าจะมีความเหนียวแต่ไม่แข็ง หากผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงพอ จะทำให้โครงสร้างของโลหะเปลี่ยนเป็นออสเตนไนท์ (austenite) และปล่อยให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว เหล็กกล้าจะมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นเพราะโครงสร้างจากออสเตนไนท์ที่อ่อนจะเปลี่ยนมาเป็นมาเทนไซต์ (martensite) ที่แข็ง อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงนี้มักจะไม่สมบูรณ์มากนัก เพราะยังมีออสเตนไนท์ที่เหลืออยู่ตั้งแต่ 2%-10% การ

แช่เย็นจะทำให้ข้อเสียดในท่ที่หลงเหลืออยู่ภายในจะเปลี่ยนสภาพมาเป็นมาเทนไฮไดรด์ ซึ่งเป็น
เหตุผลทำให้เหล็กกล้าที่ผ่านการชุบแข็งด้วยการแช่เย็น มีความทนต่อการสึกกร่อนมากขึ้น

4.5 สรุป

การแช่เย็นเป็นการเพิ่มการต้านทานการสึกกร่อนของชิ้นวัสดุนั้น โดยเฉพาะมุมของ
เครื่องตัดต่างๆ ทั้งนี้ทั้งนี้ตัวเนื้อวัสดุที่ใช้ทำชิ้นส่วนนั้นๆ ต้องมีคุณภาพเหมาะสมกับงานด้วย
ขบวนการแช่เย็นช่วยให้วัสดุมีคุณสมบัติดีขึ้น ทนการสึกกร่อนได้มากขึ้น และชิ้นงานที่แช่เย็นมี
อายุการใช้งานนานกว่าชิ้นงานที่ไม่แช่เย็นตั้งแต่ 2 ถึง 5 เท่า การแช่เย็นไม่เพิ่มความแข็ง
หรือความเปราะให้กับวัสดุ แต่จะทำให้วัสดุทนต่อการสึกกร่อนได้มากขึ้น ในการแช่เย็นนั้นสิ่งที่
ต้องระมัดระวังมากก็คือสภาพการชนกันของเม็ดเกรน (grain) ซึ่งจะทำให้เกิดรอยแตกร้าว
หรือรอยแหลมเกิดขึ้น ทำให้โลหะมีความแข็งแรงทนต่อการสึกกร่อนลดลง

บทที่ 5

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

5.1 บทนำ

การวัดแรงดันเบรคดาวน์ (U_b) ของฉนวนเหนวไฮโดรคาร์บอน ที่ใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าที่มีมาตรฐานในการวัดหลายมาตรฐานเช่น IEC Publ.156, ASTM D877-884a BS-148, JIS C 2320 และ IEEE STANDARD TECHNIQUE FOR HIGH VOLTAGE TESTING เป็นต้น มาตรฐานต่างๆมีวิธีการทดลอง และข้อกำหนดที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นอุปกรณ์และวิธีการทดลองจะมีผลต่อแรงดันเบรคดาวน์ในฉนวนเหนวเพื่อให้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีมาตรฐานที่แน่นอนสามารถใช้เปรียบเทียบกับข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้จึงเลือกมาตรฐาน IEC Publ.156 แต่เนื่องจากมาตรฐานนี้เป็นกาวัดค่าแรงดันเบรคดาวน์ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับ จึงต้องใช้ข้อจำกัดบางส่วนในการวัดค่าแรงดันเบรคดาวน์ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรง จากมาตรฐาน IEEE นอกจากนี้ระบบอิเล็กทรอนิกส์ในการทดลองต้องใช้อิเล็กทรอนิกส์ที่มีลักษณะรูปทรงเรขาคณิตแตกต่างกันออกไปจึงใช้มาตรฐาน ASTM ในการออกแบบระบบอิเล็กทรอนิกส์

5.2 อุปกรณ์การทดลอง

ในการทดลองทางวิศวกรรมแรงสูง ต้องคำนึงถึงความปลอดภัยของผู้ทดลอง การจัดวางตำแหน่งของอุปกรณ์ต้องเป็นไปอย่างเหมาะสมตามหลักวิชาการ เพื่อให้ผู้ทดลองสังเกตปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้ชัดเจน

อุปกรณ์ดังกล่าวแบ่งออกเป็น

- 1) ชุดแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและส่วนควบคุมสัญญาณ (A.C. voltage generator and Control unit)
- 2) ชุดแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและส่วนควบคุมแรงดัน (D.C. voltage generator and voltage control unit)
- 3) ชุดภาชนะทดสอบ (Test cell)
- 4) ชุดอุปกรณ์เครื่องมือวัด

1) แหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและส่วนควบคุมสัญญาณ

1.1 ส่วนกำเนิดแรงดัน ประกอบด้วย

หม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงขนาด 5 KVA 100 กิโลโวลท์ความถี่ 50 เฮิรตซ์ โดยป้อนไฟ 220 โวลท์ ที่ 50 เฮิรตซ์ ดังแสดงในรูปที่ 5.1

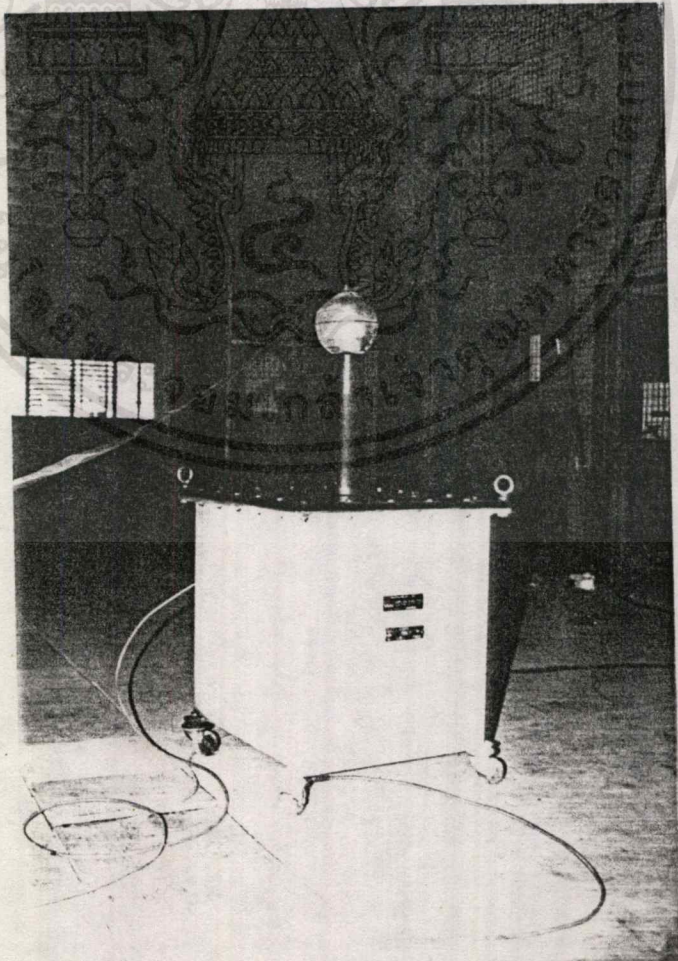
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ส่วนควบคุมสัญญาณ ประกอบด้วย

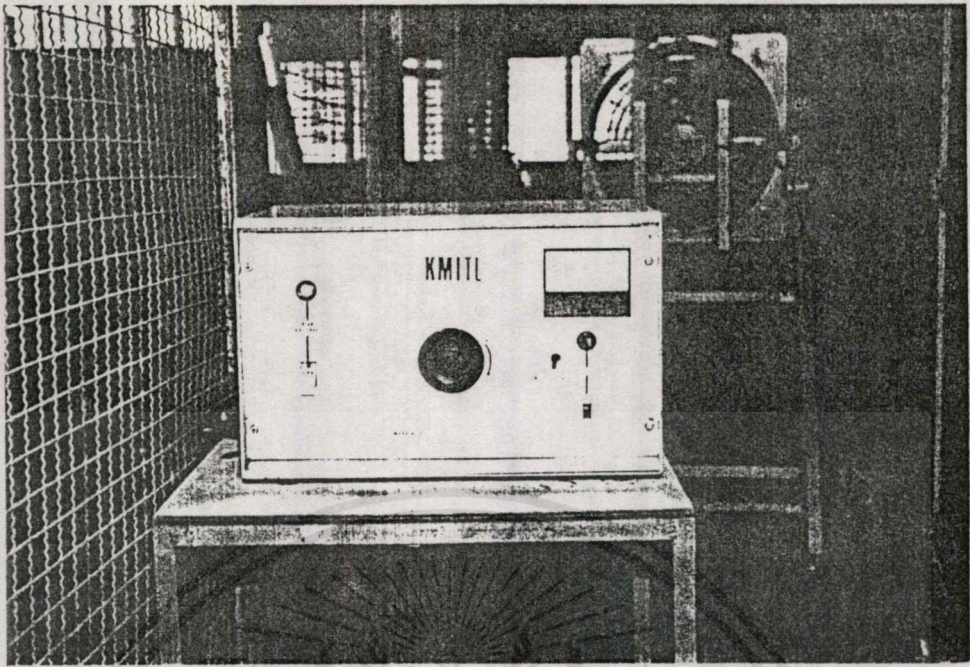
ตัวควบคุมการผลิตสัญญาณ , ตัวตัดวงจร และ เครื่องมือวัด ซึ่งสามารถปรับระดับแรงดันได้ตามต้องการ

รายละเอียดของตัวควบคุมของบริษัทฟอสเตอร์มีดังนี้

- 1) เซอร์คิตเบรกเกอร์ป้อนไฟ 220 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ ให้แก่ตัวควบคุมสัญญาณซึ่งประกอบด้วยหลอดไฟสีเหลืองแสดงการทำงาน
- 2) เซอร์คิตเบรกเกอร์ป้อนแรงดันไฟฟ้าแรงสูงประกอบด้วยหลอดไฟสีแดง แสดงการทำงาน
- 3) ส่วนของหม้อแปลงปรับระดับแรงดัน ป้อนให้กับหม้อแปลงไฟแรงสูง ก่อนใช้งานทุกครั้งต้องปรับแรงดันมาที่ศูนย์เสมอ
- 4) สเกลวัดแรงดันเอาท์พุท จะวัดแรงดันเปรียบเทียบกับทางด้านปฐมภูมิแทน ดังนั้นถึงแม้เซอร์คิตเบรกเกอร์แรงดันสูงจะตัดแล้วก็ยังสามารถอ่านแรงดันขณะนั้นได้ โดยสเกลจะเป็นสเกล log จึงควรระวังในการอ่านและมีอยู่ 2 ระดับต้องใช้ระดับต่ำสุดก่อนเสมอ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาที่ 5.1 หม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

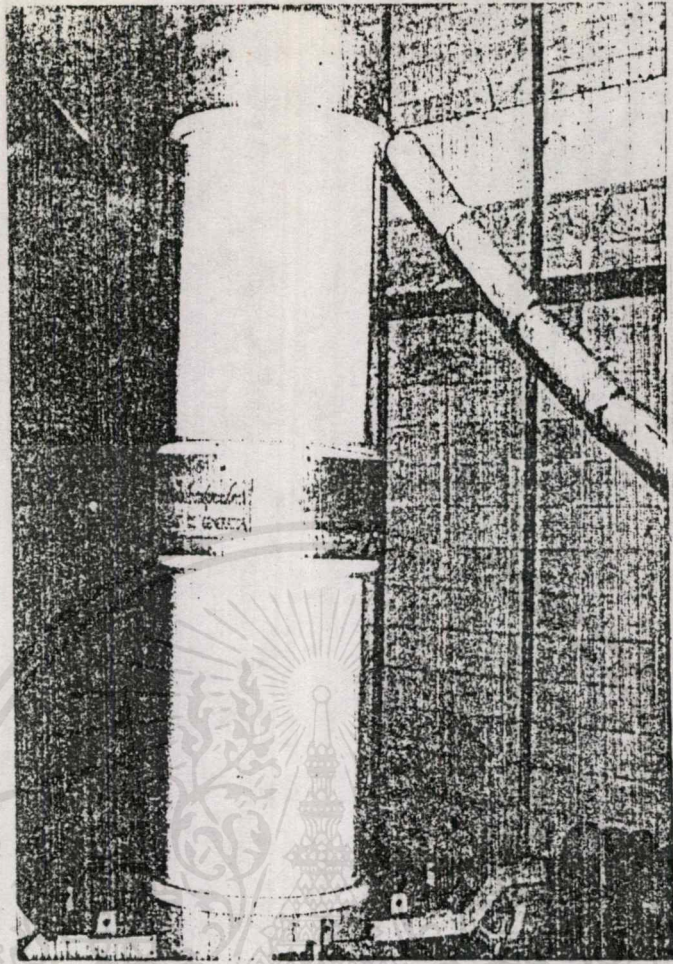


รูปที่ 5.2 ส่วนควบคุมสัญญาณ

2) แหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและส่วนควบคุมแรงดัน

2.1 ส่วนกำเนิดแรงดัน

มีขั้วต่อทางด้านอินพุต 1 เฟส , 50 เฮิรตซ์ , 220 โวลต์ , 12 KVA ทางด้านเอาต์พุตเป็น -600 กิโลโวลต์ , 10 มิลลิแอมป์ , 30 นาที โดยมีวงจรทำงานแบบโวลต์เตจแบบดับเบิล (Voltage double circuit) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในอาคาร ใช้น้ำมันเป็นฉนวนและเป็นตัวระบายความร้อน เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่กำเนิดออกมามีขั้วเป็นลบเมื่อเทียบกับดิน ดังนั้นสายส่งไฟฟ้าแรงสูงจากตัวกำเนิดแรงดันไฟฟ้าจึงต่อเข้ากับตัวคาโทด และขั้วแอโนดที่ถูกต้องลงดิน สายส่งไฟฟ้าแรงสูงถูกห่อหุ้มด้วยปลอกอลูมิเนียม เพื่อเพิ่มพื้นที่หน้าตัดช่วยลดความต่างศักย์ที่แนบผิวของสายส่ง ช่วยลดปรากฏการณ์โคโรนาในระบบ



รูปที่ 5.3 เครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 600 kV

2.2 หน่วยควบคุมแรงดัน

ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้า หน่วยควบคุมได้ถูกแยกออกจากแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งเป็นส่วนที่อันตรายอยู่คนละห้อง ทำให้เกิดความปลอดภัยแก่ผู้ทดลอง เป็นอุปกรณ์ควบคุมการทำงานที่ใช้ภายในอาคารโดยมีไฟเข้าและไฟออกเป็น 1 เฟส , 50 เฮิรท์ , 220 โวลต์ ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่างๆดังนี้

1) โวลท์มิเตอร์กระแสสลับ (AC Voltmeter) พิกัด 0-300 โวลต์ class

2.5 สำหรับดูไฟเข้าและจ่ายไปยังเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูง

2) แอมป์มิเตอร์กระแสสลับ (AC Ampmeter) พิกัด 0-50 แอมป์ class 1.5

สำหรับดูกระแสเข้าตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูง

3) แอมป์มิเตอร์กระแสตรง (DC Voltmeter) พิกัด 0-600 กิโลโวลต์ class

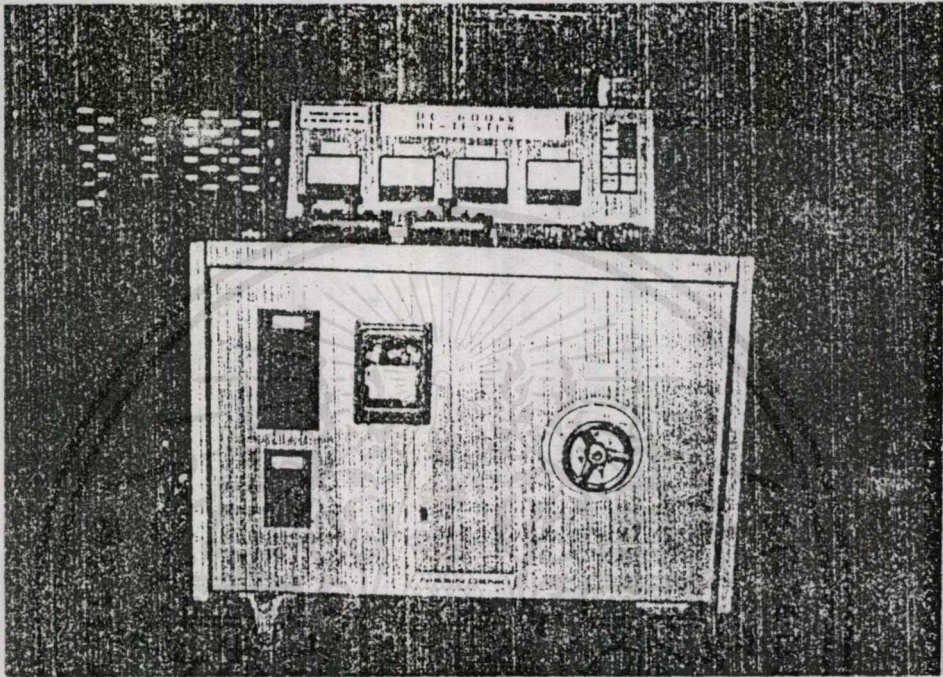
1.5 สำหรับดูแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่ออกมาจากตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูง

4) แอมป์มิเตอร์กระแสตรง (DC Ampmeter) พิกัด 0-10 มิลลิแอมป์ class

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 สำหรับชุดกระแสที่ไหลของตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

นอกจากนั้นแผงควบคุมยังประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่ซึ่งบ่งสภาวะที่กำลังใช้งาน เช่น อุปกรณ์ตัดต่อระบบไฟฟ้า และอุปกรณ์ป้องกันความปลอดภัยในการใช้งาน

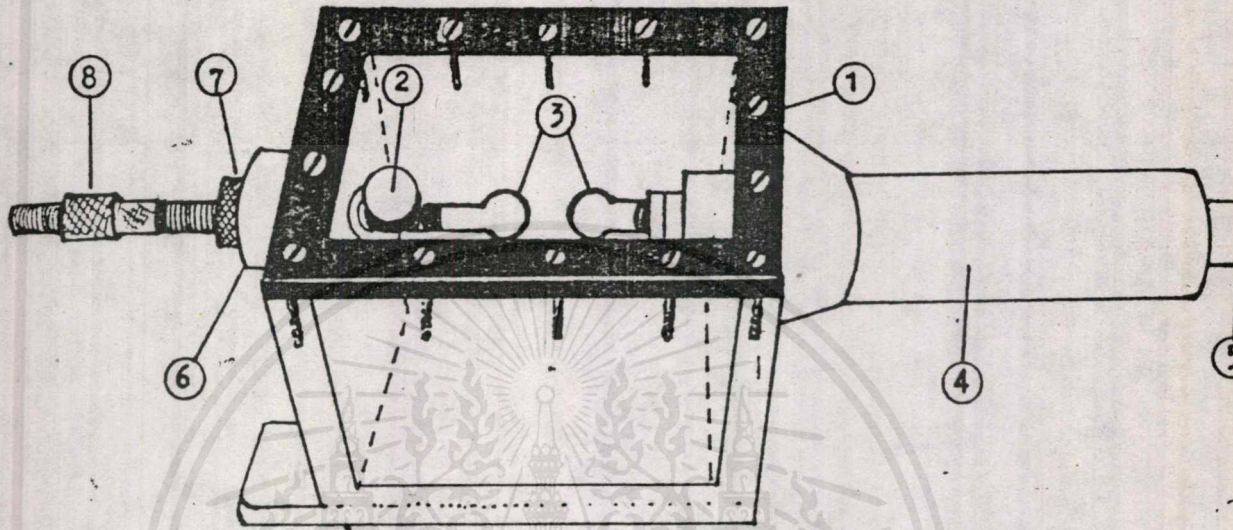


รูปที่ 5.4 ตู้ควบคุมเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

3) ชุดภาชนะทดสอบ

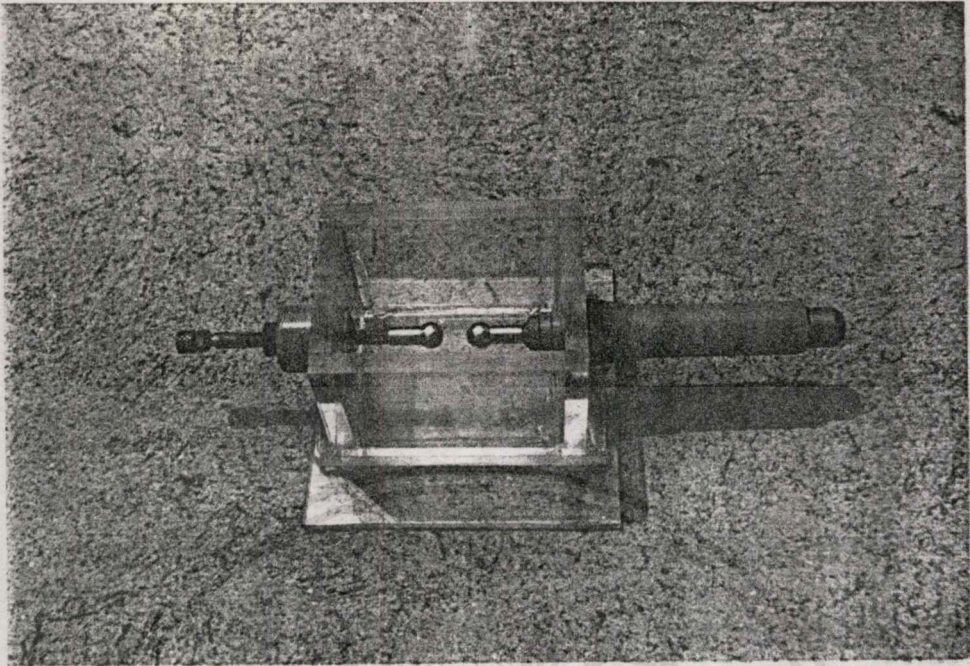
ในการเลือกวัสดุเพื่อทำการออกแบบตามข้อกำหนดในมาตรฐาน IEC Publ.156 เกี่ยวกับชุดภาชนะทดสอบ ผู้ออกแบบได้คำนึงถึงความเหมาะสม สะดวกและง่ายต่อการทำความสะอาด นอกจากนี้ต้องคำนึงถึงความประหยัด ในการทดลองนี้ตัวภาชนะประกอบจากอะคริลิก (acrylic) เป็นสารในจำพวกพลาสติก แข็งแรง ทนต่อแรงดันและอุณหภูมิได้สูง ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำมันทดสอบ ส่วนตัวอะคริลิกมีลักษณะโปร่งใสเหมือนแก้ว สามารถมองเห็นปรากฏการณ์ของการเบรคดาวนี้ได้ดี ภายในภาชนะประกอบด้วยแกนทองเหลืองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นหัวต่อสายส่งไฟฟ้าแรงสูงมีปลอกฉนวนหุ้ม (high voltage bushing) ทำจากโพลีเมอร์ประเภทพีวีซี ทำหน้าที่เพิ่มความต้านทานที่ผิว ป้องกันกระแสรั่วและลดผลของปรากฏการณ์โคโรน่า ส่วนที่สองเป็นส่วนที่ต่อลงดินจึงถึงเป็นเกลียวมีลักษณะคล้ายกับส่วนแรกแต่ปลอกฉนวนสั้นกว่าและแกนทองเหลืองสามารถเลื่อนเข้าและออกได้เพื่อการปรับระยะแกปได้ จาก

การทดสอบวัดค่าแรงดันเบรคดาวน์สามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้ 125 kV โดยไม่มีการแตกรั่ว ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ให้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ทดสอบไม่เกิน 110 kV

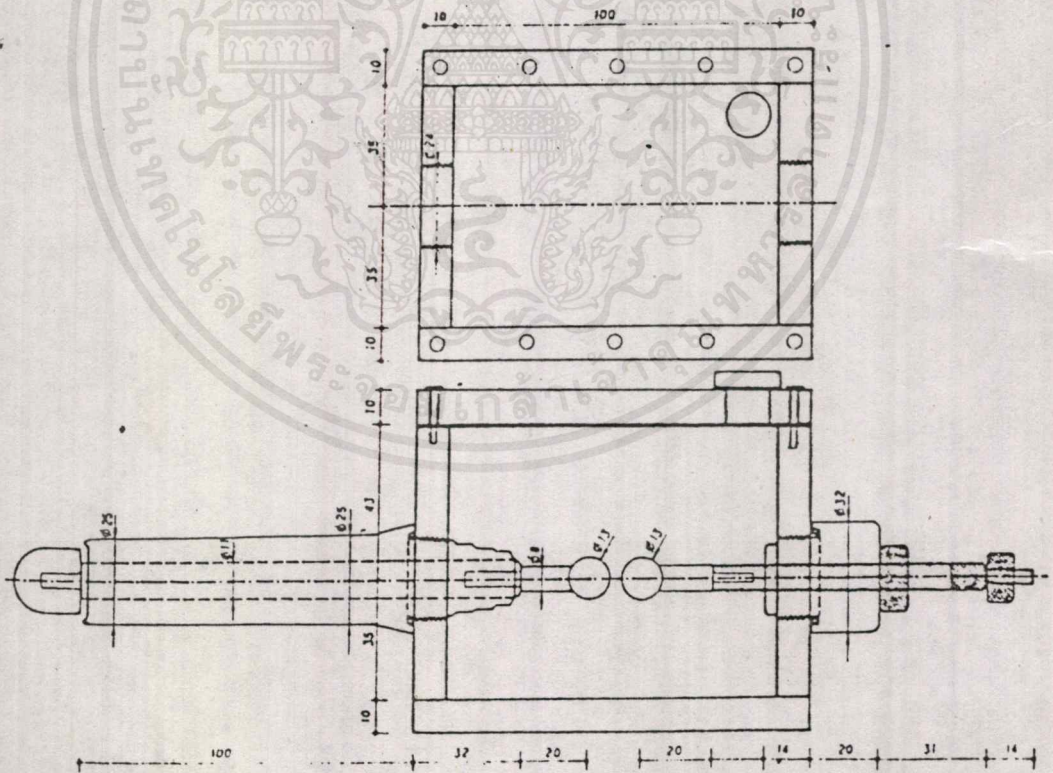


รูปที่ 5.5 ชุดภาชนะทดสอบ

1. ตัวภาชนะ
2. ช่องเติมน้ำมัน
3. อีเลคโตรดแบบทรงกลม-ทรงกลม
4. ปลอกฉนวนนำสายไฟแรงสูง
5. ปลายแรงสูง
6. ปลอกนำสายไฟด้านล่างดิน
7. น็อตล็อกแกนตัวนำ
8. ปลายด้ายด้านล่างดิน



รูปที่ 5.6 ชุดภาชนะที่ใช้ทดสอบ



รูปที่ 5.7 แผนผังแบบขนาดจริงของภาชนะชุดทดสอบสร้างตามข้อกำหนดมาตรฐาน IEC

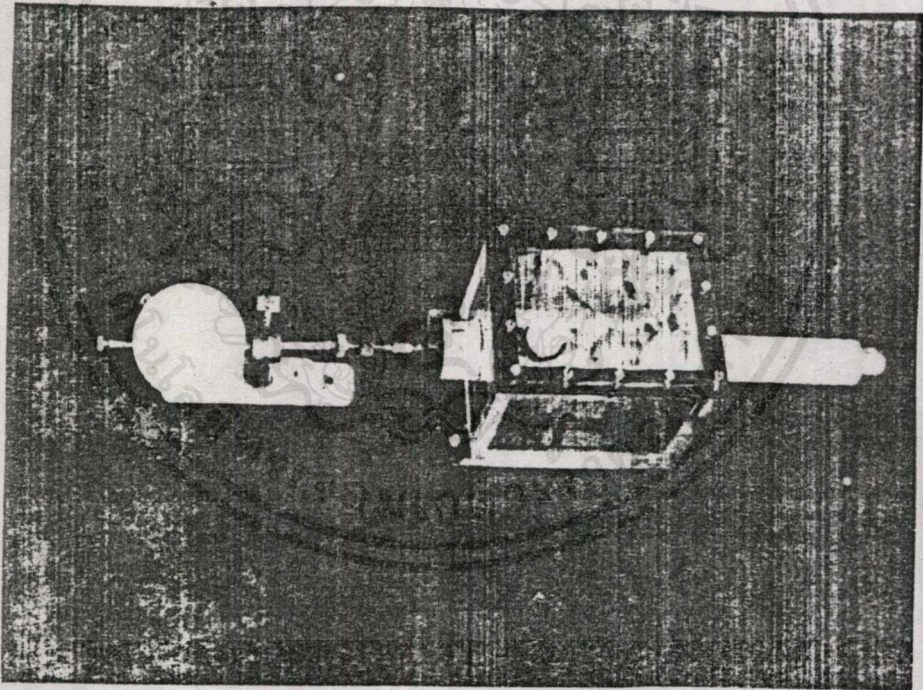
ขนาดบรรจุ 500 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

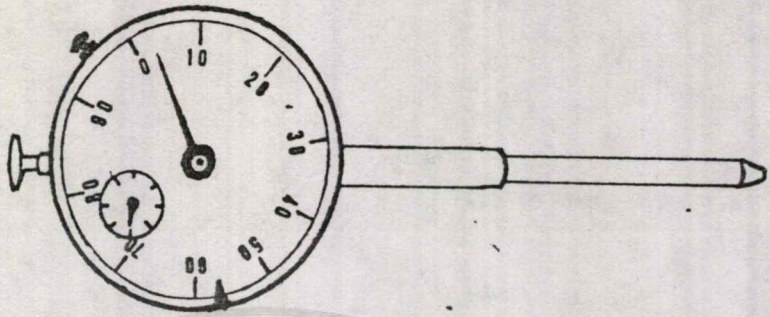
4) ชุดอุปกรณ์เครื่องมือวัด

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความละเอียดสูงมาก เครื่องมือวัดประกอบด้วย เครื่องมือวัดความดันบรรยากาศ (barometer) เครื่องมือวัดความชื้น (hygrometer) เครื่องมือวัดอุณหภูมิ (thermometer) และเครื่องมือวัดระยะแบบ (dialling micrometer)

เครื่องมือวัดระยะแบบ เป็นเครื่องมือวัดระยะได้ตั้งแต่ 0.01 - 30 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 5.9 โดยแกนเลื่อนของเครื่องมือ วัดถูกจัดวางให้สัมผัสโดยตรงกับปลายสุดด้านต่อลงกรรานของแกนตัวนำที่ยึดอิเล็กโตรดตลอดเวลา ไม่ว่าจะปรับแกนตัวนำเข้าหรือออกด้วยแรงกดจากสปริงในเครื่องมือวัด ดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 ภาพแสดงวิธีการวัดระยะแบบ



รูปที่ 5.9 เครื่องมือวัดระยะแบบ

การวัดระยะแบบ

สามารถวัดจากภายนอกภาชนะทดสอบด้วยเครื่องมือวัดระยะแบบ ซึ่งวัดได้ในช่วง 0.01 - 30 ม.ม. มีความแม่นยำประมาณ 0.01 ม.ม. ในการวัดกระทำได้โดยการทำให้ผิวของอิเล็กโตรดทั้งสองติดกันจากนั้นนักหมุนแกนอิเล็กโตรดด้านต่อลงดินไปตามระยะที่ต้องการ อุปกรณ์ในกระบวนการแก้ไข

1. อิเล็กโตรดที่ต้องการแก้ไข

- เหล็กสแตนเลส 2 อัน

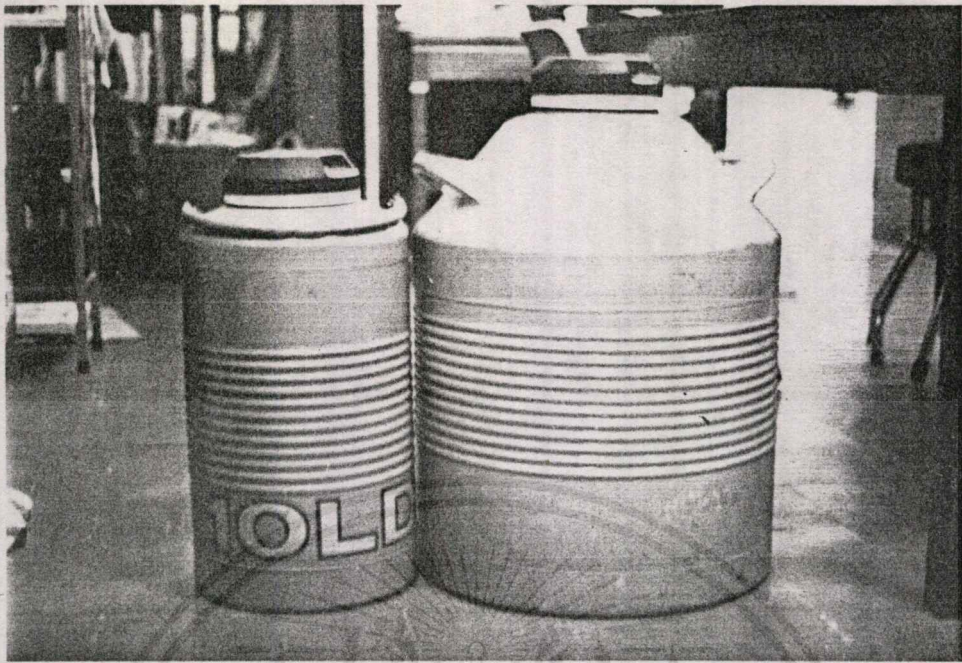
- ทองแดง 2 อัน

- ทองเหลือง 2 อัน

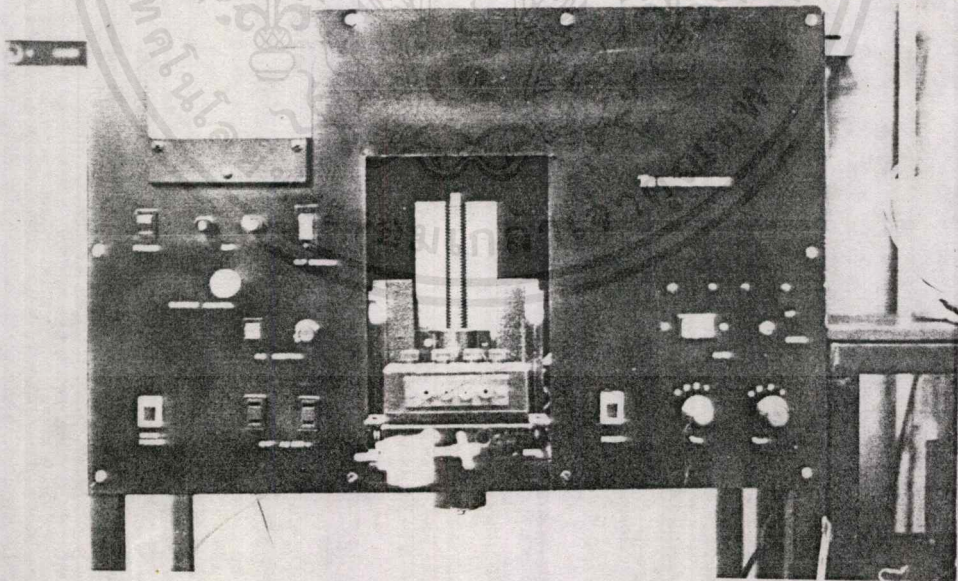
2. ถังแก้ไข

3. เครื่องหย่อนอิเล็กโตรด

4. ตู้อบ

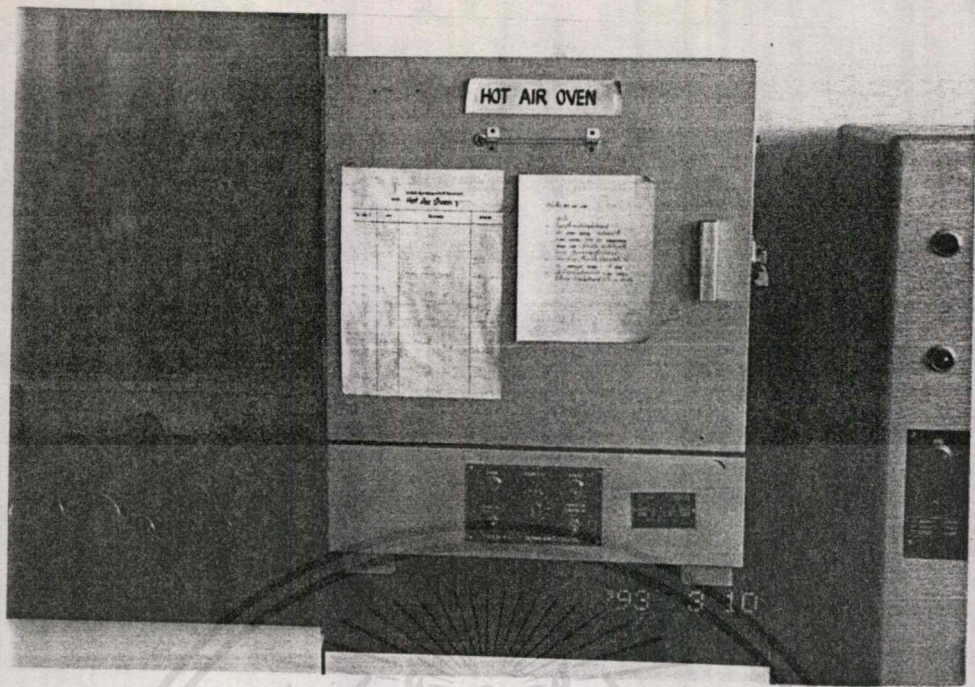


รูปที่ 5.10 ถังบรรจุไนโตรเจนเหลวรุ่น 10LD ขนาด 10 ลิตร และรุ่น 35LD ขนาด 35 ลิตร



รูปที่ 5.11 เครื่องห่อนอิเล็กโตรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 ตู้อบ(Hot air oven)

วิธีปฏิบัติการกระบวนการแช่เย็นและอบด้วยความดันอุณหภูมิสูง

1. มัดอิเล็กทรอนิกส์เข้ากับแกนหย่อน นำไปยึดกับมือจับของเครื่องหย่อน แล้วหย่อนแกนหย่อนลงไปจนถึงแช่เย็น
2. เทไนโตรเจนเหลวลงในถังแช่เย็นโดยผ่านท่อ เพื่อไม่ให้ไนโตรเจนเหลวสัมผัสอิเล็กทรอนิกส์
3. เปิดเครื่องโดยให้ตั้งความเร็วของเครื่องช้าที่สุด เพื่อปรับอุณหภูมิอย่างช้าๆให้กับอิเล็กทรอนิกส์ในช่วงนี้ใช้เวลารวมทั้งหมด 8 ชั่วโมง
4. ใช้ไม้วัดระดับไนโตรเจนเหลว เมื่อปริมาณไนโตรเจนเหลวลดลง 4-5 เซนติเมตร จะต้องเทไนโตรเจนเหลวเพิ่มลงไป ให้ได้ระดับที่กำหนด
5. เมื่ออิเล็กทรอนิกส์เคลื่อนที่ลงไปจุ่มถึงระดับของเหลวแล้ว เทไนโตรเจนเหลวลงไปให้มีระดับความสูง 3 ใน 4 ของถัง
6. แช่อิเล็กทรอนิกส์ในสภาวะนี้ต่อไปนาน 20 ชั่วโมง ในระหว่างนี้จะต้องคอยเช็คระดับของไนโตรเจนเหลวด้วย และคอยเติมให้ได้ระดับทุก 3-4 ชั่วโมง
7. เมื่อครบ 20 ชั่วโมง จะปรับระดับของอิเล็กทรอนิกส์ให้ขึ้นมาอยู่ที่ความสูง 3 ใน 4 ของถัง แต่ต้องอยู่ใต้ระดับของไนโตรเจนเหลว ปล่อยให้ไนโตรเจนเหลวระเหยไปจนหมด เพื่อปรับระดับอุณหภูมิขึ้นอย่างช้าๆ(ช่วงนี้ใช้เวลาประมาณ 30 ชั่วโมง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. เมื่ออุณหภูมิปรับเข้าสู่ปกติ นำอิลเลคโตรดไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 150 องศา เซ็นเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (โดยวางอิลเลคโตรดบน plate แก้ว)

การตรวจหารอยร้าว

ในการตรวจสอบรอยร้าวของวัสดุ อุปกรณ์หรือโครงสร้างต่างๆที่มีอยู่หรือไม่นั้น การทำให้แตกหักแล้วพินิจดูด้วยตาเป็นวิธีการตรวจสอบที่ถูกต้องแน่นอนที่สุดยิ่งไปกว่านั้น การวัดระดับความแข็งแรงของวัสดุอุปกรณ์ และโครงสร้าง โดยใช้การทดสอบทางกล ซึ่งในการตรวจสอบรอยร้าวนี้ใช้การทดสอบโดยไม่ทำลาย (Non Destructive Testing: NDT) การตรวจหารอยร้าวของผิวอิลเลคโตรดในโครงงานนี้ใช้การทดสอบดังนี้

1. การทดสอบโดยการตรวจพินิจ (Visual Testing)

ตามทฤษฎีแล้วจะใช้สายตาดู ในกรณีที่จำเป็นจะใช้แว่นขยาย, ไม้บรรทัดเว้า (Convex ruler) เพื่อวัดขนาดของรอยแตก รอยเหลื่อม (Overlapped) หลุมบ่อต่างๆบน ผิวโลหะ

2. การทดสอบโดยใช้การซึมของของเหลว (Liquid Penetrant Testing)

การเก็บข้อมูลจากการทดสอบอิลเลคโตรดทั้ง 2 กระบวนการผลิต

ในการทดสอบกระบวนการผลิตทั้ง 2 แบบ จะต้องทำการทดสอบด้วยระยะแยก ต่างๆ กันเพื่อให้ได้ค่าที่เป็นมาตรฐานมากขึ้น โดยระยะแยก ที่ทำนั้นมีขนาดดังนี้

- สำหรับฉนวนเหลว ใช้ระยะ แยก ขนาด 1.0-3.0 มิลลิเมตร

- สำหรับฉนวนอากาศ ใช้ระยะ แยก ขนาด 0.5-1.0 เซนติเมตร

กระแสไฟที่ป้อนให้แก่วงจร คือ แรงดันอิมพัลส์, แรงดันไฟกระแสสลับ และแรงดันไฟกระแสตรงแต่เนื่องจากแรงดันไฟอิมพัลส์ นั้นมีแรงดันไฟฟ้าที่สูงมาก อาจทำให้เกิดความเสียหายต่ออิลเลคโตรดได้เช่น อาจเกิดการแตกร้าว เนื่องจากอิลเลคโตรดมีขนาดเล็กเกินไป

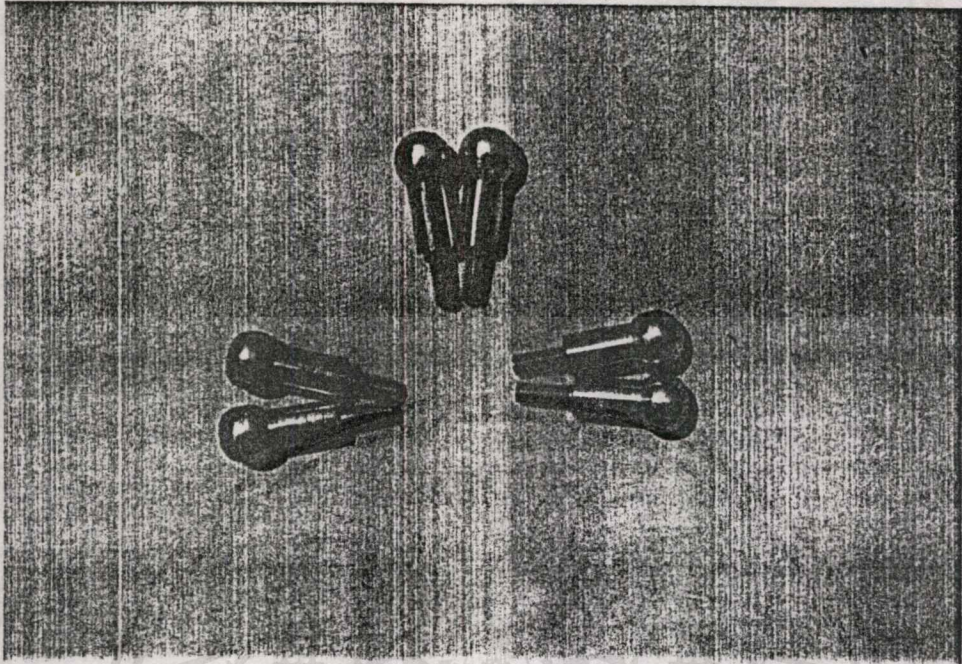
การทดสอบโครงงานนี้จะเป็นการทดสอบการเบรคดาวน์ในสัรณวน 2 ชนิด คือการเบรคดาวน์ในฉนวนเหลว (ใช้น้ำมัน Caltex Transformer Oil) และการเบรคดาวน์ในอากาศ (ใช้ฉนวนอากาศ ภายใต้อุณหภูมิ 27-32 องศา เซ็นเซียส ความดัน 760 มิลลิเมตรปรอท ความชื้นสัมพัทธ์ 70-75 เปอร์เซ็นต์)

5.3 ระบบอิลเลคโตรด

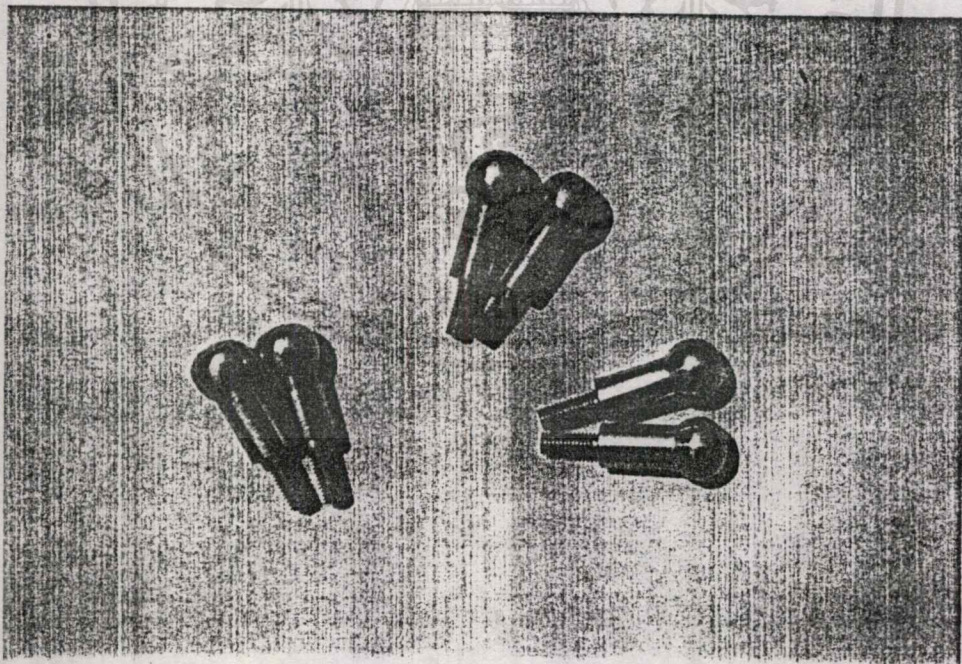
อิลเลคโตรดที่ใช้ในการทดลองนี้ประกอบไปด้วยอิลเลคโตรดที่มีรูปทรงกลม (sphere) ตามมาตรฐาน IEC Publ. 156[1] กำหนดอิลเลคโตรดทั้งสองอันมีลักษณะทรงกลมผิวเรียบทำด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหล็กสแตนเลส ทองแดง ทองเหลือง มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 13 มม.



รูปที่ 5.13 อิเล็กโตรดไม่ผ่านกรรมวิธีการชุบ



รูปที่ 5.14 อิเล็กโตรดผ่านกรรมวิธีการชุบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 การเตรียมชุดภาชนะทดสอบ

เมื่อเราสร้างชุดภาชนะทดสอบแล้วควรตรวจสอบรอยรั่วซึม ซึ่งต้องระวังมากเนื่องจากในขณะที่เบรคดาวนั้นจะมีความเครียดเนื่องจากสนามไฟฟ้า และความดันภายในภาชนะจะสูง น้ำมันอาจจะไหลซึมออกมาได้ ข้อสำคัญในการเตรียมชุดภาชนะทดสอบ ได้แก่ การระมัดระวังเกี่ยวกับความชื้นและสิ่งแปลกปลอมอื่นๆ เมื่อไม่มีการใช้ชุดทดลองก็ควรบรรจุน้ำมันที่ไม่มี ความชื้นให้เต็ม และเก็บไว้ในที่สะอาดปราศจากฝุ่นละออง เพื่อป้องกันสารไม่บริสุทธิ์จับตามผิวของ ภาชนะทดสอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ผิวของอิเล็กโตรด

5.5 การเตรียมน้ำมันหม้อแปลง

ก่อนการบรรจุน้ำมันหม้อแปลงในภาชนะ ควรทำให้น้ำมันหมุนเวียนเพื่อทำให้สิ่งเจือปน ที่มีอยู่ในน้ำมันกระจายทั่วไปอย่างสม่ำเสมอ โดยระมัดระวังไม่ให้เกิดฟองก๊าซขึ้นทันทีที่ทำการ บรรจุน้ำมันลงในภาชนะโดยผ่านทางหลอดแก้วหรือสายยางที่สะอาดจริงๆ เพื่อป้องกันการเกิด ฟองก๊าซ อุณหภูมิของน้ำมันในภาชนะทดสอบควรมีค่าเท่ากับอุณหภูมิแวดล้อม

5.6 การวัดแรงดันเบรคดาวของฉนวนเหลว

เมื่อเตรียมขั้นตอนข้างต้นเรียบร้อยแล้ว ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเข้ากับขั้วอิเล็กโตรดทางด้านไฟฟ้าแรงสูง โดยปรับแรงดันไฟฟ้าด้วยอัตราเร็ว 2 กิโลโวลต์ต่อวินาที จากนั้น สังเกตเข็มของมิลลิแอมป์มิเตอร์จะไหลอย่างรวดเร็วและเข็มของโวลต์มิเตอร์จะตกลง ในขณะที่ เกิดการสปาร์คครั้งแรกข้ามช่องว่าง ซึ่งเราถือว่า แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการสปาร์คครั้งแรกว่า แรงดันเบรคดาวของฉนวนเหลว ทำการวัดแรงดันเบรคดาว 30 ครั้งในแต่ละจุด สำหรับเทคนิคในการทดลอง ควรป้อนแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรด เพื่อให้ น้ำมันปรับตัว ประมาณ 5 นาที ณ ระดับแรงดัน 1 กิโลโวลต์ เพื่อกำจัดฟองอากาศก่อนการทดลอง

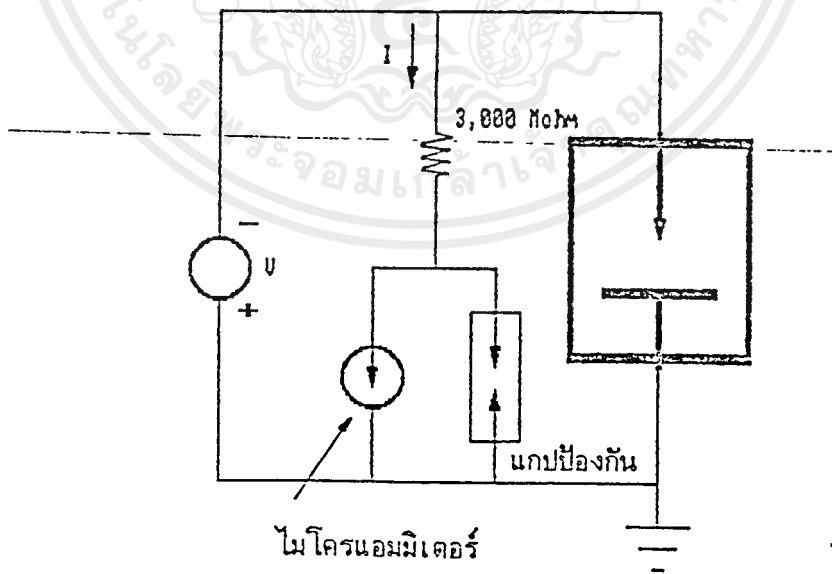
5.7 ผลของอุปกรณ์ตัดตอนวงจรไฟฟ้า

เมื่อต่อชุดภาชนะทดสอบเข้ากับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยการป้อนแรงดัน โดยให้ มีค่าเพิ่มขึ้นจากศูนย์ด้วยความเร็ว 2 กิโลโวลต์ต่อวินาที สังเกตปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในชุด ภาชนะทดสอบ จนกระทั่งมีการสปาร์คข้ามแกป เราเรียกโวลต์เตจที่ทำให้เกิดการสปาร์คข้าม แกปครั้งแรกว่า แรงดันเบรคดาว จากนั้นให้ปรับโวลต์เตจมาที่ศูนย์เหมือนเดิม ในขณะที่ เกิด เบรคดาวครั้งแรก ผู้ทดลองจะต้องอ่านค่าโวลต์เตจที่เกิดขึ้น การวัดค่าแรงดันเบรคดาวนี้ มีค่าแน่นอน อาจจะมีเข็มของไมโครแอมป์มิเตอร์จะเบี่ยงเบนไปขณะเกิดสปาร์ค ในขณะที่ เกิดการสปาร์ค ถ้าไม่ปรับโวลต์เตจลงมาที่ศูนย์ จะเกิดอช่วงเวลาสั้นข้ามแกปทำให้กระแสไหล

ผ่านแวนเหลวมมาก อุปกรณ์ตัดตอนจะทำกรตัดตอนวงจรไฟฟ้าออก จากนั้นอุปกรณ์ลูกเงินจะมีเสียงสัญญาณไซเรนเตือน

5.8 การวัดแรงดันสูง

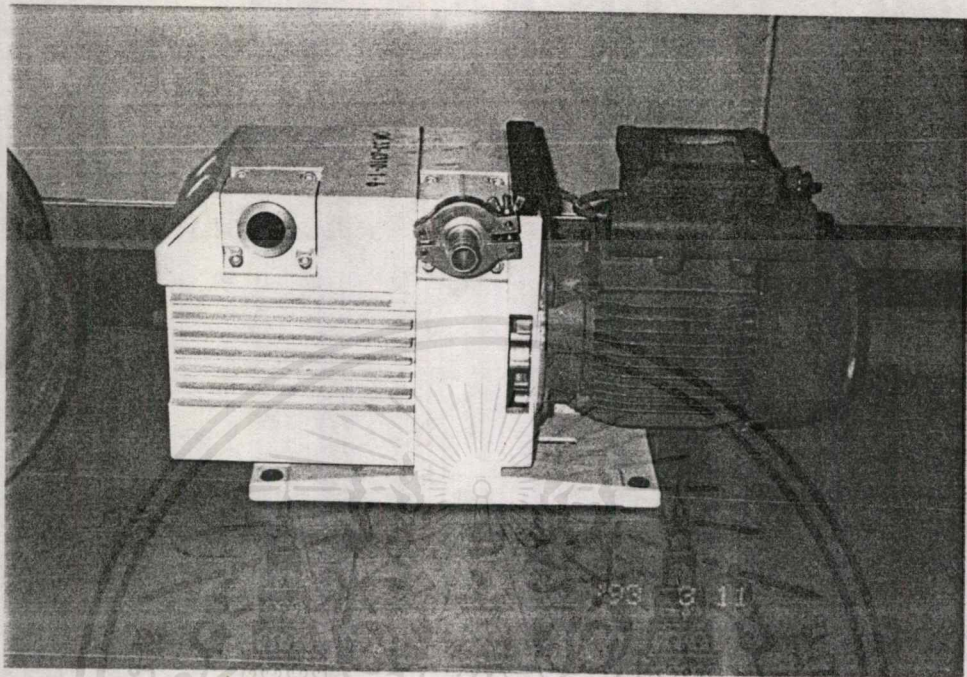
ในการวัดแรงดันสูง หรือแรงดันตกคร่อมวัสดุทดสอบ สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงใช้วิธีวัดแบบอนุกรมระหว่างความต้านทานที่มีค่าสูงๆ ระดับ 3,000 เมกกะโอมห์ จากคู่มือของชุดการทดลองระบุว่าความต้านทานมีค่าความผิดพลาดประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ นำมาอนุกรมกับไมโครแอมป์มิเตอร์ ดังรูปที่ 5.7 โดยมี I กระแสที่ไหลผ่านความต้านทาน R จะถูกวัดโดยคอยล์ (moving coil) ที่อยู่ในไมโครแอมป์มิเตอร์ สามารถหาค่าของโวลต์เตจจาก $V=IR$ สำหรับโวลต์เตจที่เกิดขึ้นเนื่องจากความต้านทานภายในตัวไมโครแอมป์มิเตอร์มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความต้านทานจึงไม่นำส่วนนั้นมาคิด และอุปกรณ์ป้องกันในกรณีเกิดแรงดันเกิน (over voltage) จะใช้ซีเนอร์ไดโอด การวัดแรงดันสูงด้วยวิธีนี้ จะให้ความละเอียดประมาณ 0.2 เปอร์เซ็นต์ ที่ระดับแรงดัน 500 กิโลโวลต์



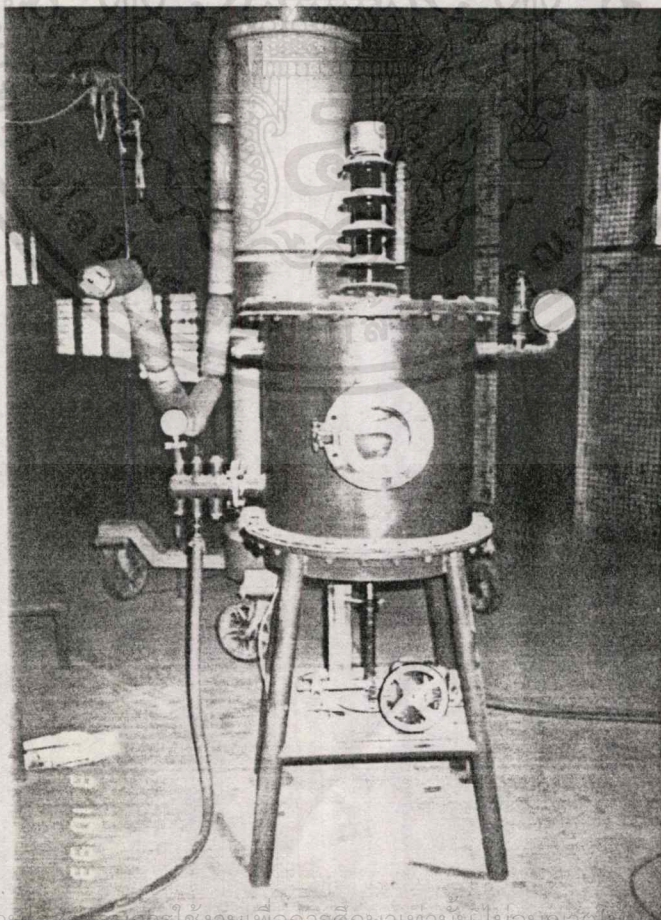
5.9 การควบคุมความดัน

ในการเปลี่ยนแปลงความดันนั้นใช้กฎของพาสคาลสำหรับอากาศมาใช้ โดยทำการเปลี่ยนค่าของทั้งระะษะห่างของอิเล็กโตรด และความดัน ซึ่งในการควบคุมความดันนั้นใช้ปั๊มโรตารี (Rotary pump model D16B (Leybold)) ทำการสูบล้ออากาศออกจากภาชนะทดสอบ ก่อนที่จะทำการทดสอบแรงดันเบรคความดันของอิเล็กโตรดที่กำหนดไว้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะต้องทำการทดสอบหาค่าแรงดันเบรคความดันของภาชนะทดสอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงก่อน เพื่อนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าอิเล็กโตรดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้จะเกิดการเบรคความดันก่อนที่อิเล็กโตรดในภาชนะทดสอบจะเกิดการเบรคความดัน ขบวนการควบคุมความดันมีวิธีการทำดังต่อไปนี้

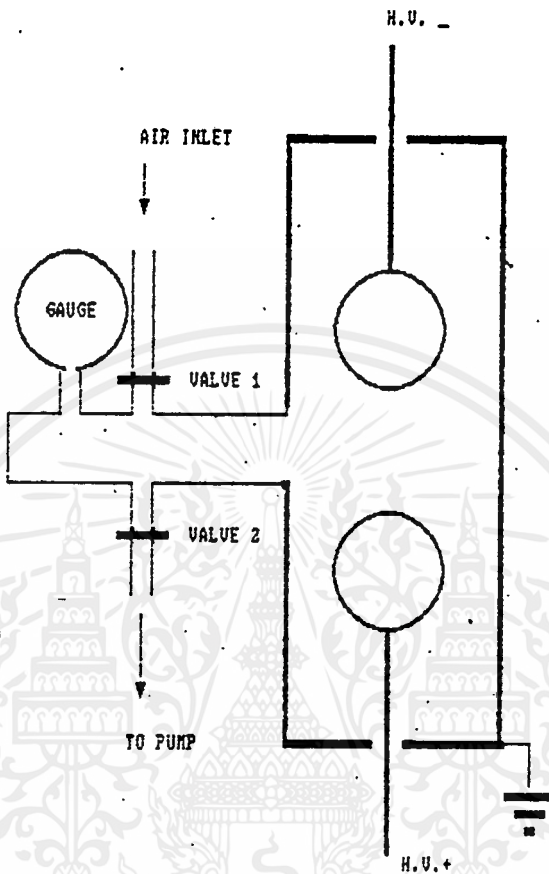
1. นำอิเล็กโตรดที่เป็นเหล็กสแตนเลสติดตั้งในภาชนะทดสอบที่สร้างไว้
2. ตั้งระยะแกปไว้ที่ 0.5 เซนติเมตร
3. ทำการปั๊มอากาศออกจากภาชนะทดสอบ โดยใช้โรตารีปั๊มประมาณ 20 นาที ซึ่งความดันจะลดลงเหลือประมาณ 200 มิลลิบาร์ เนื่องจากภาชนะทดสอบมีรอยรั่ว ดังนั้นจึงไม่เปิดวาล์วสองมาหนัก การเปิดวาล์วสองเพียงเล็กน้อยเพื่อให้ปั๊มสูบล้ออากาศในภาชนะทดสอบที่เกิดจากรอยรั่วนั้น ดังนั้นเราสามารถคงระดับความดันไว้ที่ 200 มิลลิบาร์ ได้
4. ทำการดีสชาร์จเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง แล้วหาแรงดันเบรคความดันโดยค่อยๆเพิ่มแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจนเกิดสปาร์กระหว่างอิเล็กโตรด
5. เปลี่ยนระดับความดันให้เป็น 300, 400 และ 500 มิลลิบาร์ แล้วทำการทดสอบ เหมือนกับข้อ 4
6. ทำการเปลี่ยนระยะแกปเป็น 0.75 และ 1.0 เซนติเมตร แล้วทำการทดสอบดังข้อ 3, 4 และ 5 ตามลำดับ
7. เมื่อทำการทดสอบในแต่ละความดัน และในแต่ละระยะแกปเรียบร้อยแล้ว ให้ทำการเปลี่ยนอิเล็กโตรดเป็น เหล็กสแตนเลสผ่านขบวนการแช่เย็น ทองแดง, ทองแดงผ่านขบวนการแช่เย็น, ทองเหลือง และทองเหลืองผ่านขบวนการแช่เย็น ตามลำดับ แล้วทำการทดสอบตามข้อ 2, 3, 4, 5 และ 6



รูปที่ 5.16 ปั๊มโรตารี (Rotary pump model D 16 B)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 5.17 ภาชนะทดสอบไฮดรอลิกแรงดันสูง
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.18 วงจรการทดลอง

5.10 สรุป

การทดลองวัดแรงดันเบรคควานต้องคำนึงถึงความสะอาด ปราศจากฝุ่นละออง และสิ่งที่สำคัญมากคือการปรับอัตราแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นคงที่ตลอด ส่วนอุปกรณ์การทดลองและวิธีการทดลองพยายามให้มีข้อผิดพลาดน้อยที่สุดประมาณ 3.45% และเพื่อให้การทดลองตรวจสอบแรงดันไฟฟ้ามีมาตรฐานมากขึ้น จึงพยายามทำการทดลองในแต่ละครั้งที่ภาวะสภาพแวดล้อมใกล้เคียงกันหรือเหมือนกันคือ ทำการทดลองในสภาวะที่มีอุณหภูมิ ความชื้น และความดันบรรยากาศเดียวกัน

บทที่ 6

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

เมื่อทำการผลิตอิเลคโตรดเรียบร้อยแล้ว แบ่งอิเลคโตรดออกเป็น 2 ชุด โดยแต่ละชุดจะมีอิเลคโตรดที่เป็นเหล็กสแตนเลส 2 อัน โลหะทองแดง 2 อัน โลหะทองเหลือง 2 อัน ชุดแรกเก็บไว้รอการทดสอบ ซึ่งชุดนี้ใช้เป็นตัวเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้า ส่วนอีกชุดหนึ่งนำไปผ่านขบวนการแช่เย็น คือผ่านการแช่ในสารไนโตรเจนเหลว การอบคลายเครียด และการตรวจหารอยร้าว หลังจากนั้นนำโลหะทั้งสามชนิดในแต่ละชุดมาทำการทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในฉนวนอากาศและในฉนวนน้ำมัน หลังจากนั้นทำการทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอีกครั้งหนึ่ง แต่ในการทดสอบครั้งหลังนี้จะทำการเปลี่ยนแปลงค่าความดันในภาชนะทดสอบ

จากผลการทดลองที่ได้ทั้งหมดที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น นำมาทำการพล็อตกราฟ เปรียบเทียบค่าแรงดันเบรคดาวน์ที่วัดได้จากอิเลคโตรดของขบวนการเดิม กับอิเลคโตรดที่ผ่านขบวนการแช่เย็น ข้อมูลและกราฟที่ได้เป็นดังนี้

ตารางที่ 6.1 แสดงผลการทดสอบเหล็กสแตนเลสโดยใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับในฉนวนอากาศ

ลำดับ ที่	ระยะแกปของโลหะเหล็กสแตนเลส					
	ขนาดการเดิม			ผ่านขนาดการแก้ไข		
	0.5 ซม.	0.75 ซม.	1.0 ซม.	0.5 ซม.	0.75 ซม.	1.0 ซม.
1	28.0	40.5	45.2	29.2	39.5	29.2
2	27.5	39.0	45.5	29.0	39.5	47.8
3	26.0	40.0	46.2	29.0	39.5	48.0
4	27.0	39.5	45.0	29.3	40.2	50.0
5	26.0	39.5	46.0	29.1	40.5	48.5
6	27.5	39.0	46.2	29.1	40.2	49.8
7	28.0	40.0	45.8	30.0	38.8	48.0
8	28.0	39.5	45.8	29.5	40.2	48.2
9	28.5	39.0	45.0	30.5	39.5	49.0
10	28.0	39.0	46.9	31.6	39.5	51.0
11	28.0	39.5	45.9	32.0	40.0	50.2
12	28.5	40.5	45.2	31.2	39.0	49.0
13	28.5	39.5	45.2	29.5	40.0	49.0
14	28.0	39.0	45.2	30.6	40.0	47.0
15	28.5	39.5	45.5	32.0	39.5	48.0
16	28.4	39.5	45.2	29.6	40.5	48.5
17	28.5	39.5	45.5	31.1	40.0	51.2
18	28.7	39.6	46.0	30.5	40.0	51.5
19	28.7	39.5	45.8	30.5	40.0	48.2
20	28.4	39.6	45.5	33.0	40.0	49.4
21	28.5	39.7	45.5	31.0	40.0	48.2
22	28.4	39.0	45.2	30.2	40.5	47.4
23	28.0	40.0	46.2	31.2	40.5	47.5
24	28.4	40.0	47.0	31.2	40.5	48.5
25	29.0	39.0	47.2	31.2	40.5	47.5
26	28.5	39.5	47.5	29.9	40.2	48.2
27	27.9	39.5	46.8	29.6	41.0	48.2
28	28.7	39.0	45.8	31.2	41.0	48.5
29	28.7	39.0	46.2	32.0	40.0	48.5
30	28.7	39.0	45.5	30.9	40.5	48.5
รวม	843.5	1184.4	1375.5	914.7	1202.1	1461.1
เฉลี่ย	28.12	39.48	45.85	30.49	40.07	48.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม ผู้รับข้อมูลนี้ให้แจ้งแหล่งข้อมูลต้นตอของข้อมูลจริงแก่เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.2 แสดงผลการทดสอบโลหะทองแดงโดยใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับในแนวนอนอากาศ

ลำดับ ที่	ระยะแกปของโลหะทองแดง					
	ชบวนการเดิม			ผ่านกระบวนการแช่เย็น		
	0.5 ซม.	0.75 ซม.	1.0 ซม.	0.5 ซม.	0.75 ซม.	1.0 ซม.
1	27.6	35.0	46.5	28.1	40.0	47.5
2	27.8	38.0	46.5	28.8	40.0	49.0
3	26.6	39.0	45.5	28.0	39.5	48.0
4	26.7	39.5	47.0	28.0	39.5	47.5
5	26.6	39.5	46.0	28.8	39.5	47.3
6	26.6	38.8	46.0	27.8	40.0	47.5
7	27.8	39.0	45.8	28.2	40.0	47.5
8	26.8	39.5	46.8	29.0	40.0	47.5
9	29.0	39.4	45.5	29.0	39.5	47.0
10	26.9	39.0	46.5	29.2	39.0	46.7
11	28.5	39.0	46.5	28.0	39.5	46.5
12	27.0	39.0	47.0	28.0	39.0	47.5
13	26.6	39.4	47.0	29.2	39.5	48.0
14	27.6	39.4	46.0	27.5	39.7	47.5
15	28.0	39.4	47.0	27.0	39.0	48.0
16	27.8	39.2	46.0	29.6	39.8	48.0
17	28.0	39.4	45.5	29.0	40.0	48.0
18	27.5	39.4	46.9	29.0	38.9	47.3
19	27.8	39.0	45.8	28.0	40.0	47.0
20	27.8	39.4	45.0	29.5	40.0	47.7
21	27.8	39.0	45.8	28.5	40.0	48.0
22	27.8	39.5	45.2	29.2	39.5	47.8
23	27.9	38.8	46.5	29.2	39.5	47.5
24	28.2	39.0	44.5	28.6	39.5	46.3
25	27.9	39.2	45.5	28.6	39.5	47.5
26	27.0	38.5	45.0	28.2	39.0	49.0
27	28.0	39.0	46.8	29.5	40.0	48.0
28	28.5	39.0	46.0	28.0	41.0	47.3
29	27.9	38.5	46.5	28.2	41.0	46.5
30	28.5	38.8	45.0	29.0	40.0	47.5
รวม	828.5	1168.6	1381.6	856.7	1191.4	1426.4
เฉลี่ย	27.62	38.95	46.05	28.56	39.71	47.55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 8.3 แสดงผลการทดสอบโตะทองเหลืองโดยให้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับในจำนวนอากาศ

ลำดับ ที่	ระยะแกปของโตะทองเหลือง					
	ขบวนการเดิม			ผ่านขบวนการแก้ไข		
	0.5 ซม.	0.75 ซม.	1.0 ซม.	0.5 ซม.	0.75 ซม.	1.0 ซม.
1	25.0	41.0	45.5	27.3	39.5	48.6
2	26.6	40.8	45.2	27.9	40.5	48.5
3	26.6	40.0	44.2	28.2	40.5	47.8
4	28.0	40.5	44.0	29.1	41.5	47.6
5	27.2	39.8	45.3	28.2	41.6	48.2
6	28.2	39.8	45.4	29.1	40.5	48.2
7	28.0	41.5	45.8	28.2	42.5	48.4
8	28.2	40.8	45.5	28.8	42.0	48.0
9	28.2	39.8	44.6	28.2	42.2	47.4
10	28.2	40.8	45.6	28.2	40.6	48.4
11	28.2	39.8	45.4	28.2	41.5	49.0
12	29.2	41.5	46.0	29.0	41.4	47.5
13	28.0	39.8	45.0	30.6	42.2	48.5
14	29.4	40.8	45.0	29.2	41.4	48.0
15	27.5	40.0	45.0	29.4	41.4	49.4
16	27.5	41.0	46.2	31.0	41.5	49.0
17	28.2	39.6	45.0	28.5	41.4	48.0
18	27.4	40.5	45.2	30.5	41.4	49.5
19	28.8	40.6	45.4	28.9	41.4	48.2
20	29.5	40.8	45.4	30.2	41.2	48.4
21	28.5	40.5	46.2	29.5	42.0	49.0
22	28.5	40.0	46.0	30.2	41.0	48.2
23	28.0	39.8	44.5	29.5	41.2	48.3
24	28.2	40.0	47.0	28.0	40.0	49.0
25	28.5	41.0	45.5	30.1	41.2	48.0
26	29.0	40.0	45.0	28.8	41.2	48.4
27	27.0	40.0	45.2	29.5	42.0	49.4
28	28.5	41.0	47.0	30.0	41.0	49.4
29	27.5	40.5	45.0	29.0	42.0	48.0
30	28.5	40.5	45.2	28.8	40.0	49.2
รวม	840.1	1212.5	1361.3	872.1	1237.8	1453.5
เฉลี่ย	28.0	40.41	45.37	29.07	41.26	48.45

ตารางที่ 6.4 แสดงผลการทดสอบเหล็กสแตนเลสโดยใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในฉนวนอากาศ

ลำดับ ที่	ระยะแกปของโลหะเหล็กสแตนเลส					
	ขบวนการเดิม			ผ่านขบวนการแช่เย็น		
	0.5 ซม.	0.75 ซม.	1.0 ซม.	0.5 ซม.	0.75 ซม.	1.0 ซม.
1	16.2	22.8	25.8	17.1	23.7	28.2
2	16.2	22.8	27.6	17.6	23.4	28.2
3	15.6	22.2	28.2	17.4	23.1	28.8
4	15.6	21.9	28.2	17.3	23.4	28.8
5	15.6	22.2	28.2	17.7	23.4	28.2
6	15.9	22.5	28.2	17.4	23.0	27.9
7	15.6	21.9	28.2	17.6	23.4	28.2
8	15.9	22.8	27.9	16.8	23.7	27.6
9	15.6	22.5	27.6	17.9	23.4	27.9
10	15.9	22.2	28.8	16.5	23.4	28.8
11	16.2	22.2	27.6	17.4	23.1	28.8
12	16.2	21.9	28.2	17.6	23.7	27.6
13	16.2	22.2	28.2	16.8	23.1	28.5
14	15.9	21.9	27.6	17.3	23.4	28.2
15	16.2	21.6	27.6	17.0	23.7	27.9
16	15.9	22.2	28.2	17.7	24.2	28.5
17	15.9	21.9	28.2	18.0	23.7	28.8
18	15.6	21.9	28.2	17.7	23.1	28.2
19	15.6	21.6	28.2	17.1	23.4	27.6
20	15.9	21.9	27.6	16.8	23.7	27.9
21	15.6	21.6	28.2	18.3	22.8	28.5
22	15.6	22.2	28.2	17.4	23.7	28.2
23	16.2	22.2	28.2	16.2	23.7	28.5
24	15.9	22.5	28.2	17.9	23.7	28.5
25	16.5	22.2	27.0	17.9	23.7	27.9
26	16.5	22.2	27.0	16.8	23.4	27.9
27	16.2	22.5	28.2	16.7	23.1	27.6
28	16.8	22.8	27.6	16.8	23.4	27.0
29	16.2	22.8	27.6	17.4	23.4	27.9
30	15.6	22.2	28.2	18.0	22.5	27.6
รวม	478.8	666.3	836.7	519.3	703.1	843.9
เฉลี่ย	15.96	22.21	27.85	17.31	23.44	28.13

ตารางที่ 6.5 แสดงผลการทดสอบโลหะทองแดงโดยวิธีแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในอุณหภูมิอากาศ

ลำดับ ที่	ระยะแกปของโลหะทองแดง					
	ขนาดการเดิม			ผ่านขนาดการแก้ไข		
	0.5 ซม.	0.75 ซม.	1.0 ซม.	0.5 ซม.	0.75 ซม.	1.0 ซม.
1	14.4	22.5	26.4	15.6	24.0	28.5
2	13.8	22.5	26.1	16.2	24.0	28.8
3	16.5	22.8	25.2	15.6	23.1	28.8
4	14.7	22.5	27.3	15.6	24.3	29.0
5	15.0	22.5	27.3	15.6	24.0	28.5
6	16.2	22.5	25.5	15.6	24.3	28.5
7	15.3	22.5	26.4	15.6	24.3	28.8
8	16.8	22.8	27.3	15.9	23.4	29.1
9	16.2	22.5	26.4	15.9	23.1	28.8
10	16.2	22.8	25.5	15.9	23.7	29.1
11	15.9	22.5	26.7	16.2	23.4	28.8
12	15.9	22.5	27.3	15.9	23.1	28.8
13	15.8	22.8	26.1	16.2	23.4	29.1
14	15.9	22.5	27.3	15.9	24.0	29.1
15	15.3	22.5	27.3	15.9	24.3	28.8
16	15.9	22.8	27.3	15.9	23.4	28.5
17	15.6	22.5	26.7	16.2	23.1	29.1
18	15.6	22.8	27.0	16.2	23.7	29.1
19	15.3	22.2	26.7	16.2	23.7	28.2
20	15.6	22.2	27.0	16.2	23.4	28.2
21	15.3	22.8	27.3	16.5	23.7	29.1
22	15.6	23.1	26.7	16.2	22.8	28.2
23	15.3	22.5	27.3	15.9	23.4	28.2
24	15.6	22.8	26.4	15.6	23.7	28.2
25	15.0	22.8	26.4	16.2	23.4	29.1
26	15.9	23.4	26.1	15.9	22.8	28.8
27	15.6	22.8	26.7	16.2	24.0	28.8
28	16.2	23.1	26.4	15.6	23.4	28.8
29	15.9	22.8	26.7	16.2	23.7	29.1
30	15.6	22.8	26.7	16.2	23.4	28.8
รวม	464.9	679.8	799.5	478.8	708.4	862.7
เฉลี่ย	15.5	22.66	26.65	15.96	23.6	28.76

ตารางที่ 6.6 แสดงผลการทดสอบโลหะทองเหลืองโดยใช้น้ำมันฟ้ากระแสดรงในนวนอากาศ

ลำดับ ที่	ระบะแกปของโลหะทองเหลือง					
	ชบวนการเคิม			ผ่านชบวนการน้เคิม		
	0.5 ซม.	0.75 ซม.	1.0 ซม.	0.5 ซม.	0.75 ซม.	1.0 ซม.
1	15.6	22.5	26.4	15.6	24.6	27.0
2	15.0	22.8	26.7	15.6	23.7	27.3
3	15.9	22.8	27.2	15.3	23.4	27.3
4	15.6	22.8	26.7	15.3	24.0	27.0
5	15.9	22.8	27.3	16.2	24.6	27.6
6	15.9	23.0	26.7	15.6	24.6	27.3
7	15.9	23.1	27.0	15.6	24.9	27.0
8	15.6	23.3	27.0	15.3	23.7	27.6
9	15.6	23.4	26.7	15.9	24.0	27.6
10	15.5	23.1	26.7	15.3	25.2	27.6
11	15.9	23.3	27.2	15.3	25.2	27.0
12	15.6	23.4	26.4	15.9	24.9	27.0
13	15.6	22.8	26.7	15.9	25.2	27.6
14	15.0	23.3	27.2	15.6	25.2	27.6
15	15.1	22.2	27.0	15.6	25.5	27.3
16	15.9	23.4	27.0	15.6	24.0	27.0
17	15.9	23.1	27.0	15.6	24.6	27.0
18	15.3	23.1	27.0	16.2	24.9	27.0
19	15.4	22.7	27.3	16.2	24.9	27.6
20	15.0	23.4	27.2	15.9	25.2	27.3
21	15.6	23.4	27.3	15.9	25.2	27.0
22	15.2	23.3	27.0	15.9	25.8	27.0
23	15.8	22.5	27.0	15.6	25.5	26.7
24	15.9	23.4	27.0	15.6	24.9	27.0
25	15.6	22.8	26.4	15.3	24.6	27.0
26	15.6	23.1	26.4	15.3	25.2	27.3
27	15.6	22.8	27.0	15.0	25.2	27.3
28	15.8	23.0	26.9	15.6	25.8	27.6
29	15.8	22.8	27.0	15.9	25.5	27.0
30	15.6	23.1	27.0	15.3	25.5	26.7
รวม	464.9	679.8	799.5	478.8	708.4	862.7
เฉลี่ย	15.5	22.66	26.65	15.96	23.6	28.76

ตารางที่ 6.7 แสดงผลการทดสอบเหล็กสแตนเลสโดยใช้แรงคั้นไฟฟ้ากระแสสลับในจำนวนเหลว

ลำดับ ที่	ระยะแกปของโลหะเหล็กสแตนเลส					
	ขบวนการเดิม			ผ่านขบวนการแช่เย็น		
	1.0 มม.	2.0 มม.	3.0 มม.	1.0 มม.	2.0 มม.	3.0 มม.
1	3.6	7.5	9.0	4.2	7.2	10.2
2	4.2	6.9	9.6	4.2	7.8	9.9
3	3.6	7.2	9.6	3.9	7.8	9.6
4	3.9	7.2	9.0	4.2	7.8	10.2
5	4.2	6.6	9.6	3.6	7.2	9.9
6	4.5	7.2	9.6	3.9	7.8	9.9
7	4.8	7.5	10.2	4.2	6.9	10.2
8	4.2	7.8	9.9	4.5	7.8	10.2
9	5.4	7.2	9.9	4.8	7.8	9.0
10	4.5	7.2	9.0	4.2	7.2	9.9
11	4.2	7.2	9.6	4.8	7.2	9.0
12	4.5	6.3	9.3	4.5	7.2	9.3
13	4.8	6.6	10.2	4.5	7.5	9.6
14	4.8	7.2	9.6	4.8	7.5	10.2
15	4.2	7.8	10.2	5.4	6.9	10.8
16	3.9	6.6	9.0	4.2	7.5	9.9
17	4.2	6.3	9.6	4.8	7.2	10.2
18	4.8	7.2	9.0	4.8	6.6	9.6
19	4.2	6.6	10.2	4.5	7.5	9.6
20	3.6	7.2	9.6	4.2	6.6	9.9
21	3.9	7.2	9.3	4.2	6.9	10.2
22	4.5	7.2	9.9	5.4	7.8	10.5
23	4.8	6.9	9.6	4.8	7.8	10.2
24	4.8	6.6	9.0	5.1	6.6	9.9
25	3.9	7.2	10.2	4.2	6.9	9.0
26	4.2	7.5	9.9	5.7	7.2	10.2
27	4.2	7.2	9.6	5.4	7.8	9.6
28	4.8	7.2	9.6	5.4	7.5	10.2
29	4.5	6.6	9.6	4.2	7.5	10.5
30	4.5	7.2	10.2	5.1	7.5	9.6
รวม	130.2	212.1	288.6	137.7	220.5	297.0
เฉลี่ย	4.34	7.07	9.62	4.59	7.35	9.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำปใช้

ตารางที่ 6.8 แสดงผลการทดสอบโลหะทองแดงโดยใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับในลอนเหลว

ลำดับ ที่	ระยะแกปของโลหะทองแดง					
	ขนาดการเดิม			ผ่านขนาดการแก้ไข		
	1.0 มม.	2.0 มม.	3.0 มม.	1.0 มม.	2.0 มม.	3.0 มม.
1	3.3	5.7	7.8	3.9	7.2	9.2
2	3.0	6.0	8.4	3.3	6.9	8.4
3	3.3	5.4	7.8	3.6	7.4	8.7
4	3.3	6.3	7.8	3.9	6.9	8.9
5	3.6	6.0	9.0	3.8	7.5	9.3
6	2.7	6.3	8.4	3.8	6.9	9.6
7	3.0	6.6	9.6	3.6	6.9	10.2
8	3.3	6.6	9.3	3.9	6.9	9.0
9	3.6	6.3	9.0	3.9	7.2	9.6
10	3.3	6.9	7.8	3.8	6.9	9.6
11	3.3	6.6	9.6	4.2	6.6	10.2
12	3.9	6.3	9.0	3.6	7.2	9.3
13	3.3	6.3	9.0	3.3	7.5	9.0
14	3.6	6.3	10.2	3.9	7.2	9.6
15	3.9	6.6	9.9	4.5	6.6	10.2
16	3.3	6.9	10.2	3.3	6.9	10.2
17	3.3	6.6	10.2	4.2	6.6	9.6
18	3.9	6.6	9.0	3.8	6.3	9.0
19	3.6	6.9	9.0	3.3	6.3	8.7
20	4.2	7.2	10.2	4.5	7.2	9.6
21	3.3	6.0	9.6	3.9	6.6	8.7
22	3.6	6.3	8.7	3.3	6.6	9.6
23	3.3	7.2	9.0	4.4	6.9	9.9
24	3.9	6.3	9.3	4.2	7.2	9.6
25	3.9	6.0	8.7	3.6	7.5	9.0
26	4.2	6.0	8.4	4.2	6.6	10.2
27	3.6	6.6	9.0	3.3	7.2	9.9
28	3.0	7.2	8.1	3.3	6.9	9.0
29	3.9	6.0	9.6	4.2	6.3	9.3
30	4.2	5.4	9.3	3.3	7.2	10.2
รวม	105.6	191.4	270.9	113.6	208.1	283.3
เฉลี่ย	3.52	6.38	9.03	3.79	6.94	9.44

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ การนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ตารางที่ 6.9 แสดงผลการทดสอบโลหะทองเหลืองโดยใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับในเวลานานหลาย

ลำดับ ที่	ระยะแกปของโลหะทองเหลือง					
	ขบวนการเดิม			ผ่านขบวนการแก้ไข		
	1.0 มม.	2.0 มม.	3.0 มม.	1.0 มม.	2.0 มม.	3.0 มม.
1	3.3	5.4	9.6	4.2	7.8	9.3
2	3.9	6.6	9.9	4.2	6.9	9.3
3	4.2	7.2	8.7	4.5	8.7	9.0
4	3.6	6.3	8.4	4.8	6.9	9.3
5	4.2	6.9	9.6	3.9	7.8	9.9
6	4.5	6.3	9.3	3.9	7.2	10.2
7	3.9	6.9	9.6	4.2	7.8	9.6
8	3.9	6.6	10.2	5.1	6.6	11.1
9	4.2	7.2	9.6	5.7	7.2	9.3
10	4.2	7.2	9.9	4.5	8.4	9.6
11	4.5	6.0	10.2	4.2	6.9	10.2
12	4.2	5.7	9.9	4.2	7.8	10.2
13	3.9	7.2	9.6	3.9	7.5	9.3
14	4.2	5.7	10.2	4.2	6.0	9.6
15	3.9	6.3	9.6	4.2	7.8	9.6
16	4.2	6.6	9.3	5.1	7.8	9.6
17	4.2	6.9	8.7	4.2	7.8	9.9
18	3.6	7.2	8.4	4.8	7.8	9.6
19	4.2	6.0	9.3	4.8	6.6	10.5
20	4.2	6.6	9.0	4.5	7.2	9.0
21	3.9	6.9	8.4	4.8	7.2	9.6
22	4.5	7.2	9.6	4.8	8.7	10.2
23	4.5	7.2	8.1	4.5	6.6	9.6
24	4.5	6.6	8.7	4.2	8.4	10.2
25	4.8	5.7	8.7	5.4	7.2	9.6
26	3.6	7.5	9.9	4.2	6.6	9.6
27	3.9	5.7	9.6	5.4	7.2	9.9
28	3.6	6.6	10.2	3.9	6.6	9.6
29	4.5	7.2	10.2	4.8	6.9	9.9
30	4.2	7.5	9.0	5.1	7.8	9.6
รวม	123.0	198.9	281.4	136.2	221.7	291.9
เฉลี่ย	4.1	6.63	9.38	4.54	7.4	9.73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้ใช้ต้องรับผิดชอบต่อการใช้งานและต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.10 แสดงผลการทดสอบเหล็กสแตนเลสโดยใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในฉนวนเหลว

ลำดับ ที่	ระยะแถบของโลหะเหล็กสแตนเลส					
	ขบวนการเดิม			ผ่านขบวนการแช่เย็น		
	1.0 มม.	2.0 มม.	3.0 มม.	1.0 มม.	2.0 มม.	3.0 มม.
1	14.0	24.5	32.0	14.0	27.5	41.0
2	14.0	23.0	33.0	15.0	29.5	41.5
3	11.5	22.0	33.0	16.0	30.4	39.0
4	13.0	24.0	33.0	17.0	31.5	41.0
5	13.5	25.5	34.0	17.5	27.5	40.5
6	14.0	23.0	35.5	15.5	31.5	40.5
7	13.5	24.0	33.5	16.5	27.5	38.5
8	13.0	24.0	33.0	18.0	29.5	38.0
9	14.0	24.0	32.0	16.0	29.0	40.0
10	14.0	26.0	34.5	16.0	27.5	42.5
11	13.5	23.0	32.0	17.0	27.5	41.0
12	14.0	24.0	35.0	16.5	27.5	40.0
13	15.0	23.0	33.0	17.5	28.5	37.0
14	14.0	24.0	34.5	14.5	31.0	40.0
15	13.5	24.0	34.5	15.0	27.5	40.0
16	14.0	24.0	32.0	15.5	29.5	39.5
17	14.0	23.0	35.0	17.5	30.5	39.0
18	14.0	23.0	33.0	18.0	30.0	39.0
19	13.5	23.0	34.0	16.5	28.0	38.5
20	13.0	23.5	32.0	18.0	30.0	38.0
21	13.5	24.0	33.0	18.0	30.0	39.0
22	12.0	24.0	33.0	17.0	31.0	39.0
23	13.0	23.0	30.5	18.5	27.5	38.0
24	13.0	23.5	30.5	17.0	27.5	37.0
25	13.5	23.5	32.5	16.5	28.0	37.0
26	13.0	23.5	32.0	17.0	28.0	37.0
27	14.0	23.0	34.0	17.0	27.5	36.0
28	14.0	23.0	34.0	17.0	28.0	37.0
29	14.0	23.0	32.0	18.0	30.5	37.5
30	13.5	22.5	33.0	17.0	31.0	36.5
รวม	406.5	707.5	993.0	500.5	870.4	1168.5
เฉลี่ย	13.55	23.58	33.1	16.68	29.01	38.95

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่าการผิด

ตารางที่ 6.11 แสดงผลการทดสอบโลหะทองแดงโดยใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในเวลานวนหลาย

ลำดับ ที่	ระยะแกปของโลหะทองแดง					
	ขบวนการเดิม			ผ่านขบวนการแก้ไข		
	1.0 มม.	2.0 มม.	3.0 มม.	1.0 มม.	2.0 มม.	3.0 มม.
1	14.0	25.0	30.5	15.5	25.5	32.0
2	14.0	23.5	28.0	15.5	25.5	33.0
3	15.0	24.0	29.0	16.0	24.5	34.5
4	13.5	23.0	28.5	16.0	26.0	33.0
5	15.5	24.5	30.0	15.0	25.0	32.0
6	16.5	24.5	28.5	16.0	25.0	33.0
7	15.5	25.0	29.0	15.0	25.5	33.5
8	15.5	23.5	31.0	16.0	25.5	35.0
9	14.0	23.0	30.5	15.5	26.5	33.5
10	14.5	23.5	30.5	15.5	24.5	32.5
11	15.0	23.5	31.0	16.0	24.5	33.5
12	13.5	22.0	30.0	15.0	25.0	33.5
13	13.5	23.5	29.5	15.5	24.5	32.0
14	14.0	25.0	29.0	16.0	25.5	33.5
15	14.0	24.0	28.5	17.0	25.0	33.0
16	14.0	24.0	30.5	17.0	24.5	34.0
17	14.0	23.0	31.0	16.0	26.0	33.0
18	14.5	24.0	30.0	15.5	26.0	34.0
19	15.0	23.0	31.0	16.5	26.0	35.0
20	14.5	23.5	30.5	15.0	26.5	34.5
21	14.5	23.5	29.5	16.0	25.0	32.0
22	15.5	24.5	29.5	17.0	24.0	33.5
23	16.0	24.5	28.5	16.0	25.5	33.0
24	16.0	25.0	30.5	16.0	26.0	34.0
25	15.5	24.5	31.0	16.0	27.0	32.0
26	14.5	24.5	30.5	15.5	26.0	33.5
27	15.0	23.0	29.5	15.0	27.0	32.0
28	15.0	23.0	29.0	17.0	25.5	31.5
29	16.0	24.0	30.5	16.0	26.0	32.0
30	15.5	24.0	31.0	16.5	25.5	33.0
รวม	443.5	715.5	896.0	476.5	764.5	994.5
เฉลี่ย	14.78	23.85	29.87	15.88	25.48	33.15

ตารางที่ 6.12 แสดงผลการทดสอบโลหะทองเหลืองโดยให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในฉนวนเหลว

ลำดับ ที่	ระยะแกปทองโลหะทองเหลือง					
	ขบวนการเดิม			ผ่านขบวนการแช่เย็น		
	1.0 มม.	2.0 มม.	3.0 มม.	1.0 มม.	2.0 มม.	3.0 มม.
1	13.0	24.0	27.0	13.0	23.0	32.0
2	14.0	24.0	28.5	14.5	25.5	30.5
3	13.0	23.5	28.5	16.0	23.0	31.5
4	13.0	23.5	27.0	14.0	23.0	33.0
5	14.0	24.0	28.0	16.5	23.0	32.0
6	14.0	25.5	27.5	16.0	24.5	32.5
7	14.0	24.0	28.5	15.5	25.0	34.0
8	14.5	23.0	27.0	16.0	24.0	33.0
9	14.5	22.5	27.5	15.0	24.0	34.0
10	15.0	22.5	29.0	14.5	23.0	34.0
11	15.0	24.0	27.5	16.5	23.0	33.0
12	13.5	23.0	27.0	14.0	25.0	32.5
13	13.5	22.5	28.5	16.5	26.0	33.5
14	14.0	24.0	28.5	16.0	23.0	35.0
15	14.0	23.5	27.0	15.0	24.0	32.0
16	13.5	21.0	29.0	13.0	27.0	33.5
17	13.5	22.5	28.0	17.0	26.0	29.5
18	13.5	23.0	28.0	15.0	26.5	29.5
19	14.0	23.5	27.5	15.0	27.0	32.0
20	14.0	23.5	29.0	15.5	26.5	35.0
21	14.0	21.0	28.0	16.0	27.0	33.5
22	14.5	22.5	29.5	17.0	23.5	34.5
23	13.5	23.5	28.0	15.5	25.0	34.0
24	13.5	23.5	27.5	15.0	24.0	32.0
25	13.5	22.5	28.5	16.0	26.0	33.0
26	14.0	23.5	28.0	17.0	24.5	33.5
27	13.5	21.5	29.0	16.5	26.0	33.0
28	14.5	24.0	28.0	16.0	26.0	34.0
29	14.5	23.5	27.5	16.5	26.0	33.5
30	13.5	23.5	29.0	17.0	24.5	31.0
รวม	416.5	696.0	841.5	467.0	744.5	984.0
เฉลี่ย	13.88	23.2	28.05	15.57	24.82	32.84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงแหล่งที่มาของเอกสารทุกครั้งที่มีโอกาสนำไปใช้

ตารางที่ 6.13 ตารางแสดงค่ากระแสของเหล็กสแตนเลสทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในแนวอากาศ

ระยะแกป ซม.	ความดัน (มิลลิบาร์)	การทดลองครั้งที่						ค่าเฉลี่ย ไมโคร (แอมป์)
		1	2	3	4	5	6	
0.5	200	18.0	17.0	17.0	17.0	18.0	18.0	17.50
	300	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0	22.00
	400	28.0	26.0	28.0	27.0	27.0	28.0	27.33
	500	31.0	32.0	32.0	32.0	32.0	31.0	31.16
0.75	200	21.0	21.0	21.0	22.0	21.0	21.0	21.16
	300	28.0	28.0	28.0	27.0	29.0	28.0	28.00
	400	35.0	35.0	35.0	36.0	35.0	35.0	35.16
	500	40.0	41.0	40.0	42.0	42.0	42.0	41.16
1.0	200	27.0	27.0	27.0	28.0	28.0	26.0	27.16
	300	35.0	35.0	35.0	36.0	36.0	36.0	35.50
	400	40.0	41.0	41.0	40.0	40.0	40.0	40.30
	500	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.14 ตารางแสดงค่ากระแสของเหล็กสแตนเลสที่ใช้ทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้า
กระแสตรงในแนวแกน

ระยะแกป ซม.	ความดัน (มิลลิบาร์)	การทดลองครั้งที่						ค่าเฉลี่ย (แอมป์)
		1	2	3	4	5	6	
0.5	200	21.0	19.0	20.0	20.0	19.0	19.0	19.66
	300	24.0	26.0	26.0	26.0	24.0	25.0	25.16
	400	29.0	28.0	29.0	29.0	29.0	30.0	29.00
	500	33.0	34.0	34.0	33.0	33.0	33.0	33.33
0.75	200	24.0	24.0	24.0	24.0	24.0	24.0	24.00
	300	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.00
	400	37.0	38.0	38.0	38.0	38.0	37.0	37.66
	500	40.0	43.0	43.0	43.0	44.0	44.0	42.84
1.0	200	28.0	28.0	28.0	27.0	27.0	27.0	27.50
	300	37.0	36.0	37.0	36.0	36.0	36.0	36.33
	400	43.0	44.0	44.0	44.0	45.0	44.0	44.00
	500	52.0	52.0	51.0	51.0	52.0	52.0	51.66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.15 ตารางแสดงค่ากระแสของโลหะทองแดงทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้า

กระแสตรงในฉนวนอากาศ

ระยะแกป ซม.	ความดัน (มิลลิบาร์)	การทดลองครั้งที่						ค่าเฉลี่ย μ (แอมป์)
		1	2	3	4	5	6	
0.5	200	17.0	17.0	17.0	16.0	17.0	18.0	17.00
	300	21.0	21.0	21.0	22.0	22.0	21.0	21.33
	400	27.0	28.0	27.0	27.0	26.0	28.0	27.16
	500	31.0	32.0	32.0	31.0	32.0	31.0	31.50
0.75	200	21.0	21.0	20.0	21.0	20.0	20.0	20.50
	300	27.0	28.0	26.0	27.0	28.0	28.0	27.33
	400	36.0	37.0	36.0	35.0	36.0	35.0	35.84
	500	41.0	41.0	41.0	42.0	42.0	41.0	41.33
1.0	200	25.0	25.0	26.0	27.0	26.0	25.0	25.66
	300	34.0	34.0	34.0	33.0	33.0	33.0	33.50
	400	40.0	40.0	41.0	41.0	41.0	40.0	40.50
	500	48.0	49.0	49.0	49.0	50.0	49.0	49.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.16 ตารางแสดงค่ากระแสของโลหะทองแดงแช่เย็นทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้า
กระแสตรงในอุณหภูมิอากาศ

ระยะแกป ซม.	ความดัน (มิลลิบาร์)	การทดลองครั้งที่						ค่าเฉลี่ย (แอมป์)
		1	2	3	4	5	6	
0.5	200	20.0	19.0	20.0	21.0	21.0	19.0	20.00
	300	24.0	25.0	26.0	25.0	24.0	24.0	24.66
	400	27.0	28.0	28.0	28.0	29.0	27.0	27.84
	500	32.0	33.0	32.0	34.0	32.0	33.0	32.66
0.75	200	23.0	23.0	22.0	22.0	24.0	23.0	22.84
	300	32.0	32.0	32.0	32.0	33.0	32.0	32.16
	400	37.0	37.0	38.0	38.0	38.0	37.0	37.50
	500	43.0	44.0	44.0	41.0	41.0	43.0	42.66
1.0	200	25.0	26.0	25.0	25.0	25.0	26.0	25.33
	300	34.0	34.0	33.0	35.0	33.0	34.0	34.16
	400	43.0	42.0	42.0	43.0	42.0	42.0	42.33
	500	51.0	50.0	52.0	51.0	52.0	50.0	51.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.17 ตารางแสดงค่ากระแสของโลหะทองเหลืองทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้า
กระแสตรงในอุณหภูมิอากาศ

ระยะแกป ซม.	ความดัน (มิลลิบาร์)	การทดลองครั้งที่						ค่าเฉลี่ย μ (แอมป์)
		1	2	3	4	5	6	
0.5	200	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.00
	300	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.00
	400	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.00
	500	31.0	32.0	32.0	31.0	32.0	32.0	31.66
0.75	200	20.0	20.0	20.0	21.0	20.0	20.0	20.16
	300	29.0	28.0	29.0	29.0	29.0	28.0	28.33
	400	35.0	36.0	35.0	36.0	35.0	36.0	35.50
	500	43.0	44.0	43.0	42.0	43.0	42.0	42.84
1.0	200	25.0	25.0	25.0	25.0	26.0	24.0	25.00
	300	33.0	33.0	32.0	32.0	32.0	33.0	32.50
	400	41.0	41.0	40.0	42.0	41.0	41.0	41.00
	500	48.0	48.0	49.0	48.0	47.0	48.0	41.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ G.18 ตารางแสดงค่ากระแสของโลหะทองเหลืองแช่เย็นทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้า

กระแสตรงในอุณหภูมิอากาศ

ระยะแกป ซม.	ความดัน (มิลลิบาร์)	การทดลองครั้งที่						ค่าเฉลี่ย (แอมป์)
		1	2	3	4	5	6	
0.5	200	21.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.16
	300	24.0	24.0	22.0	24.0	23.0	24.0	23.50
	400	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0	27.00
	500	32.0	31.0	32.0	32.0	31.0	32.0	31.66
0.75	200	23.0	22.0	23.0	23.0	22.0	22.0	22.50
	300	32.0	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0	33.84
	400	37.0	38.0	38.0	37.0	38.0	37.0	37.50
	500	44.0	44.0	45.0	44.0	43.0	43.0	43.84
1.0	200	24.0	25.0	25.0	25.0	24.0	25.0	24.66
	300	32.0	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0	32.84
	400	42.0	42.0	42.0	42.0	42.0	42.0	42.00
	500	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

วิเคราะห์ข้อมูล

7.1 บทนำ

การวิเคราะห์ข้อมูลในโครงการนี้จะทำการวิเคราะห์ข้อมูล 3 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลเมื่อทดสอบในฉนวนอากาศ ส่วนที่สองเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลเมื่อทดสอบในฉนวนเหลวและส่วนที่สามเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลเมื่อทำการเปลี่ยนค่าความดันภายในภาชนะทดสอบในแต่ละส่วนที่จะนำไปวิเคราะห์ เมื่อทำการวิเคราะห์แล้ว จะนำผลจากการวิเคราะห์ไปพล็อตกราฟ เพื่อดูค่าแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละชนิดของโลหะที่ผ่าน และไม่ผ่านขบวนการแช่เย็น หลังจากนั้นจะนำค่าที่ได้มาคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เฉลี่ย การเพิ่มของแรงดันเบรคดาว์น ส่วนในกรณีของการเปลี่ยนค่าความดันจะนำค่ากระแสที่วัดได้ในแต่ละระยะแกปและในแต่ละความดันมาพล็อตกราฟหาจุดตัดแกน y ที่เป็นค่าลอการิทึมของกระแส ค่าที่ตัดแกน y ที่ระยะแกปเท่ากับศูนย์นั้นคือ กระแส I_0

เนื่องจากในการทดลองแต่ละครั้งอาจมีข้อบกพร่อง เราสามารถลดข้อบกพร่องนี้โดยการทดลองหลายๆครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยไว้เป็นตัวแทนของข้อมูลชุดนั้นสำหรับการหาค่าเฉลี่ยในกลุ่มข้อมูลหาได้จาก

$$\mu = \sum_{i=1}^N \mu_i / N$$

$$Z = \sqrt{\sum_{i=1}^N (\mu_i - \mu)^2 / N}$$

Z = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

μ = ค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด

μ_i = จำนวนแรงดันเบรคดาว์นครั้งที่ i

N = จำนวนข้อมูลทั้งหมด

ถ้าอัตราส่วนระหว่าง Z/μ_i มากกว่า 0.1 แสดงว่าในการทดลองจะมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจะมีค่ามาก ทำให้ผลการทดลองมีค่าความผิดพลาดมาก

7.2 วิเคราะห์ข้อมูลทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

ในฉนวนอากาศ

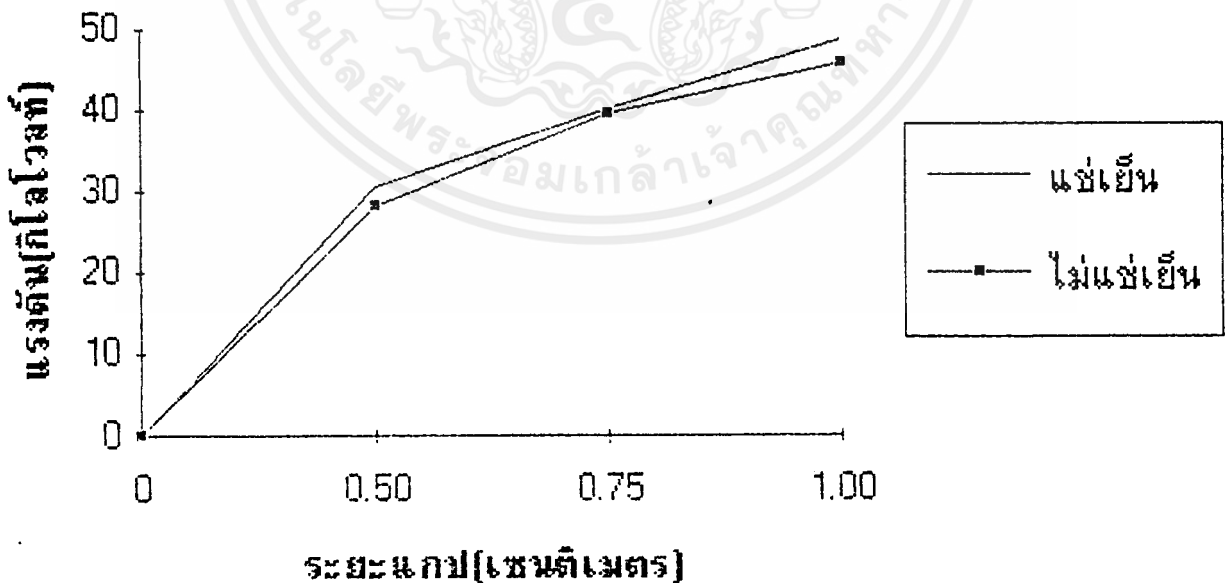
7.2.1 เมื่อทำการทดสอบ 30 ครั้ง ในแต่ละระยะแกปของอิลคโตรดแต่ละชนิด เรียบร้อย ให้นำข้อมูลทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ยของค่าแรงดันแต่ละระยะแกป แล้วนำค่าแรงดันเฉลี่ยที่ได้ไปพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันไฟฟ้า (V) และระยะแกปเป็นเซนติเมตร

7.2.2 ทำการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนไประหว่างแรงดันไฟฟ้าของอิลคโตรดที่ผ่านขบวนการแช่เย็น และไม่ผ่านขบวนการแช่เย็นโดยใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าของอิลคโตรดที่ไม่ผ่านขบวนการแช่เย็นเป็นการเปรียบเทียบ ในการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันที่เปลี่ยนไป จะทำทุกระยะแกปที่ทำการทดลอง หลังจากนั้นนำค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าที่คำนวณได้ในแต่ละระยะแกปมาเฉลี่ย จะได้ค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเฉลี่ย

จากข้อมูลที่ได้นำมาพล็อตกราฟได้ผลดังนี้

กราฟแสดงค่าเบรคดาวนแรงดันกระแสสลับในอากาศ

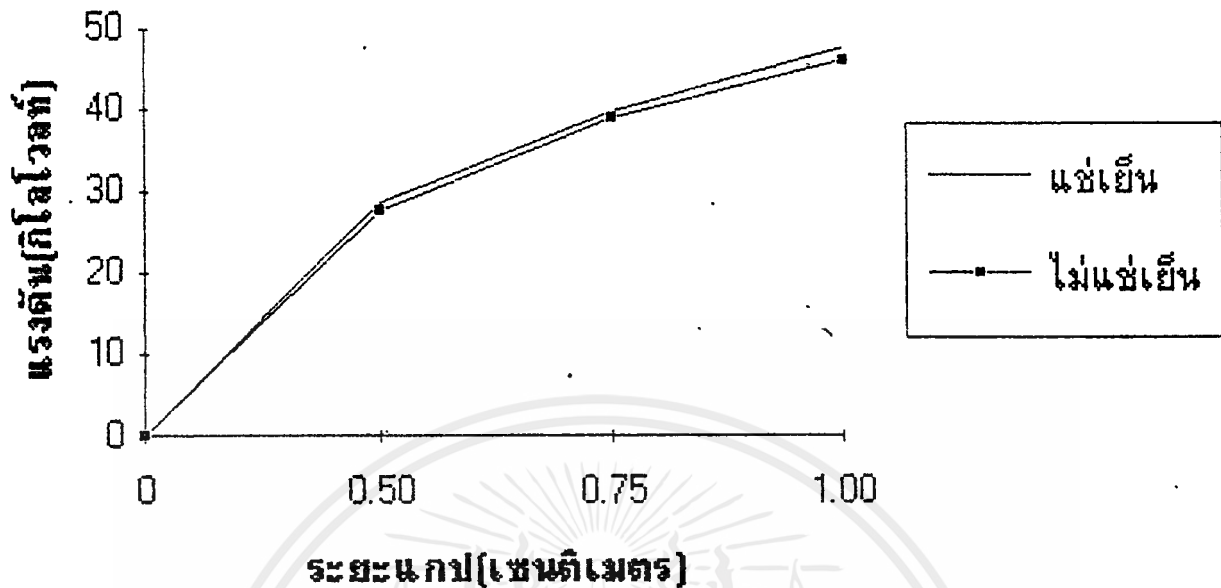
สแตนเลส



รูปที่ 7.1

กราฟแสดงค่าเบรคตาวนแรงดันกระแสสลับในอากาศ

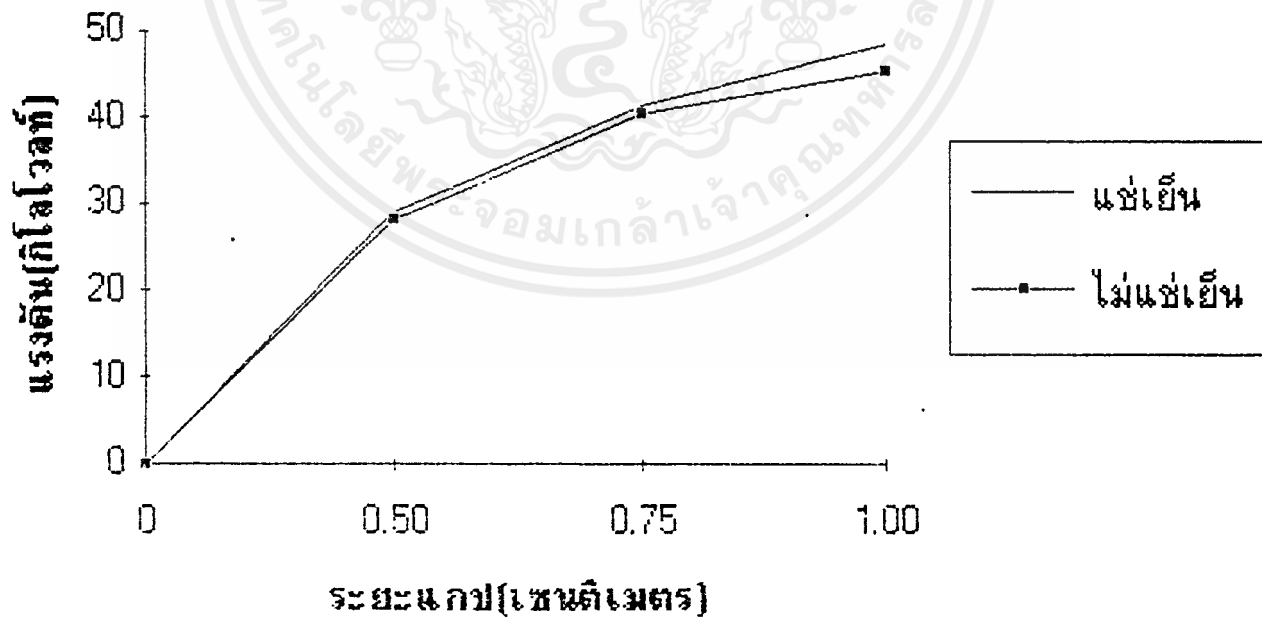
ทองแดง



รูปที่ 7.2

กราฟแสดงค่าเบรคตาวนแรงดันกระแสสลับในอากาศ

ทองเหลือง

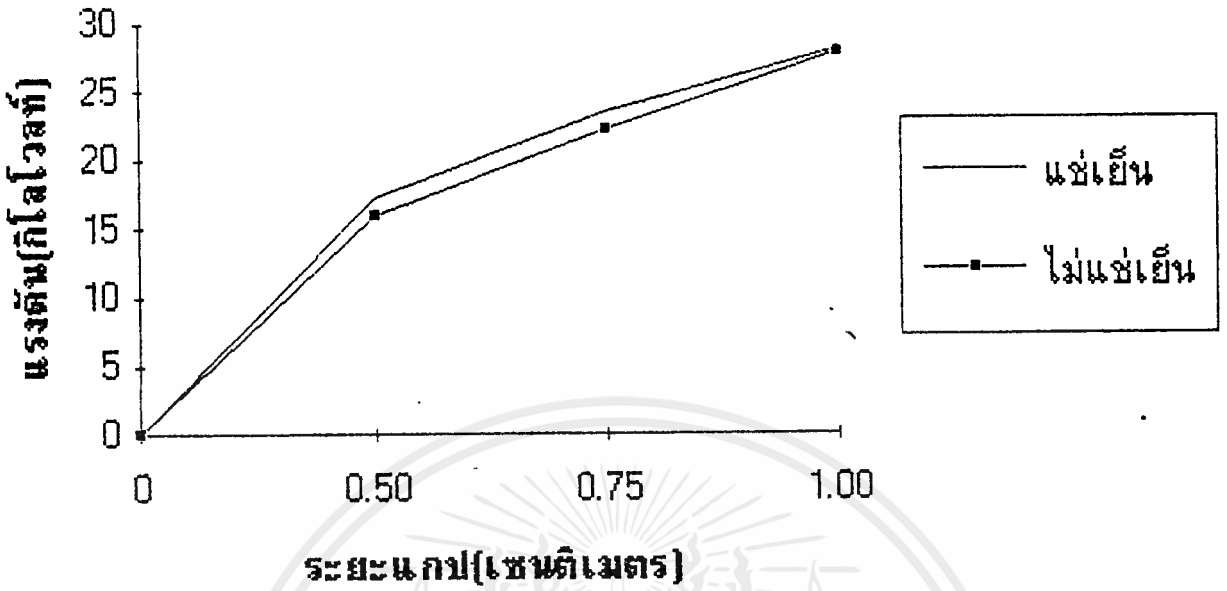


รูปที่ 7.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงค่าเบรคตาวน้แรงตันกระเสตรงในอากาศ

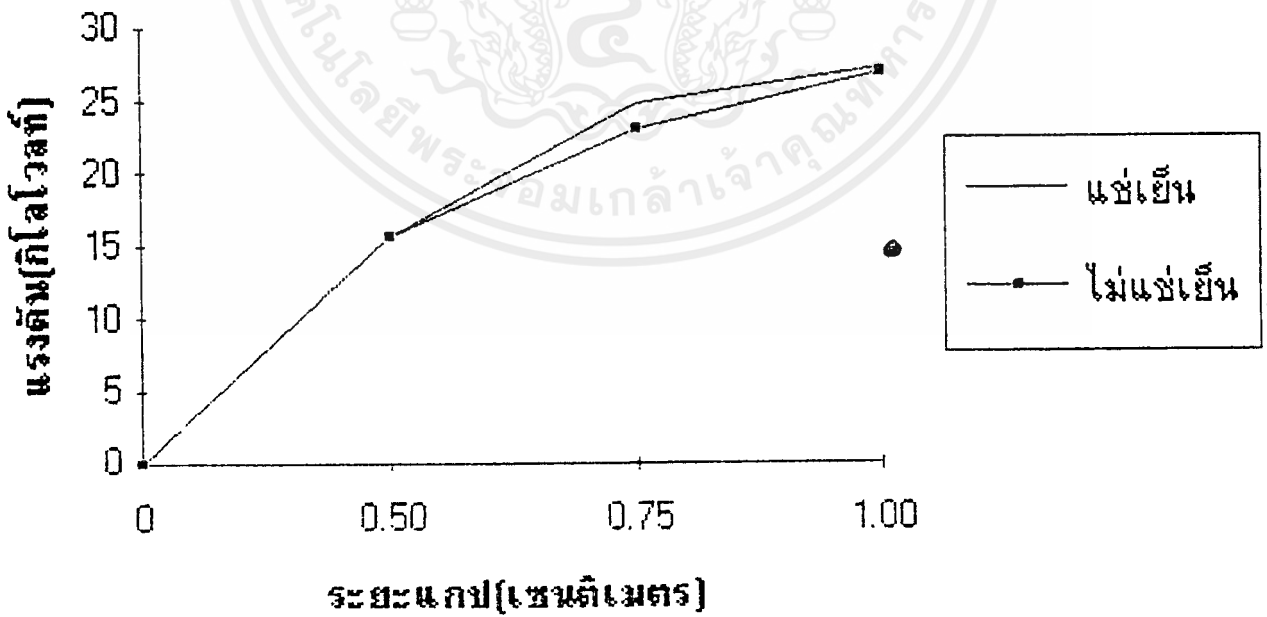
สแตนเลส



รูปที่ 7.4

กราฟแสดงค่าเบรคตาวน้แรงตันกระเสตรงในอากาศ

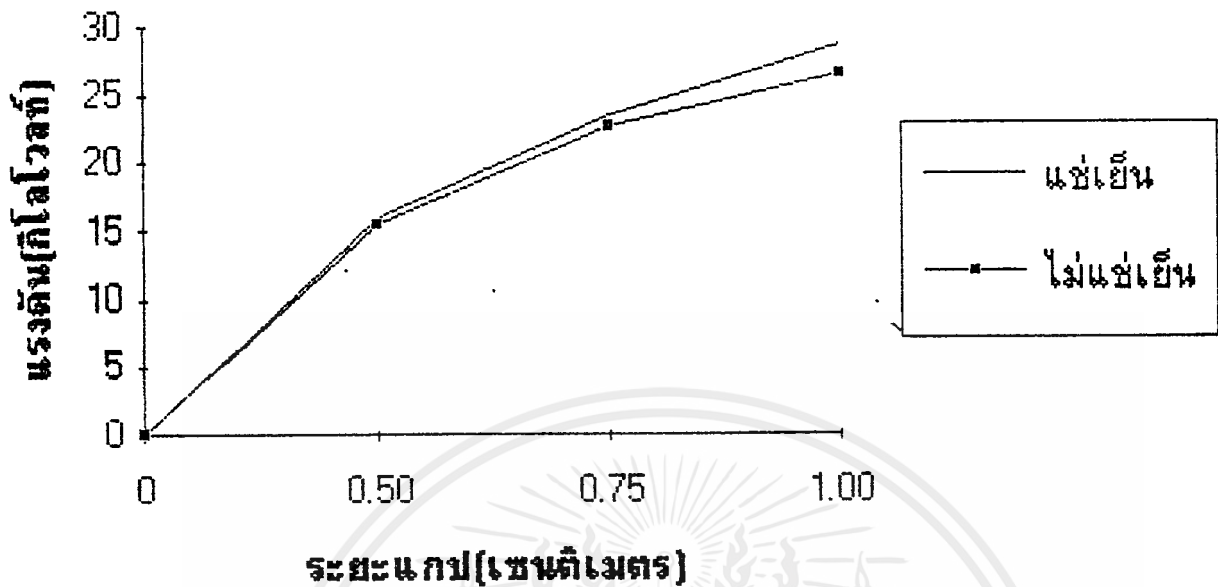
ทองแดง



รูปที่ 7.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงค่าเบรคตาวน้แรงดันกระแสตรงในอากาศ ทองเหลือง



รูปที่ 7.6

7.3 วิเคราะห์ข้อมูลเมื่อทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ในฉนวนน้ำมัน

7.3.1 ในการทดสอบจะทำการทดสอบทั้งหมด 30 ครั้ง หลังจากนั้นนำค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้มาเฉลี่ย จากค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย และระยะแกปที่ใช้จะนำมาคำนวณหาค่า k และค่า n ในสมการ

$$U_b = kd^n \quad \text{---(1)}$$

เมื่อ U_b = แรงดันเบรคดาวน์

k = ค่าคงตัว

n = ค่าคงตัวปกติมีค่าน้อยกว่าหนึ่ง

d = ระยะแกป (มม.)

ถ้า $d = d_1$ มี $U_b = U_{b1}$

$d = d_2$ มี $U_b = U_{b2}$

$d = d_3$ มี $U_b = U_{b3}$

ใส่ค่าลอการิทึม ในสมการ (1)

$$\ln U_b = \ln k + n \ln d \quad \text{---(2)}$$

ใช้เงื่อนไข $d = d_1$, $U_b = U_{b1}$

$d = d_2$, $U_b = U_{b2}$

$d = d_3$, $U_b = U_{b3}$

แทนค่าในสมการ (2)

$$\ln U_{b1} = \ln k + n \ln d_1 \quad \text{---(3)}$$

$$\ln U_{b2} = \ln k + n \ln d_2 \quad \text{---(4)}$$

จาก (2)+(3)

$$n = \frac{\ln(Ub1/Ub2)}{\ln(d1/d2)} \quad \text{---(5)}$$

แทนค่า kn ใน (3) หรือ (4) สามารถหาค่า k ได้

จะได้ว่าค่า k และ n ดังที่ต้องการแต่เนื่องจากค่า k และ n ที่ได้เป็นการนำเอาสองจุดมาทำการวิเคราะห์ ดังนั้นค่า k และ n ที่ได้จะสามารถใช้ได้ในช่วงระยะแกป d1 ถึง d2 เท่านั้น จึงต้องนำเอาผลการทดลองทุกๆระยะแกป มาทำการวิเคราะห์หาค่า k และ n แล้วนำค่า k และ n แต่ละชุดมาเฉลี่ยอีกครั้งหนึ่ง

ในการแทนค่าใช้สมการ (5) แทนค่าหาค่า n ซึ่งจะหาค่า n ได้ในแต่ละช่วงของระยะแกปคือ 1-2 มม. 2-3 มม. และ 3-1 มม. แล้วนำค่า n ที่ได้มาเฉลี่ยนำค่า n เฉลี่ยนี้แทนค่าในสมการ(2) หาค่า k ที่แต่ละค่าแรงดันเบรคดาวน์และระยะแกป จะได้อ่า k ที่แต่ละค่าแรงดันเบรคดาวน์และระยะแกป จะได้อ่า k ที่ 1 มม. 2 มม. และ 3 มม. นำค่า k ที่ได้มาเฉลี่ย

7.3.2 นำค่า k และ n เฉลี่ยที่คำนวณได้มาแทนลงใน(1) อีกครั้งหนึ่งในการแทนค่า Ub และ d จะแทนค่าระยะแกปตั้งแต่ศูนย์ และทำการเพิ่มค่าครั้งละ 0.1 เซนติเมตร ไปจนถึง1เซนติเมตรนำค่าUbที่ได้ไปพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและระยะแกป

7.3.3 จากการวิเคราะห์ถึงผลของเงื่อนไขการทดสอบ พบว่าภาชนะทดสอบที่สร้างขึ้นตามมาตรฐาน IEC Publ. 156 [1] พารามิเตอร์บางตัว ได้แก่ ความเรียบ ความสะอาดของผิวอิเล็กโตรด ระยะแกป ปริมาณของช่องเหลวทดสอบ อัตราการปรับแรงดันเพิ่ม เขม่า และฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจากการเบรคดาวน์ของฉนวนเหลว เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการกระจายของแรงดันเบรคดาวน์ บางครั้งมีค่าสูงถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ของแรงดันเบรคดาวน์เฉลี่ย ดังนั้นในการศึกษาแรงดันเบรคดาวน์ในฉนวนเหลวแต่ละครั้ง ควรให้ความสนใจพฤติกรรมดังกล่าวเป็นอันดับแรก เพื่อกำหนดขั้นตอนการทดลองให้มีการกระจายของแรงดันเบรคดาวน์น้อยที่สุด

จากข้อมูลนำมาทำการวิเคราะห์จะได้ผลดังตาราง

วิเคราะห์ผลการทดลอง ทดสอบด้วยแรงดันไฟกระแสสลับในฉนวนเหลว

ชนิดโลหะ	แรงดันเบรคดาวน์ 1	แรงดันเบรคดาวน์ 2	ระยะแกป 1	ระยะแกป 2	ค่าคงที่(n)	ค่าคงที่(k)
เหล็กสแตนเลส	13.55	23.50	1	2	0.799	13.55
	23.58	33.10	2	3	0.837	13.39
	33.10	13.55	3	1	0.813	13.50
ค่าเฉลี่ย					0.816	13.48
เหล็กสแตนเลส แช่เย็น	16.68	29.01	1	2	0.798	16.68
	29.01	38.95	2	3	0.727	17.06
	38.95	16.68	3	1	0.772	16.80
ค่าเฉลี่ย					0.766	16.85
ทองแดง	14.78	23.85	1	2	0.690	14.78
	23.85	29.87	2	3	0.560	15.43
	29.87	14.78	3	1	0.640	14.97
ค่าเฉลี่ย					0.629	15.06
ทองแดง แช่เย็น	15.88	25.48	1	2	0.682	15.88
	25.48	33.15	2	3	0.649	16.04
	33.15	15.88	3	1	0.670	16.93
ค่าเฉลี่ย					0.667	15.95
ทองเหลือง แช่เย็น	13.88	23.20	1	2	0.740	13.88
	23.20	28.05	2	3	0.470	15.13
	28.05	13.88	3	1	0.640	14.25
ค่าเฉลี่ย					0.617	14.42
ทองเหลือง	15.57	24.82	1	2	0.673	15.57
	24.82	32.82	2	3	0.688	15.50
	32.80	15.57	3	1	0.678	15.55
ค่าเฉลี่ย					0.680	15.54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ผลการทดลอง ทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในฉนวนเหลว

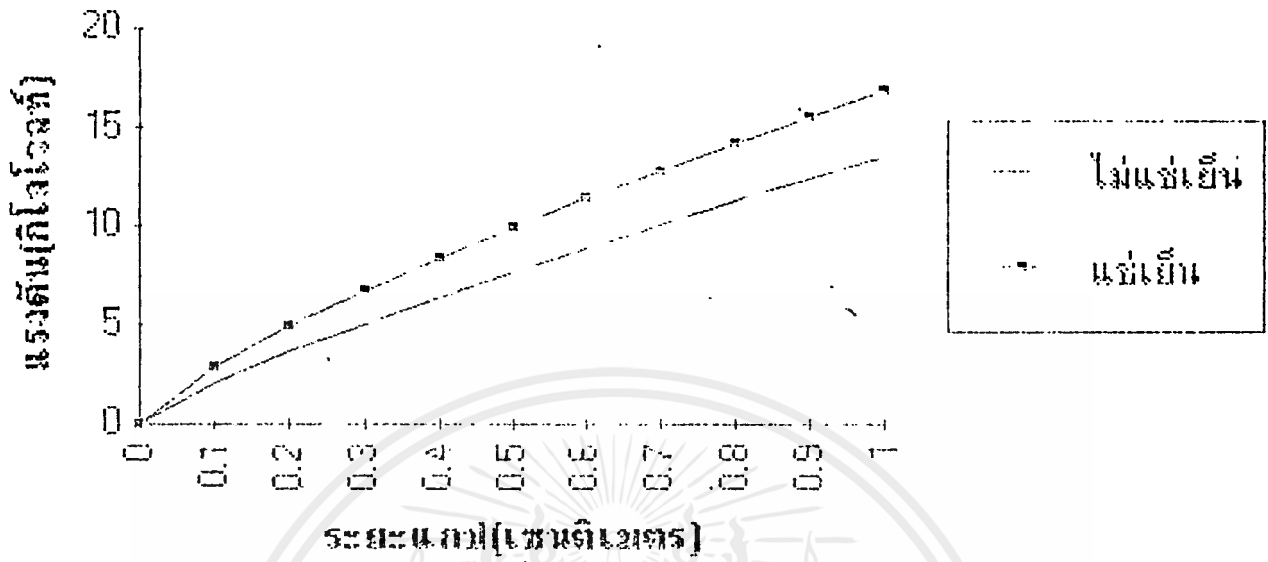
ชนิดโลหะ	แรงดันเบรคดาวน์ 1	แรงดันเบรคดาวน์ 2	ระยะแกป 1	ระยะแกป 2	ค่าคงที่(ก)	ค่าคงที่(ค)
เหล็กสแตนเลส	4.37	7.07	1	2	0.704	4.340
	7.07	9.62	2	3	0.760	4.264
	9.62	4.37	3	1	0.725	4.317
ค่าเฉลี่ย					0.730	4.307
เหล็กสแตนเลส แช่เย็น	4.59	7.35	1	2	0.679	4.590
	7.35	9.90	2	3	0.735	4.510
	9.90	4.59	3	1	0.700	4.566
ค่าเฉลี่ย					0.705	4.555
ทองแดง	3.52	6.38	1	2	0.858	3.520
	6.38	9.03	2	3	0.857	3.521
	9.03	3.52	3	1	0.858	3.520
ค่าเฉลี่ย					0.858	3.520
ทองแดง แช่เย็น	3.79	6.94	1	2	0.873	3.790
	6.94	9.44	2	3	0.759	3.929
	9.44	3.79	3	1	0.831	3.831
ค่าเฉลี่ย					0.821	3.850
ทองเหลือง แช่เย็น	4.10	6.63	1	2	0.693	4.100
	6.63	9.38	2	3	0.856	3.895
	9.38	4.10	3	1	0.753	4.037
ค่าเฉลี่ย					0.767	4.010
ทองเหลือง	4.54	7.40	1	2	0.705	4.540
	7.40	9.73	2	3	0.675	4.583
	9.73	4.54	3	1	0.694	4.553
ค่าเฉลี่ย					0.691	4.558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงค่าเบรคตาว์แรงดันกระแสสลับในเจนเวทเหลว

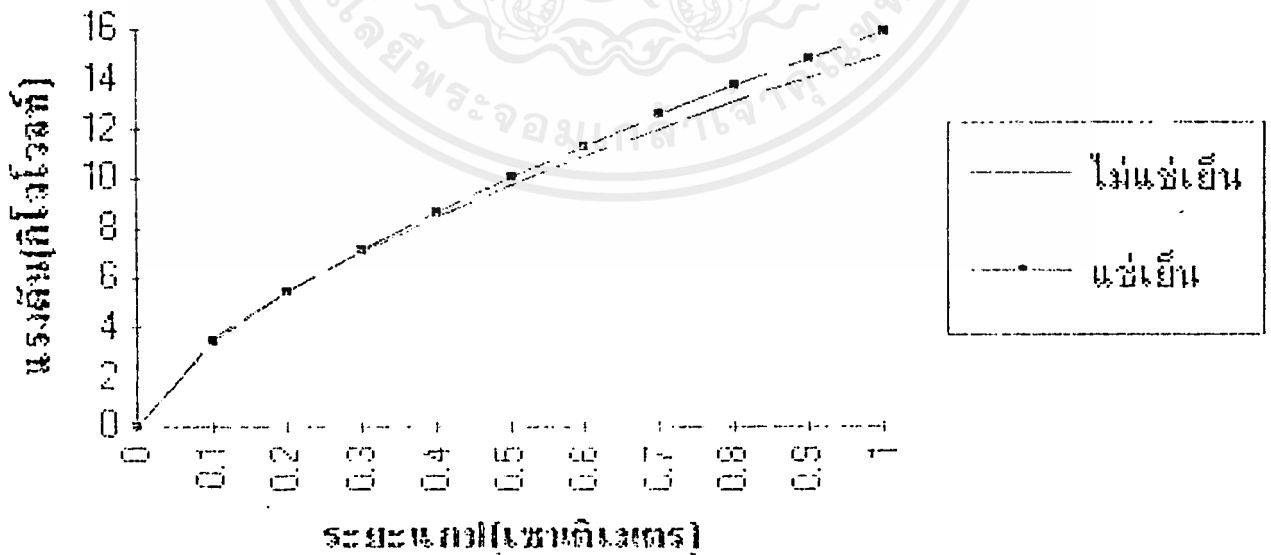
สมณแลส



รูปที่ 7.7

กราฟแสดงค่าเบรคตาว์แรงดันกระแสสลับในเจนเวทเหลว

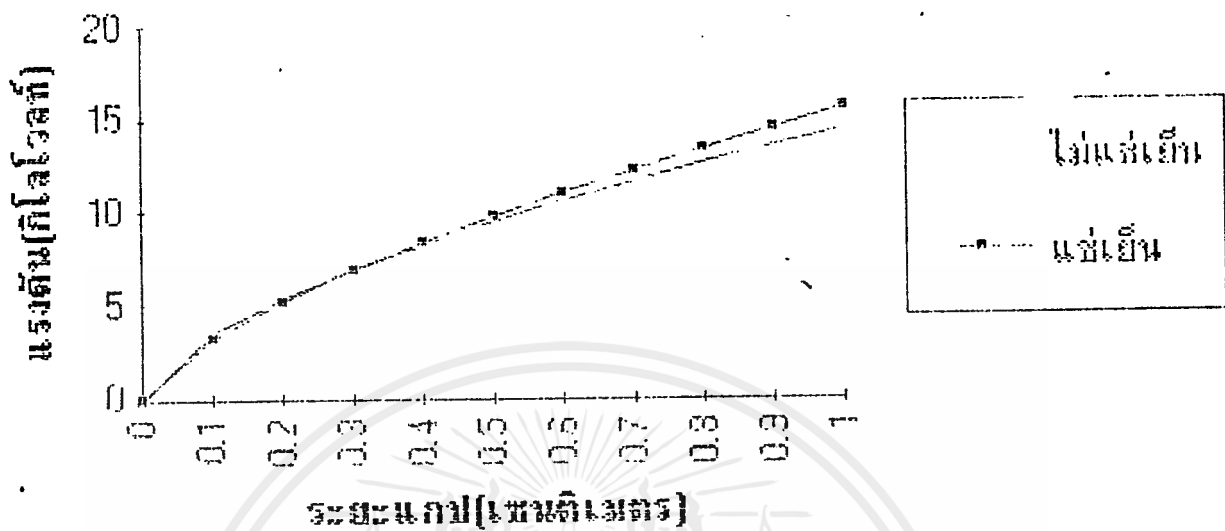
ทองแดง



รูปที่ 7.8

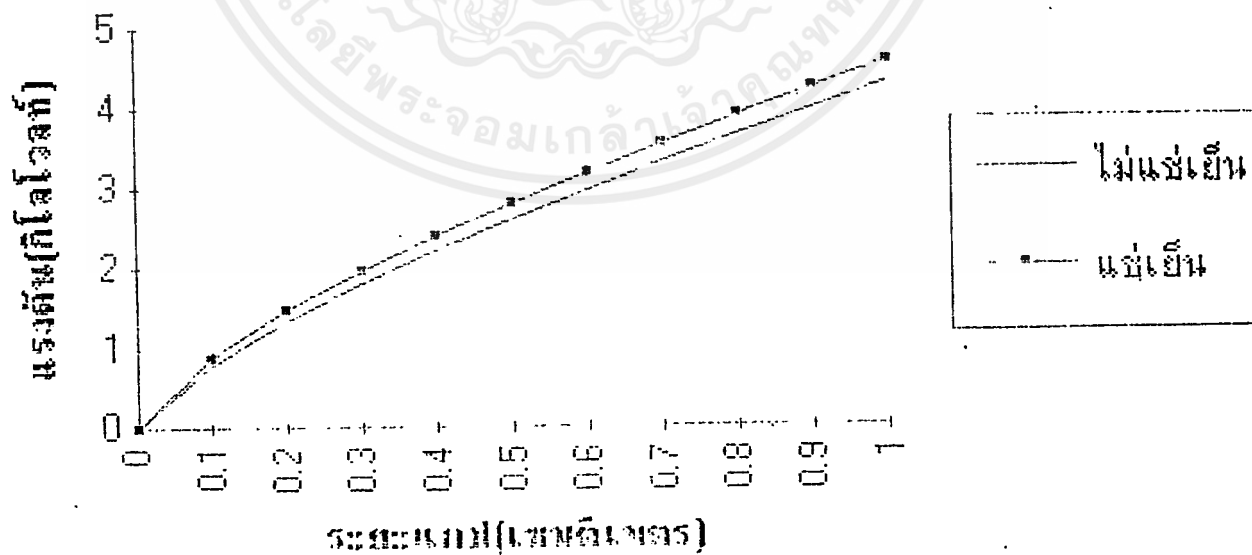
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงค่าเบรคตาวนแรงดันกระแสสลับในฉนวนแห้ง
ทองเหลือง



รูปที่ 7.9

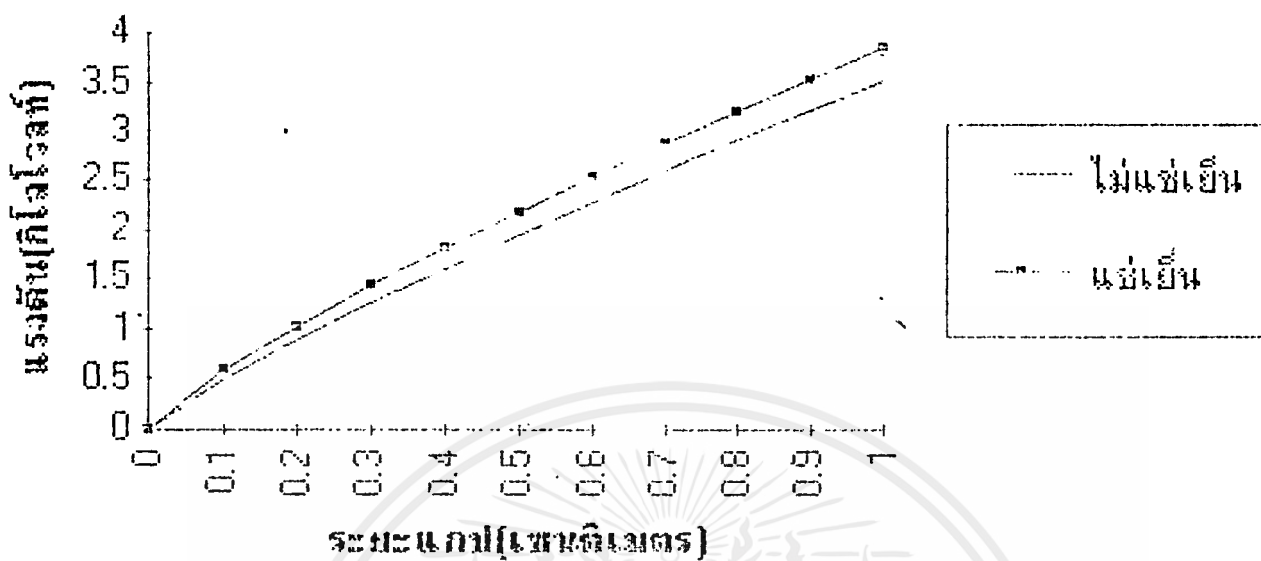
กราฟแสดงค่าเบรคตาวนแรงดันกระแสตรงในฉนวนแห้ง
สแตนเลส



รูปที่ 7.10

กราฟแสดงค่าเบรคตาวัวแรงดันกระแสตรงในฉนวนเหลว

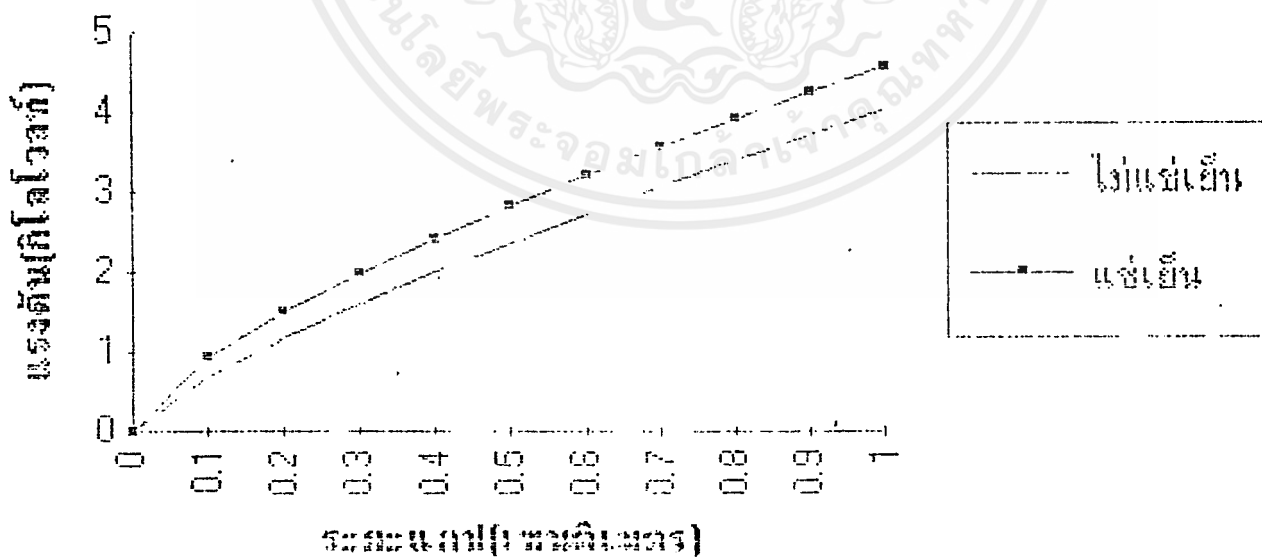
ทองแดง



รูปที่ 7.11

กราฟแสดงค่าเบรคตาวัวแรงดันกระแสตรงในฉนวนเหลว

ทองเหลือง



รูปที่ 7.12

7.4 วิเคราะห์ข้อมูลเมื่อทำการทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในฉนวนอากาศ และเปลี่ยนค่าความดันในภาชนะทดสอบ

7.4.1 นำค่ากระแสที่วัดได้จากการทดสอบทั้งหมดครั้งมาเฉลี่ย นำค่ากระแสเฉลี่ยนี้ไปพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และระยะแกปที่แต่ละความดันต่างๆ

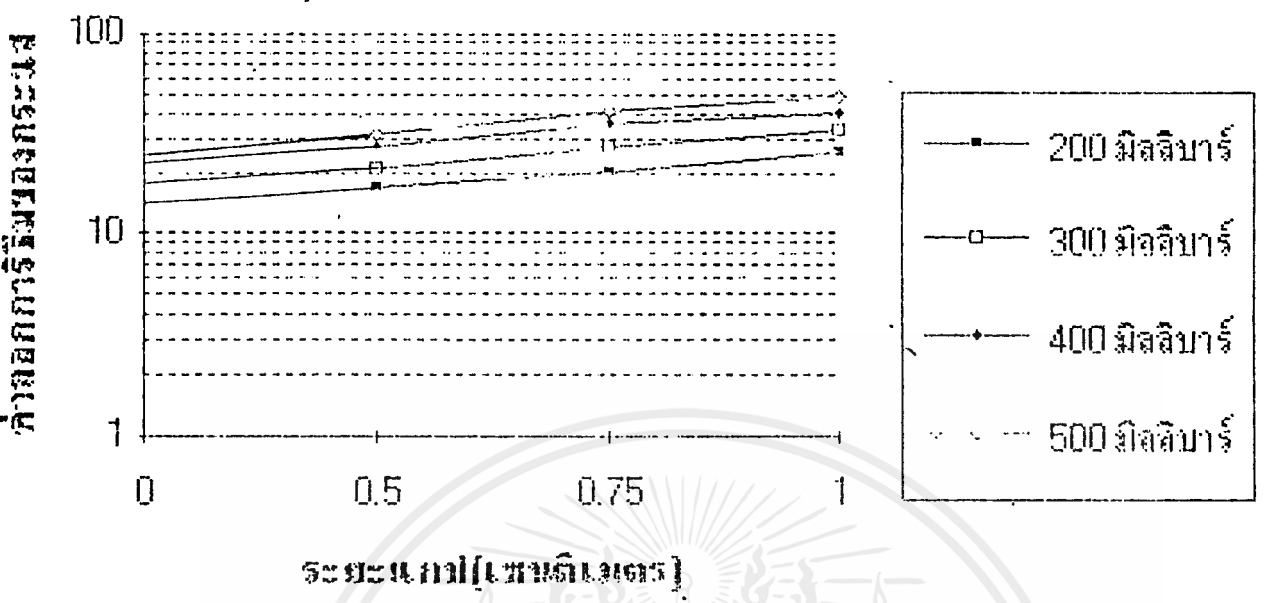
7.4.2 จากกราฟลากเส้นกระแสตัดกับแกน y ที่ระยะแกปมีค่าเป็นศูนย์ จะได้ค่ากระแส I_0

7.4.3 ในกรณีค่ากระแส I_0 ที่แต่ละความดันมีค่าไม่เท่ากันให้หาค่า I_0 เฉลี่ย จากกราฟที่ 7.13-7.18 สามารถลากเส้นกราฟตัดแกน y ได้ค่ากระแส I_0 ดังนี้

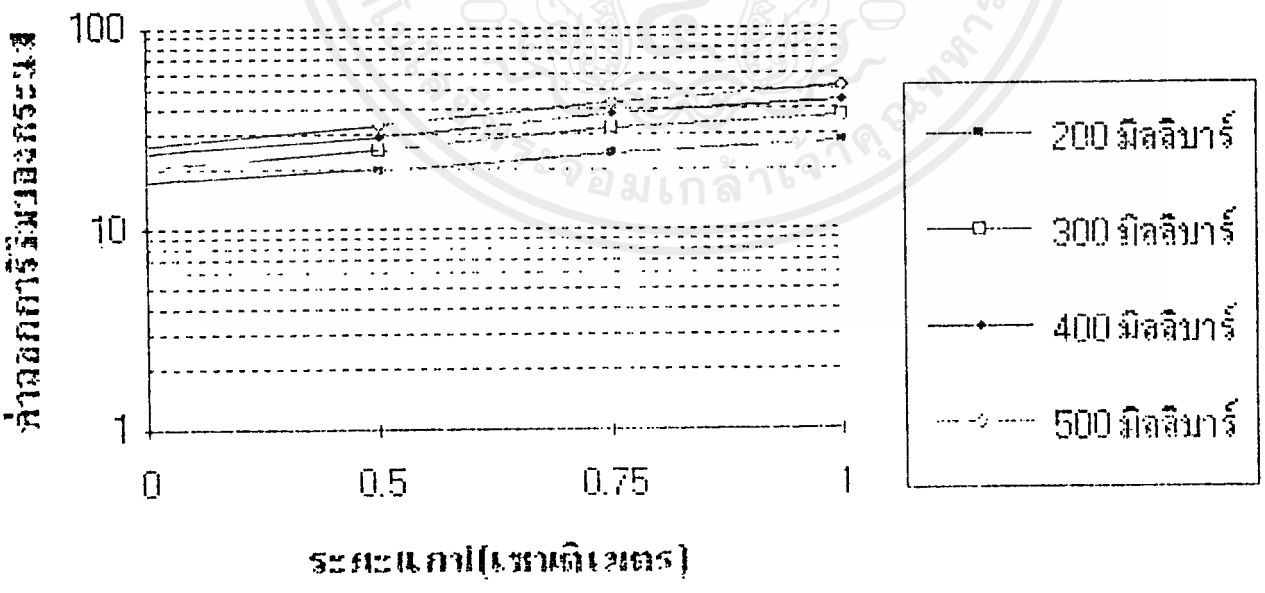
ตารางแสดงค่ากระแส I_0

ชนิดของโลหะ	ค่ากระแส I_0 (μA)
เหล็กสแตนเลส	17.50
เหล็กสแตนเลสแช่เย็น	19.00
ทองแดง	17.25
ทองแดงแช่เย็น	18.00
ทองเหลือง	14.30
ทองเหลืองแช่เย็น	17.00

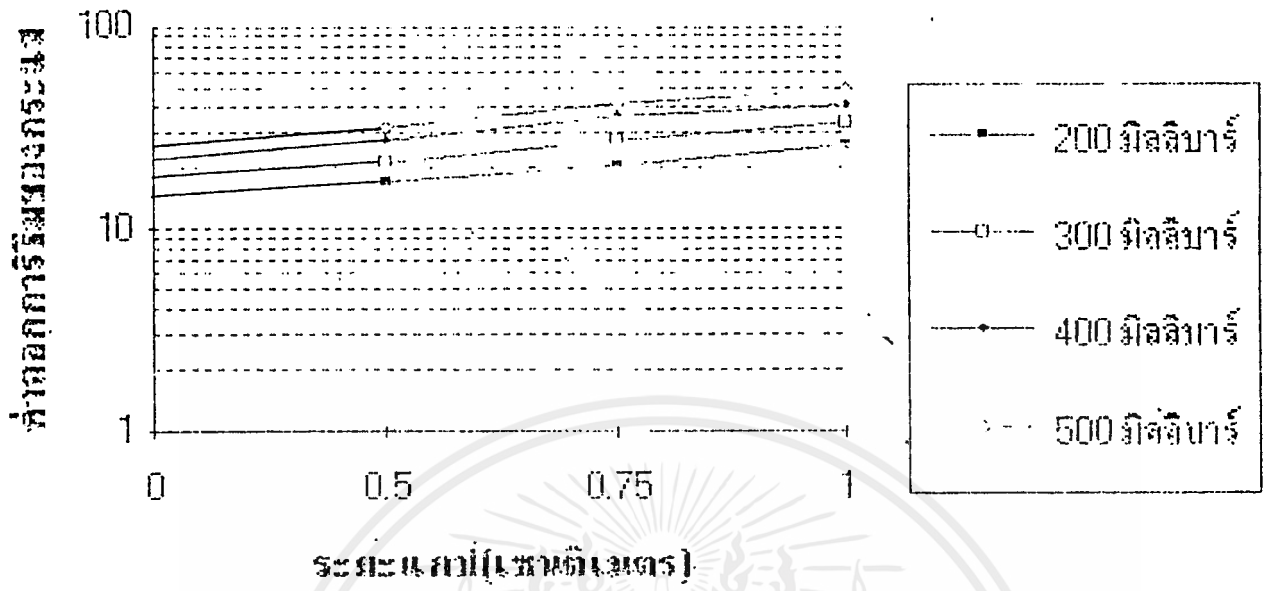
กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับระยะแกว่งที่ความถี่ต่างๆ
สแตนด์เลสใช้ผ่านขบวนการแช่เย็น



กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับระยะแกว่งที่ความถี่ต่างๆ
สแตนด์เลสผ่านขบวนการแช่เย็น

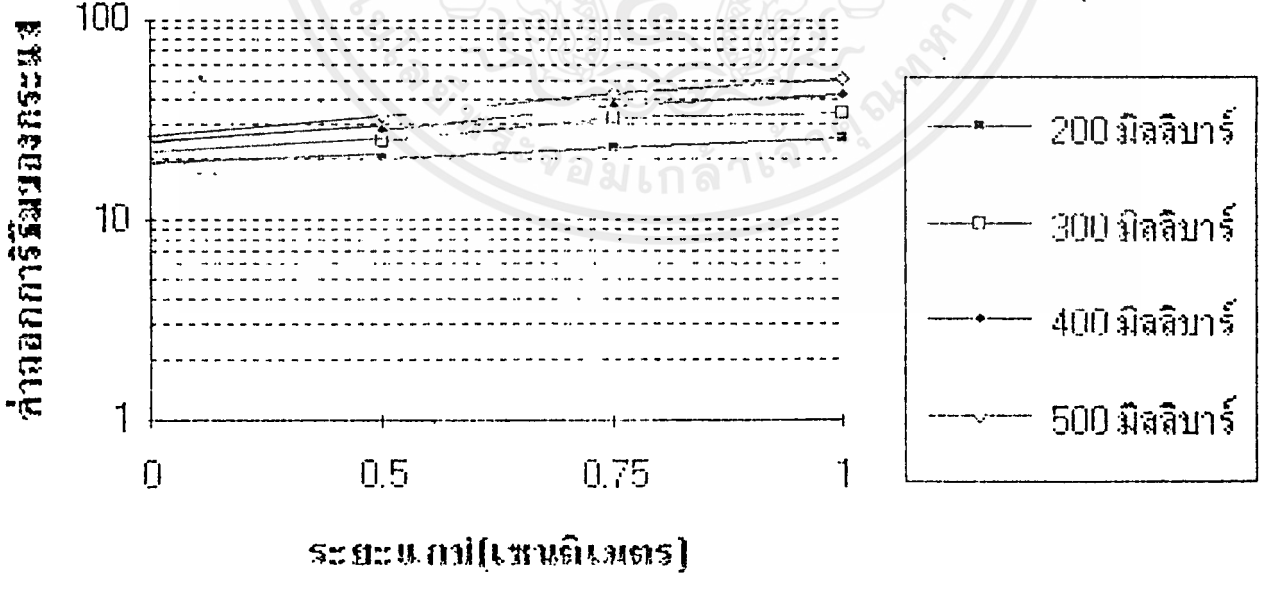


กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์กับกระแสสลับกับระยะแกว่งที่มีความถี่ต่างๆ
ของแรงไวผ่านขบวนการแช่เย็น



รูปที่ 7.15

กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์กับกระแสสลับกับระยะแกว่งที่มีความถี่ต่างๆ
ของแรงดันผ่านขบวนการแช่เย็น

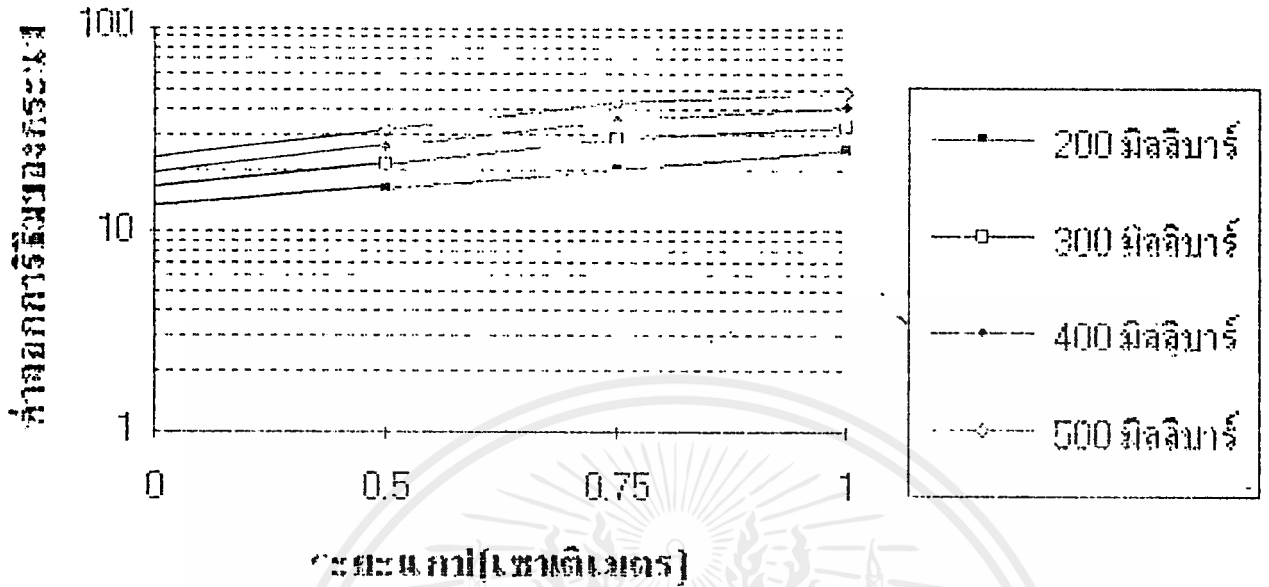


รูปที่ 7.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

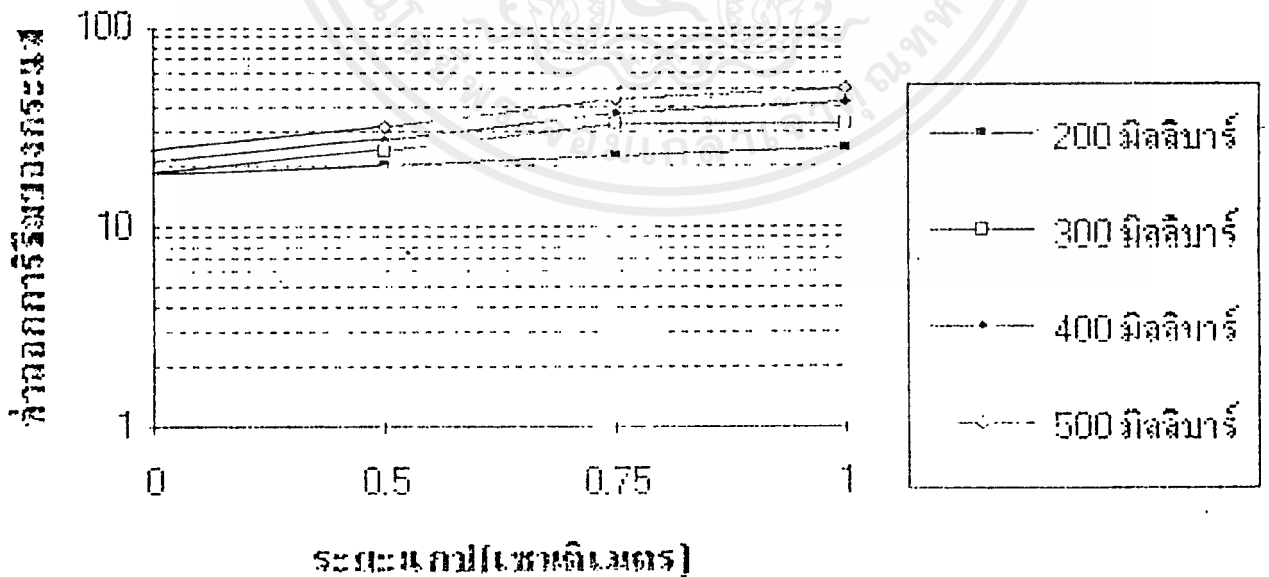
กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับระยะแกว่งที่ความถี่ต่างๆ

ของเครื่องไม่ผ่านขบวนการแร่เย็น



กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับระยะแกว่งที่ความถี่ต่างๆ

ของเครื่องผ่านขบวนการแร่เย็น



รูปที่ 7.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

8.1 บทนำ

จากการทดลองวัดแรงดันโดยดูจากการกระจายของข้อมูล 30 ครั้ง จะเห็นได้ว่า อิเล็กโตรดที่ผ่านขบวนการแช่เย็น มีค่าแรงดันเบรคดาว์สูงกว่าอิเล็กโตรดที่ไม่ผ่านขบวนการ ทั้งในกรณีที่ทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แต่ในการทดสอบนั้น ย่อมมีค่าความผิดพลาด เนื่องจากสิ่งต่างๆ ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

8.2 ความผิดพลาดจากการทดลอง

1) ความผิดพลาดในการวัดแรงดันไฟฟ้า

สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงนี้ใช้วิธีอนุกรมระหว่างความต้านทานสูงกับไมโครแอมป์มิเตอร์ ซึ่งความต้านทานมีค่าสูงถึง 3,000 เมกะโอห์ม มีค่าความผิดพลาดประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ และวิธีการนี้ให้ความละเอียดถึง 0.2 เปอร์เซ็นต์ ที่ระดับแรงดัน 500 กิโล-โวลต์ ส่วนค่าความผิดพลาดเนื่องจากโวลต์เตจที่เกิด เนื่องจากความต้านทานในไมโครแอมป์มิเตอร์น้อยมากเมื่อเทียบกับระดับโวลต์เตจที่วัด จึงสามารถตัดทิ้งไปได้ และความผิดพลาดที่ทำการทดลองในห้องทดลองที่มีอุณหภูมิซึ่งไม่ตรงตามมาตรฐาน IEC Publ.156 [1] ซึ่งทดลองที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส สามารถหาโดยใช้วิธีวัดแรงดันด้วยช่องว่างระหว่างทรงกลม มีน้อยกว่า 2.45 เปอร์เซ็นต์ เมื่อรวมความผิดพลาดที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะได้น้อยกว่า 2.45 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งข้อผิดพลาดในการทดลองนี้ สามารถยอมรับได้ สำหรับการทดลองทางไฟฟ้าแรงสูง

2) ความผิดพลาดในการตั้งระยะแก๊ป

ระยะแก๊ปสามารถตั้งให้ถูกต้องด้วยไดออลลิงไมโครมิเตอร์ที่มีความแม่นยำเท่ากับ 0.01 มม. นับได้ว่าเป็นเครื่องมือที่มีความละเอียดสูง ในการทดลองนี้ได้ใช้ระยะแก๊ปที่น้อยที่สุดคือ 1 มม. ดังนั้นเราให้ความผิดพลาดที่เกิดจากการตั้งระยะแก๊ปเป็น 1 เปอร์เซ็นต์ และถ้ารวมความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดแรงดันไฟฟ้า และจากการวัดระยะแก๊ปจะได้น้อยกว่า 3.45 เปอร์เซ็นต์

3) ความผิดพลาดจากการอ่าน

เนื่องมาจากสเกลของเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ที่ขนาดแรงดันมากๆ การอ่านจะผิดพลาดมาก แต่ที่แรงดันน้อยๆ ค่าแรงดันที่อ่านได้จะผิดพลาดน้อยเนื่องจากมีสเกลที่ละเอียดกว่า ส่วนการอ่านจากมิเตอร์วัดแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับจะมี

ความผิดพลาดเนื่องจากมิเตอร์เป็นมิเตอร์คลาส 0.5 จึงมีค่าความผิดพลาด 0.5 เปอร์เซ็นต์

8.3 จากกราฟการวัดแรงดันเบรคดาวน จะเห็นข้อแตกต่างของการวัดโดยใช้สัญญาณแต่ละชนิด จะเห็นว่าทั้งสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ค่าแรงดันที่วัดได้มีค่าน้อยกว่ามาตรฐานก็เนื่องมาจากความผิดพลาดจากการวัดเพราะผลของความสกรปรกและความขรุขระของผิวทรงกลม และอุณหภูมิรวมทั้งความชื้น อีกประการหนึ่งคือความผิดพลาดของเครื่องมือวัดเองรวมทั้งการอ่านข้อมูลด้วย แรงดันเบรคดาวนที่วัดได้โดยสัญญาณแรงดันไฟสลับจะมีความถูกต้องมากกว่าสัญญาณแรงดันไฟตรง เพราะว่ากรวัดโดยแรงดันไฟตรงนั้นจะมีความผิดพลาดเกิดจากพวกฝุ่นละอองมากกว่าแรงดันไฟสลับ

เหตุที่แรงดันเบรคดาวนเพิ่มมากขึ้น เมื่อระยะแกปมากขึ้นอธิบายได้โดยเมื่อระยะแกปมากขึ้นทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากแคโทดใช้เวลามากขึ้น ทำให้โอกาสรวมตัวกับประจุเป็นกลางมากขึ้น เกิดเป็นไอออนลบทำให้เกิดการไอออไนเซชันน้อยลง ผลของอุณหภูมิและความดัน มีผลต่อแรงดันเบรคดาวนที่วัดได้คือ เมื่ออุณหภูมิมากขึ้นจะทำให้เกิดชบวนการเทอร์มัลไอออไนเซชันมากขึ้น ทำให้แรงดันเบรคดาวนลดลงกว่าปกติ และผลของความดัน ถ้าความดันมากขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นของอากาศมากขึ้น จะมีระยะอิสระเฉลี่ยน้อยลง และ พื้นที่หน้าตัดการชนมากขึ้น ทำให้แรงดันเบรคดาวนมากกว่าปกติ

ผลจากการคำนวณเมื่อเขียนในกราฟจะเห็นว่า มีความแตกต่างจากมาตรฐานมากเนื่องจากว่า ในการคำนวณเราต้องกำหนดเงื่อนไขบางอย่างให้แน่นอน และแฟลคเตอร์ที่มีผลต่อแรงดันบางตัวไม่ได้นำมาคิดรวมด้วย

จากกราฟรูปที่ 7.1 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อแรงดันเบรคดาวนของน้ำมันหม้อแปลง จะเห็นว่าอุณหภูมิต่ำมีผลต่อแรงดันเบรคดาวนมากขึ้น ซึ่งสนับสนุนผลการทดลองของชอลด์คี้ [4] ว่าผลของ thermal emission มีน้อยกว่าผลของ field emission แต่จากกราฟแสดงแนวโน้มให้เห็นว่าแรงดันเบรคดาวนจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่เป็นไปแบบช้าๆ และเมื่ออุณหภูมิมากขึ้นแทบจะไม่มีผลต่อแรงดันเบรคดาวนเลย

8.4 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองที่ได้ทั้งในการทดสอบอิลเลคโตรด ในฉนวนอากาศและในฉนวนเหลว โดยใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและกระแสตรง จะเห็นได้ว่าอิลเลคโตรดที่ผ่านชบวนการแช่เย็นมีค่าแรงดันเบรคดาวนสูงกว่าอิลเลคโตรดที่ไม่ผ่านชบวนการ ถึงแม้จะทำการทดสอบจะมีค่าแฟลคเตอร์ต่างๆที่ทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้น แต่ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในโลหะแต่ละชนิดจะมี

ค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากทำการทดสอบในเวลาใกล้เคียงกันดังนั้น อุณหภูมิ ความชื้น ความดันบรรยากาศ จึงมีค่าใกล้เคียงกันหรือเท่ากัน

จากการวิเคราะห์ถึงผลของเงื่อนไขการทดสอบ พบว่าภาชนะทดสอบที่สร้างขึ้น ตามมาตรฐาน IEC Publ. 156 [1] พารามิเตอร์บางตัว ได้แก่ ความเรียบ ความสะอาด ของผิวอิเล็กทรอนิกส์ ระยะแก๊ป ปริมาณของของเหลวทดสอบ อัตราการปรับแรงดันเพิ่ม เขม่า และฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจากการเบรคดาวน์ของฉนวนเหลวเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการกระจายของแรงดันเบรคดาวน์ บางครั้งมีค่าสูงถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ของแรงดันเบรคดาวน์เฉลี่ยดังนั้น ในการศึกษาแรงดันเบรคดาวน์ในฉนวนเหลวแต่ละครั้ง ควรให้ความสนใจพฤติกรรมดังกล่าว เป็นอันดับแรก เพื่อกำหนดขั้นตอนการทดลองให้มีการกระจายของแรงดันเบรคดาวน์น้อยที่สุด

ภายหลังจากการทดสอบอิเล็กทรอนิกส์ จะเห็นได้ว่าอิเล็กทรอนิกส์ทั้งสองขบวนการเกิดรอยสึก และคราบเขม่า เนื่องมาจากแรงดันเบรคดาวน์ทั้งในฉนวนอากาศและในฉนวนเหลว โดยเฉพาะในฉนวนเหลวจะมีฟองก๊าซเกิดขึ้นหลังการเบรคดาวน์

จากการใช้โลหะอิเล็กทรอนิกส์ทั้งสามชนิด ไม่สามารถบอกได้ว่าโลหะชนิดใดมีอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดันมากกว่าชนิดใด เนื่องจากการเพิ่มของแรงดันเบรคดาวน์ใหม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นโลหะแต่ละชนิดจึงมีค่าความคงทนต่อแรงดันเบรคดาวน์ไม่คงที่ ซึ่งค่าแรงดันเบรคดาวน์ที่วัดได้นั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน ความชื้นสัมพัทธ์ แล้วยังขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างแก๊ป, ชนิดของแรงดันที่ใช้ทดสอบ และคุณสมบัติภายในของโลหะเอง

8.5 ข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการเก็บข้อมูลในช่วงระยะแก๊ปได้ไม่กว้างมากนัก เนื่องมาจากขีดจำกัดของวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นถ้าเป็นไปได้น่าจะทำการผลิตอิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่กว่าที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เพื่อให้สามารถวัดค่าแรงดันเบรคดาวน์ในช่วงแก๊ปที่กว้างมากขึ้น รวมทั้งทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่นค่าความคงทนต่อแรงดันเบรคดาวน์ในแต่ละระยะแก๊ป สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง α/P กับ E/P จากการทดสอบสมมุติฐานที่ตั้งไว้เป็นจริง แต่เพื่อให้น่าเชื่อถือยิ่งขึ้นควรมีการทำกรทดสอบกับโลหะชนิดอื่นๆด้วย

ภาคผนวก ก

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

METHOD FOR THE DETERMINATION OF THE
ELECTRIC STRENGTH OF INSULATING OILS

FOREWORD

- 1) The formal decisions or agreements of the I.E.C. on technical matters, prepared by Technical Committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 2) They have the form of recommendations for international use and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 3) In order to promote this international unification, the I.E.C. expresses the wish that all National Committees having as yet no national rules, when preparing such rules, should use the I.E.C. recommendations as the fundamental basis for these rules in so far as national conditions will permit.
- 4) The desirability is recognized of extending international agreement on these matters through an endeavour to harmonize national standardization rules with these recommendations in so far as national conditions will permit. The National Committees pledge their influence towards that end.

PREFACE

This recommendation was prepared by Technical Committee No. 10, Insulating Oils.

A first draft was circulated in 1961, and, as a result of the meeting held at Interlaken in June 1961, a proposal was submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in January 1962.

The following countries voted explicitly in favour of publication:

Austria	Netherlands
Belgium	Norway
Bulgaria	Poland
Czechoslovakia	Portugal
Denmark	Romania
Finland	Sweden
France	Switzerland
Germany	Turkey
Hungary	Union of Soviet Socialist Republics
Israel	United States of America

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

METHOD FOR THE DETERMINATION OF THE ELECTRIC STRENGTH OF INSULATING OILS

1. Introduction

Electric strength is not a criterion of insulating oil manufacturing quality, but a conventional test intended to reveal the extent of physical pollution by water and other suspended matter, and the advisability of carrying out drying and filtration treatment before the oils are introduced into the apparatus for which they are intended.

The measured value of the electric strength depends essentially on the apparatus and procedure used.

Although in principle the technical problem concerning the assessment of electric strength is the same for new oils, treated oils and used oils, it would seem that this test should be standardized solely for the purpose of international transactions in new oils intended for electrotechnical uses, transactions in which a common denominator is desired. Each National Committee can standardize, in its own country, a special different method for the control of used oils.

The test described below consists in subjecting the oil, contained in a specified apparatus, to an a.c. electric field with a continuously increasing rate of voltage rise, till the oil breaks down.

2. General

The test is, in principle, the same for all classes of oil (for transformers, for oil-filled cables, for circuit-breakers, for capacitors), whether new or used. It is mainly intended for the acceptance of new oils at the time of their delivery; its application is restricted to oils having a viscosity of not more than 50 centistokes at 20°C.

3. Sampling

As the electric strength is exceptionally sensitive to the slightest contamination of the sample, the importance of careful sampling, with special reference to possible absorption of humidity, cannot be too strongly emphasized. Samples of insulating oil for electric strength tests are only drawn by or under the immediate supervision of persons of judgement, skill and experience in the handling of insulating oils.

The oil is sampled at the place where it is considered to be most polluted, for example, at the lowest point of the receptacle holding it.

4. Condition of the oil

The test is carried out on the oil as received, without drying or degassing.

5. Test cell

The cell, made of glass or plastic, is transparent, with an effective volume between 300 and 500 ml. It is preferably closed.

Two types of cell are illustrated, see Figures 1 and 2 page 15.

6 Electrodes

The copper, brass, bronze or stainless steel polished electrodes are either spherical (12.5 mm to 13.0 mm diameter) as given in Figure 1 or spherical surfaced of the shape and dimensions given in Figure 2. The electrodes are mounted on a horizontal axis and are 2.5 mm apart.

The gap between them is set to an accuracy of ± 0.1 mm by means of thickness gauges. The axis of the electrodes is immersed to a depth of approximately 40 mm.

Electrodes are replaced as soon as pitting caused by discharges is observed.

7 Preparation of the cell

When it is not in use, it is recommended to store the apparatus full of dry oil in a clean dry place, protected from dust.

If it has not been used for some time, it is thoroughly cleaned: the electrodes are removed, cleaned and finally rinsed with dry clean new oil. Replacement of the electrodes is carried out with the greatest care, avoiding all direct contact with the fingers.

Immediately before use, the cell is cleaned by rinsing with the test oil (several times, if possible) before proceeding to the final filling under the conditions laid down in Clause 7.

8 Preparation of the sample

The vessel containing the test oil is gently agitated and turned over several times in such a way as to ensure as far as possible a homogeneous distribution of the impurities contained in the oil without causing the formation of air bubbles.

Immediately after this, the sample is poured down into the test cell, slowly in order to avoid air bubbles forming (e.g. by means of a clean, dry glass rod). The operation is carried out in a dry place free from dust.

The oil temperature at the time of the test shall be the same as that of the ambient air, preferably in the neighbourhood of 20°C (15 to 25°C), and noted.

9 Test method

The test consists in applying to the electrodes an increasing a.c. voltage of frequency 40 to 62 Hz (50/60 Hz), the rate of increase of the voltage being regular and equal to 2 kV/s, starting from zero up to the value producing breakdown.

The circuit is opened manually if a transient spark (audible or visible) occurs between the electrodes or automatically if an established arc occurs.

In the latter case the automatic switch shall break the voltage within 0.02 s.

The breakdown voltage is the voltage reached during the test at the time the first spark occurs between electrodes, whether it be transient or established.

The test shall be carried out six times on the same cell filling.

The first application of the voltage is made as quickly as possible after the cell has been filled, provided there are no longer any air bubbles in the oil, and at the latest ten minutes after filling. After each breakdown, the oil is gently stirred between the electrodes by means of a clean, dry glass rod, avoiding as far as possible the production of air bubbles. For the five subsequent tests, the voltage is re-applied one minute after the disappearance of any air bubbles that may have been formed. If the observation of the disappearance of air bubbles is not possible, it is necessary to wait five minutes before a new breakdown test is started.

The electric strength is the arithmetic mean of the six results which have been obtained.

10. Electrical apparatus

The characteristics of the electrical apparatus shall comply with the following requirements

10.1 Transformer

The test voltage may be obtained by using a step-up transformer supplied from an a.c. (40 to 62 Hz (c/s)) low-voltage source. The primary voltage is gradually increased, either manually or by an automatic control device.

The voltage applied to the electrodes of the oil-filled cell has an approximately sinusoidal waveform, such that the peak factor is within the following limits: 1.34 (i.e. $\sqrt{2} \pm 5\%$) and 1.48 (i.e. $\sqrt{2} \pm 5\%$).

The transformer and associated equipment are designed to produce a minimum short-circuit current of 20 mA for voltages higher than 15 kV.

10.2 Protective gear

The test is carried out so as to prevent high-frequency oscillations as far as possible.

To protect the equipment and to avoid decomposition of the oil at the instant of breakdown, a resistance limiting the breakdown current may be inserted in series with the test cell.

The primary circuit of the high-voltage transformer is fitted with a circuit-breaker operated by the current flowing following the breakdown of the sample, and with a delay not more than 0.02 s. The circuit-breaker is fitted with a no-voltage release coil to protect the equipment.

10.3 Voltage regulation

Voltage regulation may be ensured by one of the following methods:

- a) Variable-ratio auto-transformer;
- b) Resistance type voltage divider;
- c) Generator-field regulation;
- d) Induction regulator.

Preference is given to an automatic system for increasing the voltage, because it is difficult to obtain manually a reasonably uniform rate of voltage rise as a function of time.

10.4 Measurement of test voltage

For the purpose of this document, the magnitude of the test voltage is defined as its peak value divided by $\sqrt{2}$.

This voltage may be measured by means of a peak-voltmeter or by means of another type of voltmeter connected to the input or output side of the testing transformer, or to a special winding provided thereon; the instrument then used must be calibrated against a sphere-gap up to the full voltage which it is desired to measure.

The ratio of the voltage derived from the sphere-gap to the voltage indicated on the auxiliary instrument may be dependent upon the presence of the test cell or of the sphere-gap and it is important that the test cell (or an equivalent load) should be in the circuit during the calibration.

The sphere-gap may be disconnected during the actual test if its presence is known to have a negligible influence on the voltage ratio.

11. Results

The report shows, expressed in kilovolts, the breakdown voltages obtained during all the tests which have been carried out, and the average of the results.

The report shall mention the type of electrodes used, the frequency of the test voltage and the oil temperature.

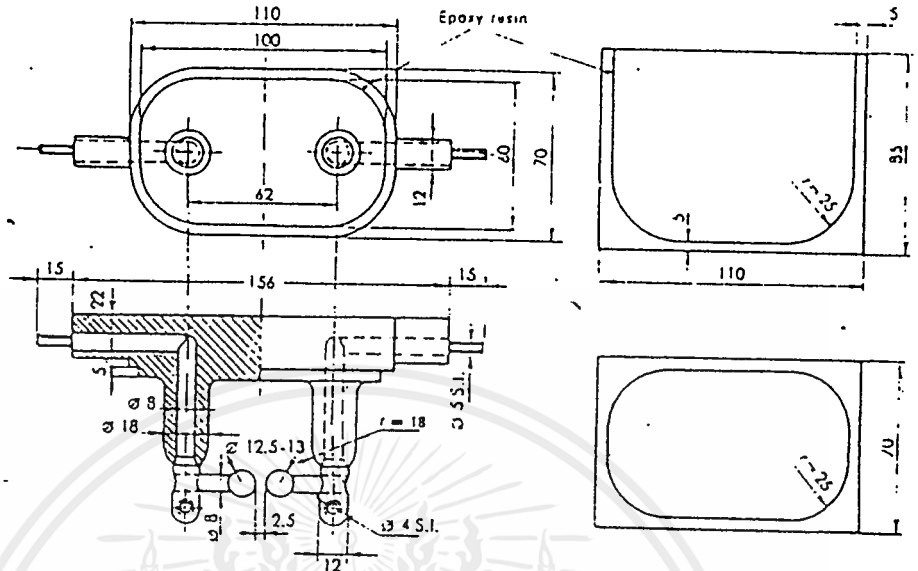


FIG. 1

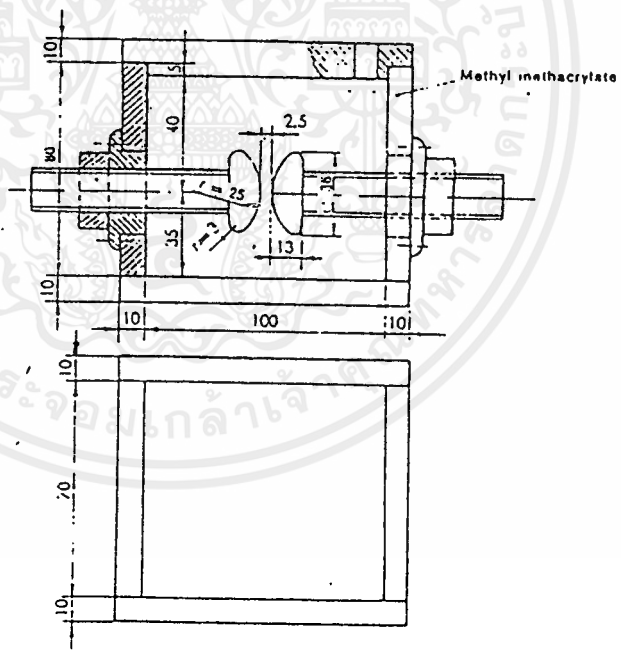


FIG. 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Protect yourself and others. Read and understand this booklet. Keep it available for reference at all times. You can get additional copies through your supplier.

Warning

Use only liquid nitrogen or liquid argon in Liquid Nitrogen Refrigerators and Dewars. Do not use liquid air or liquid oxygen, both of which may present a combustion hazard with some materials used in the construction of these units, or materials stored in them.

Introduction

The safe handling and use of liquid nitrogen in cryogenic refrigerators and dewar flasks is largely a matter of knowing the potential hazards and using common-sense procedures based on that knowledge. There are two important properties of liquid nitrogen that present potential hazards:

1. It is extremely cold. At atmospheric pressure, liquid nitrogen boils at -320°F (-196°C).
2. Very small amounts of liquid vaporize into large amounts of gas. One liter of liquid nitrogen becomes 24.6 cu.ft. (0.7 m^3) of gas.

The safety precautions in this booklet must be followed to avoid potential injury or damage which could result from these two characteristics. Do not attempt to handle liquid nitrogen until you read and fully understand the potential hazards, their consequences, and the related safety precautions. Keep this booklet handy for ready reference and review.

Note: Because argon is an inert gas whose physical properties are very similar to those of nitrogen, the precautions and safe practices for the handling and use of liquid argon are the same as those for liquid nitrogen.

Handling Liquid Nitrogen

Contact of liquid nitrogen or cold gas with the skin or eyes may cause serious freezing (frostbite) injury.

Handle liquid nitrogen carefully. The extremely low temperature can freeze human flesh very rapidly. When spilled on a surface the liquid tends to cover it completely and intimately, cooling a large area. The gas issuing from the liquid is also extremely cold. Delicate tissue, such as that of the eyes, can be damaged by an exposure to the cold gas which would be too brief to affect the skin of the hands or face.

Never allow any unprotected part of your body to touch objects cooled by liquid nitrogen. Such objects may stick fast to the skin and tear the flesh when you attempt to free yourself. Use tongs to withdraw objects immersed in the liquid, and handle the object carefully.

Wear protective clothing. Protect your eyes with a face shield or safety goggles (safety glasses without side shields do not give adequate protection). Always wear gloves when handling anything that is, or may have been, in immediate contact with liquid nitrogen. Insulated gloves are recommended, but heavy leather gloves may also be used. The gloves should fit loosely, so that they can be thrown off quickly if liquid should splash into them. When handling liquid in open containers, it is advisable to wear high-top shoes. Trousers (which should be cuffless if possible) should be worn outside the shoes.

Use only containers designed for low-temperature liquids.

Cryogenic containers are specifically designed and made of materials that can withstand the rapid changes and extreme temperature differences encountered in working with liquid nitrogen. Even these special containers should be filled SLOWLY to minimize the internal stresses that occur when any material is cooled. Excessive internal stresses can damage the container.

Do not cover or plug the entrance opening of any liquid nitrogen refrigerator or dewar. Do not use any stopper or other device that would interfere with venting of gas. These cryogenic liquid containers are generally designed to operate with little or no internal pressure. Inadequate venting can result in excessive gas pressure which could damage or burst the container. Use only the loose-fitting necktube core supplied or one of the approved accessories for closing the necktube. Check the unit periodically to be sure that venting is not restricted by accumulated ice or frost.

Use proper transfer equipment. Use a phase separator or special filling funnel to prevent splashing and spilling when transferring liquid nitrogen into or from a dewar or refrigerator. The top of the funnel should be partly covered to reduce splashing. Use only small, easily handled dewars for pouring liquid. For the larger, heavier containers, use a cryogenic liquid withdrawal device to transfer liquid from one container to another. Be sure to follow instructions supplied with the withdrawal device. When liquid cylinders or other large storage containers are used for filling, follow the instructions supplied with those units and their accessories.

Filling above the bottom of the necktube (or specified maximum level) can result in overflow and spillage of liquid when the necktube core or cover is placed in the opening.

Never use flammable tubes or dipsticks. When a warm tube is inserted into liquid nitrogen, liquid will spout from the top of the tube due to gasification and rapid expansion of liquid inside the tube. Wooden or solid metal dipsticks are recommended; avoid using plastics that may become very brittle at cryogenic temperatures.

Nitrogen Gas can cause suffocation without warning.

Store and use liquid nitrogen only in a well-ventilated place. As the liquid evaporates, the resulting gas tends to displace the normal air from the area. In closed areas, excessive amounts of nitrogen gas reduce the concentration of oxygen and can result in asphyxiation. Because nitrogen gas is colorless, odorless and tasteless, it can not be detected by the human senses and will be breathed as if it were air. Breathing an atmosphere that contains less than 18 percent oxygen can cause dizziness and quickly result in unconsciousness and death.

Note: The cloudy vapor that appears when liquid nitrogen is exposed to the air is condensed moisture; not the gas itself. The issuing gas is invisible.

Never dispose of liquid nitrogen in confined areas or places where others may enter. Disposal of liquid nitrogen should be done outdoors in a safe place. Pour the liquid slowly on gravel or bare earth where it can evaporate without causing damage. Do not pour the liquid on pavement.

First Aid Notice

If a person seems to become dizzy or loses consciousness while working with liquid nitrogen, move to a well-ventilated area immediately. If breathing has stopped, apply artificial respiration. If breathing is difficult, give oxygen. Call a physician. Keep warm and at rest.

If exposed to liquid or cold gas, restore tissue to normal body temperature (98.6°F) as rapidly as possible, followed by protection of the injured tissue from further damage and infection. Remove or loosen clothing that may constrict blood circulation to the frozen area. Call a physician. Rapid warming of the affected part is best achieved by using water at 108°F. Under no circumstance should the water be over 112°F, nor should the frozen part be rubbed either before or after rewarming. The patient should neither smoke, nor drink alcohol.

Handling Dewars & Refrigerators

Keep unit upright at all times, except when pouring liquid from dewars specifically designed for that purpose. Tipping the container or laying it on its side can cause spillage of liquid nitrogen. It may also damage the container and any materials stored in it.

Rough handling can cause serious damage to dewars and refrigerators. Dropping the container, allowing it to fall over on its side, or subjecting it to sharp impact or severe vibration can result in partial or complete loss of vacuum. To protect the vacuum insulation system, handle containers carefully. Do not "walk", roll or drag these units across a floor. Use a dolly or handcart when moving containers, especially the larger portable refrigerators. Large units are heavy enough to cause personal injury or damage to equipment if proper lifting and handling techniques are not used.

Do not attempt to move large stationary-type refrigerators unless they are completely empty.

When transporting a liquid nitrogen container, maintain adequate ventilation and protect the unit from damage. Do not place these units in closed vehicles where the nitrogen gas that is continuously vented from unit can accumulate. Prevent spillage of liquid and damage to unit by securing it in the upright position so that it can not be tipped over. Protect the unit from severe jolting and impact that could cause damage.

Keep the unit clean and dry. Do not store it in wet, dirty areas. Moisture, animal waste, chemicals, strong cleaning agents and other substances which could promote corrosion should be removed promptly. Use water or mild

detergent for cleaning and dry the surface thoroughly. Do not use strong alkaline or acid cleaners that could damage the finish and corrode the metal shell.

Protecting Refrigerator Contents

Materials stored in liquid nitrogen refrigerators are protected by the extremely low temperature of the liquid nitrogen or the gas that issues from the evaporating liquid nitrogen. When all of the liquid nitrogen has evaporated, the temperature inside the unit will rise slowly to ambient. The rate at which the liquid nitrogen will evaporate depends upon the pattern of container use and the age and condition of the container. Evaporation increases as insulation efficiency deteriorates with age and rough handling. Opening and closing to insert and remove materials and moving the unit will increase the evaporation rate.

To protect valuable material stored in a liquid nitrogen refrigerator:

Check the liquid level in unit frequently, at least once each week. Failure to properly monitor liquid nitrogen level can permit undetected loss of refrigeration with resulting damage to the material stored in the unit.

Refill the refrigerator as required to maintain protection of the stored materials. Always be sure that there is enough liquid nitrogen in the unit to last until the next scheduled checkup. When the contents must be kept at liquid temperature, keep the liquid level high enough to cover the materials. Where gas-phase temperatures provide adequate protection, the liquid level can be lower.

If vacuum loss is evident or suspected, transfer the materials stored in the unit to another refrigerator as soon as possible and remove the unit from service.

Reference Publications

For more detailed information concerning safety precautions and safe practices to be observed when handling nitrogen refer to CGA publication P-12 *Safe Handling of Cryogenic Liquids*, available from the Compressed Gas Association Inc., 1235 Jefferson Davis Highway, Arlington, VA. 22202.

ภาคผนวก ค.

การใช้งานชุดกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ให้ปฏิบัติตามขั้นตอนดังนี้

- 1) เปิดสวิตช์ no-fuse breaker (NFB1) และ (NFB2) หลอดไฟสีเขียวติดแสดงว่าแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับเริ่มทำงาน
- 2) กดปุ่ม (PREPARE) สัญญาณเตือนจะดังขึ้น พร้อมกับหลอดไฟสีส้มติด
- 3) กดปุ่ม (ON) หลอดไฟสีแดงติด และหลอดไฟสีเขียวดับ ถ้าตำแหน่งของตัวปรับแรงดันทั้งสองไม่อยู่ที่ตำแหน่งต่ำสุดหลอดไฟสีเขียวจะติด และ magnet contactor ไม่ทำงาน
- 4) หมุนสวิตช์ VS ไปทางด้าน input voltage measuring
- 5) หมุนตัวปรับโวลต์เตจไปทางขวา แรงดันกระแสตรงจะเกิดขึ้นที่ขั้วของเครื่องกำเนิดแรงดันกระแสตรงซึ่งสามารถอ่านค่าได้จากมิเตอร์ดังกล่าวมาแล้ว เมื่อระดับโวลต์เตจมีระดับใกล้เคียงกับ แรงดันที่ต้องการทดสอบ ให้ใช้ตัวปรับความดันแบบละเอียด ซึ่งสามารถหาค่าได้ 5 เปอร์เซ็นต์ของพิกัดโวลต์เตจ
- 6) เมื่อการทดสอบสิ้นสุดลง หมุนตัวปรับโวลต์เตจทั้งสอง ไปที่ตำแหน่งต่ำสุด กดปุ่ม (OFF) หลอดไฟสีแดงดับและหลอดไฟสีเขียวติด
- 7) ทำการ discharge ประจุที่หลงเหลืออยู่โดยใช้ discharge resistor (1 เมกกะโอห์ม) และที่ corona shield

การใช้งานกรณีฉุกเฉิน

- 1) เมื่อเกิดอุบัติเหตุขึ้นในขณะที่ทดสอบ เราสามารถตัดแหล่งจ่ายไฟได้โดยการกดสวิตช์ (EMERGENCY) หลังจากนั้นทำการดีชาร์จ ด้วยดีชาร์จรีลีสเตอร์ และ หมุนตัวปรับโวลต์เตจแบบหยาบและแบบละเอียดไปที่ตำแหน่งต่ำสุด

หมายเหตุ การกดปุ่ม (OFF) ในกรณีฉุกเฉิน ไม่สามารถตัดแหล่งจ่ายไฟได้ โดยไม่หมุนตัวปรับโวลต์เตจแบบหยาบ และแบบละเอียดไปที่ตำแหน่งต่ำสุด

- 2) การ reset เมื่อแหล่งจ่ายไฟถูกตัดโดยการกดปุ่ม (EMERGENCY) เสียงสัญญาณจะดังขึ้น และหลอดไฟ emergency stop ติด การ reset สามารถทำได้โดยการกดปุ่ม (alarm stop) และ (RESET)

ภาคผนวก ง.

การใช้งานชุดกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ให้ปฏิบัติตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) จัดอุปกรณ์การทดลองให้เรียบร้อยและต้องต่อกราวด์เสมอ
- 2) ปิดประตูห้องทดลอง
- 3) จ่ายแรงดันกระแสสลับ 220 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ เข้าสู่ควบคุม
- 4) เปิด power on ไฟสีเหลืองติด
- 5) เปิด high voltage circuit braker ไฟสีแดงติด ถ้าไฟไม่ติดแสดงว่าเราไม่ได้ปรับแรงดันไปที่ศูนย์โวลต์ซึ่งซีโรอินเตอร์ลอคจะทำงาน ทำให้ไม่ครบวงจร
- 6) ปรับสเกลไปที่ low volt ก่อน
- 7) ค่อยๆ ปรับแรงดันที่ป้อนเข้าหม้อแปลงไฟแรงสูงทีละน้อย
- 8) ถ้าสเกลของมิเตอร์เลขหน้าปิดให้ปรับไปที่ high volt
- 9) ปรับแรงดันจนกระทั่งเกิดการเบรคความซึ่งทำให้ high volt circuit braker จะตัดไฟสีแดงดับ
- 10) อ่านแรงดันเบรคความได้จากมิเตอร์แล้ว จึงปรับแรงดันมาที่ศูนย์โวลต์ทุกครั้งหลังเสร็จจากการทดลอง
- 11) ปิด POWER SUPPLY ไฟสีเหลืองดับ ซึ่งสามารถเข้าไปปฏิบัติงานในห้องทดลองได้โดยปลอดภัย

ภาคผนวก จ

การวัดแรงดันสูงด้วยช่องว่างทรงกลม

ปฏิบัติตามมาตรฐาน IEC Publ.52

ตามมาตรฐานสากล IEC No.52 จะกำหนดค่าแรงดันเบรคความถี่ของอากาศระหว่างทรงกลมไว้ที่สภาวะมาตรฐานคือ ความดันอากาศ 760 มม.ปรอท และอุณหภูมิ 20 °ซ. ฉะนั้นแรงดันเบรคความถี่ที่วัดได้ที่ความดันใด อุณหภูมิใดเมื่อจะเทียบกับค่ามาตรฐานจะต้องแปลงค่าที่วัดได้ไปเป็นค่าที่สภาวะมาตรฐาน คือ

$$U_{bn} = \frac{U_b}{K_d}$$

$$K_d$$

เมื่อ U_{bn} เป็น ค่ามาตรฐาน คือภาวะมาตรฐานกราฟ
 U_b เป็น ค่าที่วัดได้ที่อุณหภูมิและความดันห้อง
 K_d เป็น ตัวประกอบแปลงความหนาแน่นของอากาศซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาแน่นสัมพัทธ์ของอากาศ ρ ที่กำหนดได้จากสมการ

$$\rho = \frac{P}{760} \cdot \frac{273+20}{273+t} = 0.386 \left(\frac{P}{273+t} \right)$$

โดย P เป็น ความดันของอากาศอ่านจากบาโรมิเตอร์เป็นมิลลิเมตรปรอท
 t เป็น อุณหภูมิของห้องในขณะที่วัดได้เป็นองศาเซลเซียส
 K_d จะเท่ากับ ρ เมื่อ ρ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.9 ถึง 1.05

ตารางผลการทดลอง

อิลคโตรดที่ใช้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 ซม.

สภาวะแวดล้อมขณะทำการทดลอง

ความดัน	760.76	มม.ปรอท
อุณหภูมิ	31	°ซ.
ความชื้น	76	%

ตัวแปลงผันความหนาแน่นของอากาศ K_d

$$p = 0.386 (760.73) = 0.9659$$

$$273+31$$

ดังนั้น $K_d = 0.9659$

ระยะแกป (ซม.)	แรงดันเบรคความค่าขอด U_b (kv) 6 ครั้ง						ค่าเฉลี่ย μ (kv)
	1	2	3	4	5	6	
1.0	29.7	29.7	30.4	29.7	31.1	31.1	30.28
1.2	35.4	36.1	35.4	36.8	35.4	36.9	35.96
1.4	41.0	41.0	39.6	41.0	39.6	41.0	40.53
1.5	42.4	43.8	42.4	42.4	43.8	43.8	43.10
1.6	45.3	45.9	45.9	46.7	45.9	45.3	45.83
1.8	51.6	52.3	51.6	50.9	50.9	50.9	51.37
2.0	56.6	55.2	56.6	56.6	55.2	55.2	55.90
2.2	60.8	60.8	60.8	60.8	60.8	60.8	60.80
2.4	67.2	67.2	66.5	65.0	76.2	66.5	66.93
2.6	72.1	72.1	70.7	70.7	72.1	70.7	71.32
2.8	75.7	75.0	75.4	76.4	76.4	76.4	76.02
3.0	80.6	80.6	79.9	79.2	79.2	79.2	79.90
3.5	92.6	93.3	93.3	92.6	93.3	94.8	93.32
4.0	106.1	106.1	104.7	104.7	106.1	104.7	105.40
4.5	117.4	115.9	118.8	117.4	117.4	118.8	117.62
5.0	130.1	128.1	130.1	128.7	130.1	130.1	129.63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ๕

วิธีใช้เครื่อง HOT AIR OVEN

- 1) เชื่อมปลั๊ก
- 2) ตั้งอุณหภูมิที่ต้องการโดยหมุนปุ่มปรับอัตโนมัติ
- 3) เปิด power switch จะเห็นหลอดไฟที่ power switch สว่างเช่นกัน และเมื่อถึงอุณหภูมิที่ต้องการ เครื่องจะยังคงอุณหภูมินั้นไว้ตลอดเวลา
- 4) เมื่อไม่ต้องการใช้เครื่องแล้วให้ปิด power switch ดึงปลั๊กออก แล้วหมุนปุ่มปรับอุณหภูมิไปที่ 0 องศาเซนเซียส เหมือนเดิม



กิตติกรรมประกาศ

ปริิถยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยความร่วมมือจากหลายๆฝ่าย ทางกลุ่มผู้จัดทำจึงใคร่ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำแนะนำทั้งทักษะ และทฤษฎี รวมทั้งเอกสารต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อปริิถยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ ผศ. วิสุทธี ฐิติรุ่งเรือง หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ และบรรดาคณาจารย์ของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ที่ได้ให้คำแนะนำพร้อมกับความช่วยเหลือทางด้านอุปกรณ์ในกระบวนการนี้

ขอขอบคุณ ร.ศ.ดร.นิพนธ์ สุขุม ที่ให้ความอนุเคราะห์ในเรื่องโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมความดันของภาชนะทดสอบ

ท้ายที่สุดขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ ที่ได้ให้ใช้ตู้บอลลาสเตริคเพื่อความสมบูรณ์ของกรรมวิธีการนี้

หนังสืออ้างอิง

1. International electrotechnical Commission (IEC) Publication 156, First edition, 1963 " Method for the Determination of The Electric Stength of Insulating Oils"
2. Amendments to IEC Publication 296 " Specification for New Insulating Oils for Transformers and Swithgear " First edition, 1969.
3. IEC Publication 52 "High-Voltage Measuremant by Means of Sphere Gaps. ",1960
4. E. Kuffel and M. Abdullah. " High-Voltage Engineering " Pergamon Press, 1970
5. M.S. Nuidu and V.N. Maller " SF₆ AND VACUUM INSULATION for HIGH VOLTAGE APPLICATIONS " Khanna Publishers,1977
6. ดร. สำราญ สิงห์สะอาด " วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง " ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
7. สมพงษ์ เลิศทรศน์ "กรรมวิธีการขุดแข็งเหล็กกล้าด้วยการแช่เย็น" เทคนิคเครื่องกลไฟฟ้าอุตสาหกรรม กันยายน 2520.
8. สมคิด เจริญวรณ์ ,สุพิชัย แซ่จิว " การทดลองไฟฟ้าแรงสูง " วิทยุยานยนต์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2528
9. จงรักษ์ บุญเส็ง " การเบรคความในถนนน้ำมันพืช " วิทยุยานยนต์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2530