



ปรากฏการณ์การเบรคตาวนในฉนวนของเหลว

Breakdown Phenominon in Liquid

นายบริบูรณ์ ม่วงอยู่ 29.1099

Mr. BORIBOON MOUNGYOO

นายวิโรจน์ วรรณะพาหุ 29.1188

Mr. WIROTE WONNAPARHOWN

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ จงรักษ์ บุญเลี้ยง วค.ม.

ADVISOR

Mr. CHONGRAG BOONSENG M.Eng.

วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2532

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	1
Abstract	2
บทที่ 1 บทนำ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีโดยทั่วไป	4
2.1. กลไกการเกิดเบรคควาร์นของฉนวนเหลว	4
2.1.1. จากสภาพแวดล้อมขณะทำการทดลอง	5
2.1.1.1. อุณหภูมิ	6
2.1.1.2. ผลทางความดัน	7
2.1.1.3. ระยะแกป	8
2.1.1.4. รูปคลื่นแรงดัน	10
2.1.1.5. วัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโตรด	11
2.1.1.6. พื้นที่ผิวของอิเล็กโตรด	15
2.1.1.7. ผลของสนามไฟฟ้าจากอิเล็กโตรดแบบต่างๆ	16
2.1.1.7.1. ลักษณะของอิเล็กโตรดที่ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ	16
2.1.1.7.2. ลักษณะของอิเล็กโตรดที่ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอชนิด1และ2	18
2.1.2. เนื่องจากในส่วนของฉนวนเหลว	22

2.1.2.1. ผลจากลักษณะโครงสร้างโมเลกุล 22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมเห็นแจ้งประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง 026978

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.1.2.2. จากโพรงและฟองก๊าซ	26
2.1.2.3. สิ่งเจือปนของแข็ง	30
2.2. คีลซาร์จบางส่วน	31
2.3. ผลของประจุค้างที่มีต่อแรงดันเบรคดาวน์ต่างขั้ว	32
2.3.1. เมื่อใช้ปลายแหลมขั้วบวกและแผ่นระนาบขั้วลบ	33
2.3.2. เมื่อใช้ปลายแหลมขั้วลบและแผ่นระนาบขั้วบวก	34
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	36
3.1. แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง	36
3.2. หน่วยควบคุมแรงดันไฟฟ้า	40
3.3. ชุดภาชนะทดสอบ	40
3.4. ชุดอุปกรณ์เครื่องมือวัด	41
3.5. การวัดระยะแยก	41
3.6. ระบบอิเล็กทรอนิกส์	41
3.6.1. อิเล็กทรอนิกส์แบบจุด	41
3.6.2. อิเล็กทรอนิกส์แบบจานกลม	41
3.7. วิธีการทดลอง	42
3.7.1. การเตรียมชุดภาชนะทดสอบ	42
3.7.2. การวัดแรงดันเบรคดาวน์ของฉนวนเหลว	42
บทที่ 4 ผลการทดลอง และ วิจารณ์	44
4.1. การทดสอบ	44
4.2. วิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นในขณะทดสอบ	95
4.3. วิเคราะห์ความผิดพลาดจากการทดลอง	96

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรูปผลการทดสอบ	99
เอกสารอ้างอิง	101
กิตติกรรมประกาศ	102
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก	104
ภาคผนวก ข	107
ภาคผนวก ค	110



หัวข้อปริญญานิพนธ์ : ปรากฏการณ์การเบรคดาวน์ในฉนวนเหลว
โดย : นายบริบูรณ์ ม่วงอยู่ 29.1099
: นายวิโรจน์ วรรณพะยอม 29.1188
อาจารย์ที่ปรึกษา : อ. จงรักษ์ บุญเลี้ยง
ระดับการศึกษา : วิศวกรรมศาสตรบัณฑิตทางวิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา : วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา : 2532

บทคัดย่อ .

ในปัจจุบันฉนวนเหลวประเภทน้ำมัน ยังคงใช้เป็นฉนวนในหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อป้องกันการดีสชาร์จ และ เป็นตัวระบายความร้อนในหม้อแปลง ดังนั้นการนำฉนวนเหลวมาใช้ จะต้องศึกษาปัจจัยของฉนวนเหลวก่อนที่จะนำไปใช้งาน ใน การศึกษาฉนวนเหลวเราจะสนใจในปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อแรงดันเบรคดาวน์ มีดังนี้ ระยะเวลาเก็บ, ความบริสุทธิ์ของของเหลว, อุณหภูมิ, ความดัน เป็นต้น

ในการวิจัยนี้ได้ทดสอบคุณสมบัติของฉนวนเหลวโดยทดสอบภายใต้เงื่อนไขของ สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ ใช้อิเล็กโตรดแบบปลายแหลม และอิเล็กโตรดแบบแผ่นราบ ทำจากทองเหลืองและปรอท การทดสอบทำเป็น 2 ขั้นตอน คือขั้นตอนหนึ่ง Negative needle ขั้นตอนสอง Positive needle ทั้งนี้เพื่อหาคุณลักษณะของน้ำมันฉนวน ภายใต้เงื่อนไขนี้

Thesis title : Breakdown Phenominon in Liquid.
Name : Mr. BORIBOON MOUNGYOO.
: Mr. WIROTE WONNAPARHOWN.
Thesis advisor : Mr. CHONGRAG BOONSENG.
Level of study : Bachelor of Engineering in
Electrical Engineering.
Department : Electrical Engineering.
Academic Year : 1989

Abstract.

Nowsaday, Liquid insulators have been in are in electric transformers in order to prevent discharge and heat ventilator in transformers. Therefore, in applying liquid insulators, we must study the meterial of insulator before putting into use. In studying liquid insulators, we must draw our attention to the cause which will effect the breakdown. In order to be able to specify the sorts of insulators to be used in suitable application and causes which will result to the breakdown pressure as follows: Gap, distance, Purity of liquid, Temperatur, Pressure etc.

In experimental research in this subject, the property of liquid insulators, by testing under the condition of inconstant electric feild. Sharps electrodes of sharp points and plane electrodes made from brass and mercury. The test consists of two stages. The first one is to employ negative needle, the second stage with positive needle. This is to find quantity of insulator oil under this condition.

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันนี้ระบบทางด้านไฟฟ้ากำลังจำเป็นต้องมีฉนวนเหลวอยู่
ร่วมด้วย โดยฉนวนเหลวจะถูกนำมาใช้ในการระบายความร้อน หรือ ดับอาร์
คทางไฟฟ้า แต่การนำฉนวนเหลวมาใช้ซึ่งามจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องรู้ถึงสมบัติ
ของฉนวนเหลว เพื่อจะได้กำหนดชนิดของฉนวนเหลวให้เหมาะสมกับงาน

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้รวบรวมเนื้อหาการทดลอง และ ข้อสรุป
จากการทดลองเกี่ยวกับฉนวนเหลว โดยแบ่งเนื้อหาทั่วไปดังนี้คือ ทฤษฎีโดย
ทั่วไป, อุปกรณ์และวิธีการทดลอง, ผลการทดลอง และ ผลสรุป

ซึ่งในส่วนของ การทดลองนั้น จะเป็นการทดลองภายใต้สนามไฟ
ฟ้าไม่สม่ำเสมอ สุดท้ายนี้หวังว่าหนังสือเล่มนี้คงจะเป็นประโยชน์สำหรับผู้ต้อง
การค้นคว้าต่อไป ถ้าหากมีข้อผิดพลาดประการใดผู้เขียนก็ขออภัย ณ. ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

บทที่ 2

ทฤษฎีโดยทั่วไป

2.1. กลไกการเกิดเบรคดาว์นของฉนวนเหลว

ถ้าหากจะเปรียบเทียบถึงข้อดีของฉนวนเหลวโดยหลักการแล้ว ฉนวนเหลวจะมีคุณสมบัติที่ดีกว่าฉนวนของแข็ง และฉนวนก๊าซ ซึ่งสามารถสรุปถึงข้อดีของฉนวนเหลวได้ดังต่อไปนี้

1. ฉนวนเหลวมีคุณสมบัติที่ดีกว่าฉนวนก๊าซ คือ มีความหนาแน่นสูงกว่าก๊าซย่อมจะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าก๊าซ
2. ฉนวนเหลวมีคุณสมบัติที่ดีกว่าฉนวนแข็งคือ ฉนวนเหลวจะแทรกซึมเข้าในช่องว่างได้ง่ายกว่า
3. ฉนวนเหลวสามารถกลับคืนสู่สภาพการเป็นฉนวนเองได้หลังจากที่สสารจผ่านพ้นไปแล้ว
4. ฉนวนเหลวสามารถถ่ายเทระบายความร้อนได้ดี

แม้ว่าฉนวนเหลวจะมีคุณสมบัติที่ดีตามหลักการแล้ว แต่โดยความเป็นจริงในเชิงการค้าแล้ว ฉนวนเหลวจะไม่มีคามบริสุทธิ์ ดังนั้นค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวจึงมีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับฉนวนของแข็ง และฉนวนก๊าซ จากที่กล่าวมาดังนี้จึง เป็นสาเหตุที่ทำให้ฉนวนเหลวไม่ได้รับความนิยมใช้เท่าที่ควร

แต่ถ้าหากต้องการนำฉนวนเหลวมาใช้งาน สิ่งที่เราจะต้องพิจารณาคือ

1. ความถ่วงจำเพาะของของเหลว
2. การจุดติดไฟ
3. ความหนืดของของเหลว
4. ความเป็นกรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. แพลตฟอร์มพลังงานสูญเปล่า ซึ่งจะเป็นตัวชี้ให้ทราบว่า จะเกิดพลังงานสูญเปล่าน้อยเพียงใด

ส่วนในเนื้อหาต่อไปจะกล่าวถึงกลไกการเกิดเบรคคาวน์ในฉนวนเหลว ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ตามการพิจารณาผลกระทบต่อการเบรคคาวน์ในฉนวนเหลว คือ

2.1.1. จากสภาพแวดล้อมขณะทำการทดลอง

2.1.1.1. อุณหภูมิ

2.1.1.2. ความดัน

2.1.1.3. ระยะแก๊ป

2.1.1.4. รูปคลื่นแรงดัน

2.1.1.5. วัสดุที่ใช้ทำอิเลคโตรด

2.1.1.6. พื้นที่ผิวของอิเลคโตรด

2.1.1.7. ผลของสนามไฟฟ้าจากอิเลคโตรดแบบต่างๆ

2.1.2. เนื่องจากในส่วนของฉนวนเหลว

2.1.2.1. ผลจากลักษณะโครงสร้างโมเลกุล

2.1.2.2. จากโพรง และฟองก๊าซ

2.1.2.3. สิ่งเจือปนของแข็ง

รายละเอียดจากหัวข้อต่างๆ ข้างต้นจะได้กล่าวเป็นลำดับดังต่อไปนี้

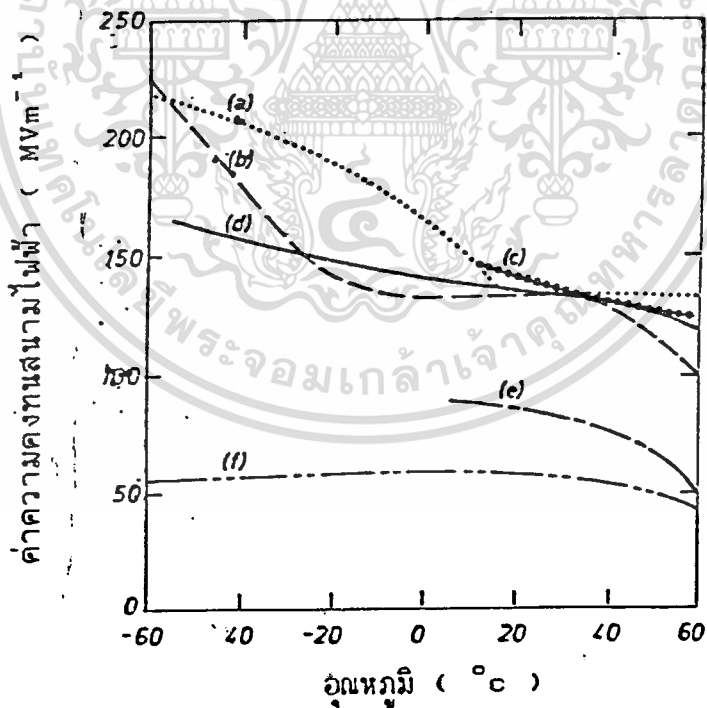
ไปนี้

2.1.1. จากสภาพแวดล้อมขณะทำการทดลอง

2.1.1.1. อุณหภูมิ

ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิใกล้กับจุดเดือด รูปที่ 2.1 เป็นการแสดงค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากับอุณหภูมิของ n - hexane ในรูปที่ 2.1 เส้นกราฟ a และ b ได้ป้อนแรงดันพลัสส์ ส่วนกราฟ b ได้ป้อนแรงดันกระแสตรง

Lewis ได้แยกโครงสร้างของฉนวนเหลวออกเป็นโครงสร้างโมเลกุลและความหนาแน่น ซึ่งมีอิทธิพลสำคัญต่อค่าความคงทน การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะมีผลต่อการสั่นสะเทือนและการหมุนของโมเลกุลซึ่งจะมีผลทำให้ความคงทนของฉนวนเหลวมียุ่ค่าต่ำลง



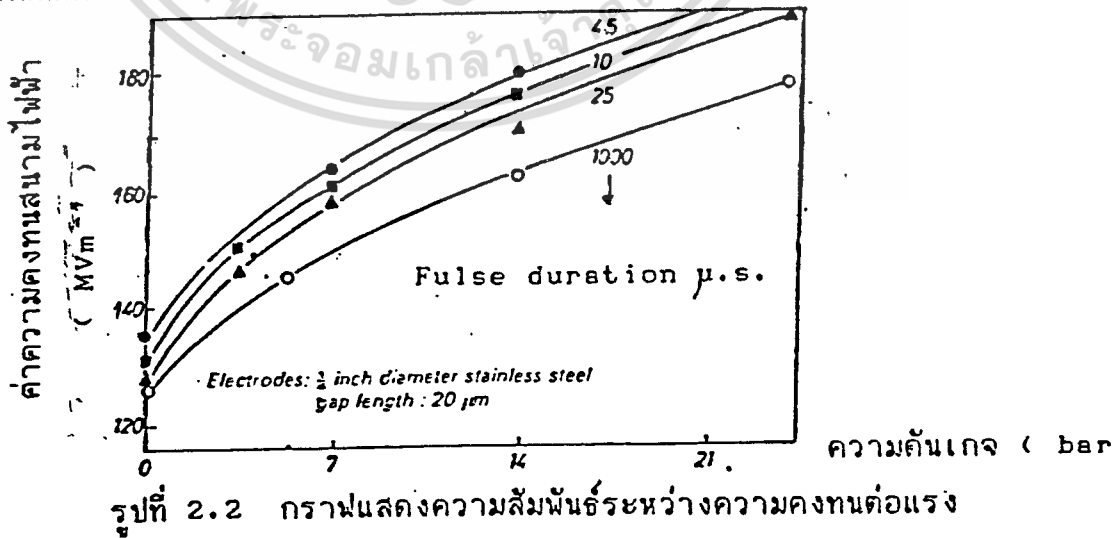
รูปที่ 2.1 แสดงค่าความคงทนกับอุณหภูมิของ n - hexane

อุณหภูมิของฉนวนเหลว cryogenic สามารถเปลี่ยนแปลงโดยการควบคุมความดัน และ ส่วนใหญ่การวัดอุณหภูมิจะวัดใกล้จุดเดือด ยกเว้นกรณีของฮีเลียม การศึกษาการเบรคดาว์นของฉนวนเหลวเนื่องจากอุณหภูมิจะต้องศึกษา ลักษณะโครงสร้างของฉนวนเหลวด้วย

2.1.1.2. ผลทางความดัน

Kao และ Higham เป็นคนเริ่มต้นศึกษาผลของความดันที่มีต่อความคงทนในฉนวนเหลวชนิดต่างๆ ฉนวนเหลวที่ศึกษาได้แก่ คาร์บอนเตตระคลอไรด์, n - heptane, n - decane, เบนเซน, โทลีน, คลอโรเบนเซน, เมทิลแอลกอฮอล์ และ เมทิลอีเทอร์ ซึ่งฉนวนเหลวทั้งหมดนี้ได้แสดงผลของความดันกับความคงทน ดังรูปที่ 2.2 จะเห็นว่าความคงทนจะเพิ่มขึ้นขณะที่ความดันเพิ่มโดยการป้อนแรงดันพัลส์ ในช่วง 1 μ s. ถึง 1 ms. ผลที่เกิดขึ้นเป็นการเบรคดาว์นของแต่ละฉนวนเหลว

Sletten และ Lewis ได้พบว่าความคงทนต่อแรงดันตีซ้ำของ n - hexane จะลดลงเมื่อความดันลดลงต่ำกว่าความดันบรรยากาศ แต่ผลของความดันที่มีต่อความคงทนยังขึ้นกับเทคนิคในการทดลองอีกด้วย



ดันไฟฟ้ากับความดันของ n - hexane

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.3. ระยะแกป

ระยะแกปนั้นมีผลต่อค่าของแรงดันเบรคดาวน์ คือ ถ้าหากระยะแกปมากขึ้น ค่าแรงดันเบรคดาวน์จะมีค่ามากขึ้น และระยะแกปน้อย ค่าแรงดันเบรคดาวน์จะมีค่าน้อยลง สิ่งที่เกิดขึ้นเหล่านี้สามารถอธิบายได้ว่าในระยะแกปที่มากขึ้นอิเล็กตรอน และไอออนบวกจะต้องเดินทางมาก โอกาสการชนกับโมเลกุลของของเหลวก็จะมากขึ้น ดังนั้นการที่จะเกิดเบรคดาวน์ได้นั้นจะต้องเพิ่มแรงดันมากขึ้น ส่วนในกรณีระยะแกปที่น้อยลง อิเล็กตรอนและไอออนบวกจะเดินทางสั้นลงโอกาสการชนกับโมเลกุลของของเหลวจะมีน้อย ดังนั้นค่าแรงดันเบรคดาวน์จะมีค่าน้อยลง ในรูปที่ 2.3 แสดงกราฟของค่าแรงดันเบรคดาวน์ที่ระยะแกปต่างๆ ในฉนวนเหลวอาร์กอน จากรูปจะเห็นว่าในระยะแกปที่มากขึ้น ค่าแรงดันจะมีค่ามากขึ้น และในรูปที่ 2.4 แสดงกราฟของค่าความคงทนสนามไฟฟ้ากับระยะแกปของพาราฟิน จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อระยะแกปมากขึ้นแล้ว ค่าความคงทนสนามไฟฟ้าจะมีค่าต่ำลงและเริ่มคงที่

การหาความสัมพันธ์ของระยะแกป (d) และแรงดันเบรคดาวน์ (U_b) ถูกเสนอโดย M.S. NAINN และ V.KAMARAJU สามารถเขียนได้ดังนี้

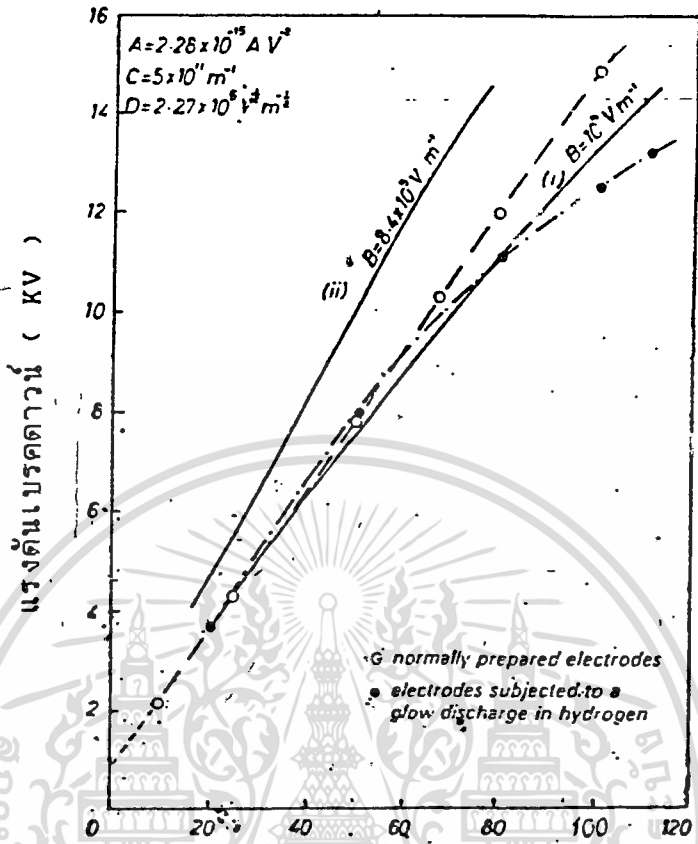
$$U_b = k \cdot d^n$$

โดยที่

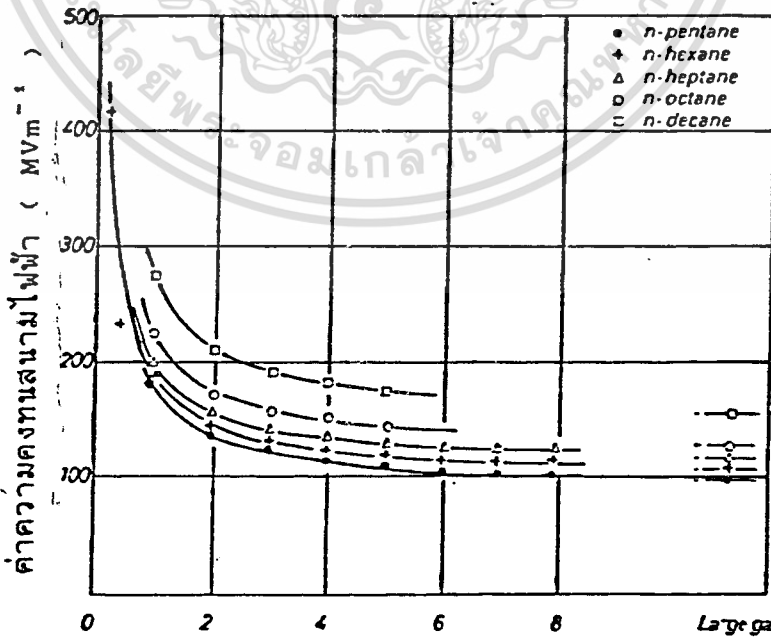
k : ค่าคงที่

n : เป็นค่าคงที่ที่น้อยกว่า 1

(หมายเหตุ การประมาณโดยวิธีนี้มีข้อผิดพลาดมาก เมื่อระยะแกปมากขึ้น)



รูปที่ 2.3 แสดงค่าแรงดันเบรคดาวน์ กับ ระยะแกป ตามทฤษฎี เมื่อเปรียบเทียบกับ การวัดในฉนวนเหลวอาร์กอน



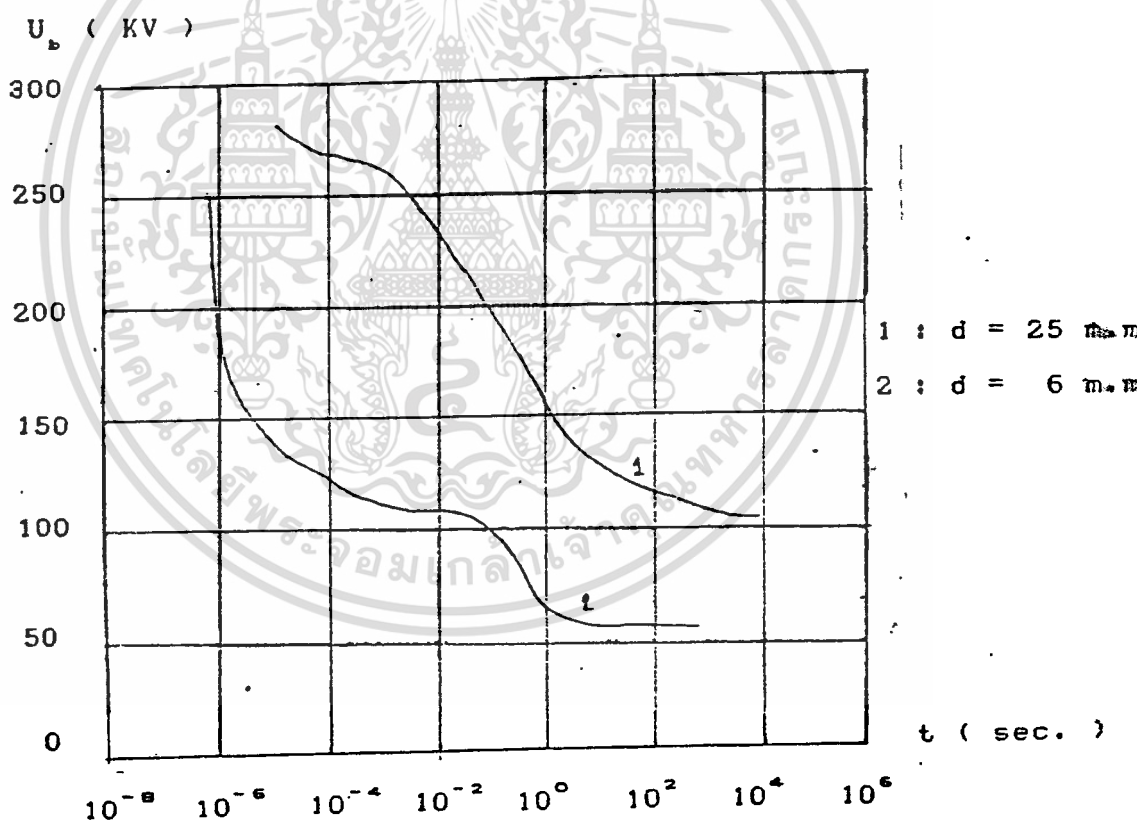
รูปที่ 2.4. แสดงค่าความคงทน กับ ระยะแกป ของ พาราฟิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.4. รูปคลื่นแรงดัน

ค่าแรงดันเบรคดาวน์ของฉนวนเหลวขึ้นอยู่กับรูปคลื่นแรงดันที่ป้อน และช่วงเวลาของการป้อนหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าที่คงมีอยู่ ค่าความคงทนของฉนวนเหลวต่อแรงดันคงตัว (dc และ ac) จะมีค่าต่ำกว่าค่าของแรงดันอิมพัลส์ดังในรูปที่ 2.5. ปรากฏการณ์เช่นนี้อธิบายได้ด้วยหลักการของเวลาล่าช้าของการเกิดเบรคดาวน์



รูปที่ 2.5. เส้นกราฟแรงดัน กับ เวลาของน้ำมันหม้อแปลงใน

สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.5. วัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรด

เหตุที่ว่าวัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรดมีผลต่อการเบรคดาว์น ก็เพราะว่า ในการเบรคดาว์นเกิดจากการที่อิเล็กโทรดที่ขั้วคาโธดปลดปล่อย อิเล็กตรอนออกมาชนโมเลกุลของของเหลวแตกตัวเป็นไอออนแล้วเกิดการเบรคดาว์นในที่สุด

จากการทดสอบของ Maksiejewski และ Tropper (1954) พบว่าค่าความคงทนจะเพิ่มขึ้นเมื่อเปลี่ยนอิเล็กโทรดดังนี้ตามลำดับ



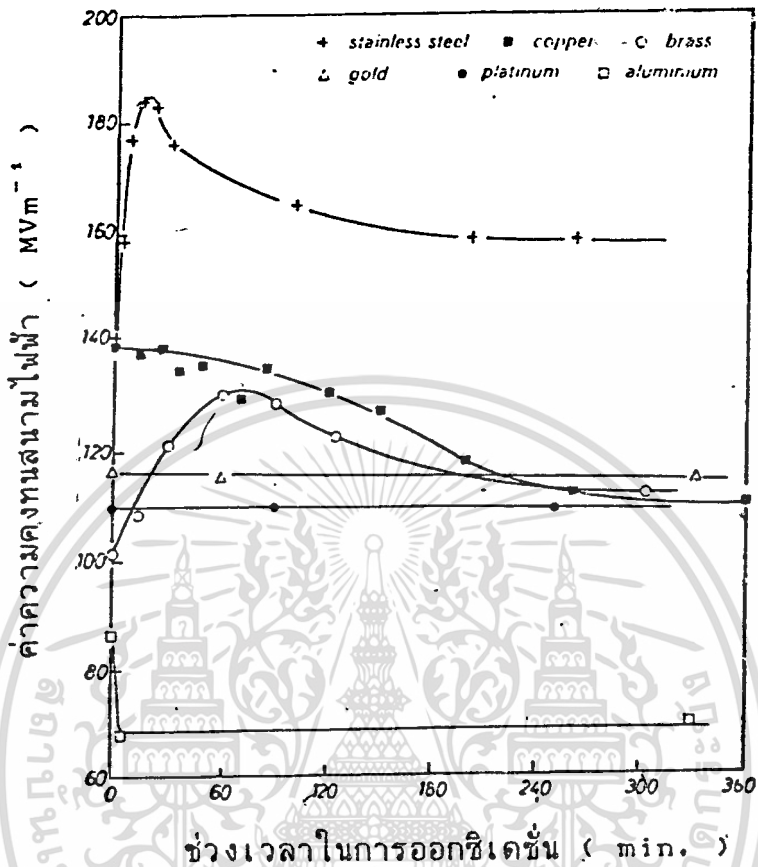
ในตาราง 2.1. แสดงค่าความคงทนสนามไฟฟ้าของ cryogenic liquid กับการเปลี่ยนอิเล็กโทรดแบบต่างๆ

รูปที่ 2.6. แสดงค่าความคงทนสนามไฟฟ้าของอาร์กอนภายใต้การป้อนแรงดันกระแสตรงกับการเปลี่ยนแปลงของเวลาในการออกซิเดชัน ซึ่งจากกราฟใช้อิเล็กโทรดเป็นแบบ เหล็ก, ทองแดง, ทองเหลือง, ทอง, พลาสติกนัม และอลูมิเนียม จะเห็นว่าค่าความคงทนสนามไฟฟ้าของการใช้อิเล็กโทรดเป็นเหล็กจะมีค่ามากที่สุด โดยที่การใช้อิเล็กโทรดเป็นพลาสติกนัม และทอง จะได้ค่าความคงทนสนามไฟฟ้าคงที่ ที่ระยะเวลาการเกิดออกซิเดชันต่างๆ แสดงว่า พลาสติกนัมและทองมีการเกิดออกซิเดชันน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นที่นำมาทดลอง

(ตารางที่ 2.1. อยู่หน้าถัดไป)

Electrodes	Reference	Electric strength [†] (MVm ⁻¹)					
		Helium	Hydrogen	Nitrogen	Argon	Oxygen Methane	
Stainless steel	(1)	-	-	100	100	104	-
	(2)	-	-	180	140	238	-
	(3)	105	-	-	-	-	-
	(4)	40	134 (60Hz)	80.5(60Hz)	-	-	-
	(5)	70	-	-	-	-	-
	(6)	70	-	-	-	-	-
	(7)	-	-	-	190(1.5μs pulse)	-	-
	(8)	-	-	-	-	-	153
	(9)	-	-	146	-	-	-
	(2)	-	-	162	101	144	-
Brass	(8)	-	-	-	-	-	136
	(9)	-	-	83	-	-	-
	(10)	-	-	70 (50Hz)	-	-	-
Copper	(2)	-	-	-	140	181	-
	(8)	-	-	-	-	-	147
Gold	(10)	-	-	104	-	-	-
	(2)	-	-	150	116	124	-
Platinum	(7)	-	-	-	102	-	-
	(1)	-	-	93	86	93	-
Aluminium	(2)	-	-	224	110	200	-
	(7)	-	-	-	160(10μs pulse)	-	-
	(8)	-	-	-	-	-	100
Tungsten	(9)	-	-	114	-	-	-
	(11)	72	-	-	-	-	-
	(7)	160(7.14K)	-	-	-	-	-
	(8)	130(4.2K)	-	-	-	-	-

ตารางที่ 2.1. แสดงค่าความคงทนสนามไฟฟ้า ของ ฉนวนเหลวประเภท cryogenic เมื่อใช้อิเล็กโทรดแบบต่างๆ

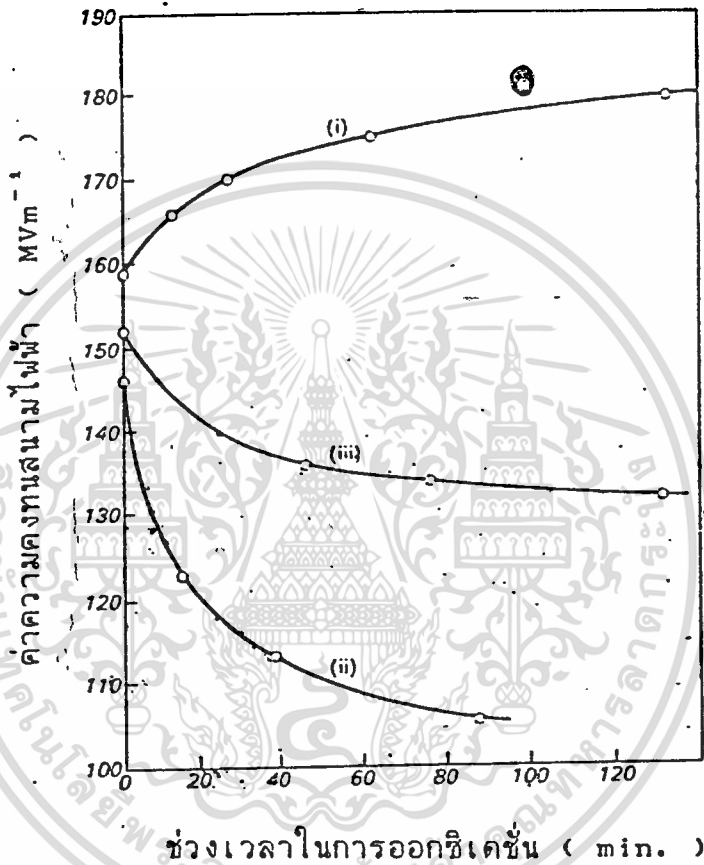


รูปที่ 2.6. แสดงค่าความคงทนสนามไฟฟ้า ของฉนวนเหลวประเภท อาร์กอน กับ เวลาในการออกซิเดชันของอิเล็กโตรด

จากรูปที่ 2.6. นั้นเป็นการแสดงผลของอิเล็กโตรดที่ทำมาจากวัสดุชนิดต่างๆ โดยที่ไม่ได้แยกส่วนของคาโธด และแอโนด มาพิจารณาตามกรณีต่างๆ ในรูปที่ 2.7. นี้จะพิจารณาเงื่อนไขจากคาโธด และแอโนด ในกรณีต่างๆ ด้วย

โดยจากรูปที่ 2.7 กราฟ (i) แสดงค่าความคงทน โดยปล่อยให้คาโธดที่เป็นเหล็กเกิดออกซิเดชันตามเวลาต่างๆ และควบคุมแอโนดที่เป็นเหล็กเหมือนกันไว้เป็น "zero" ออกซิเดชัน, กราฟ (ii) แสดงค่าความคงทนใช้คาโธดเป็นทอง และแอโนดเป็นเหล็ก โดยปล่อยให้เกิดออกซิเดชันไปตามเวลา และกราฟ (iii) ใช้คาโธดเป็นเหล็กที่ทำการออกซิเดชันมาแล้ว 24 ชั่วโมงและแอโนดปล่อยให้เกิดออกซิเดชันตามเวลา ผลจากการควบคุมลักษณะ

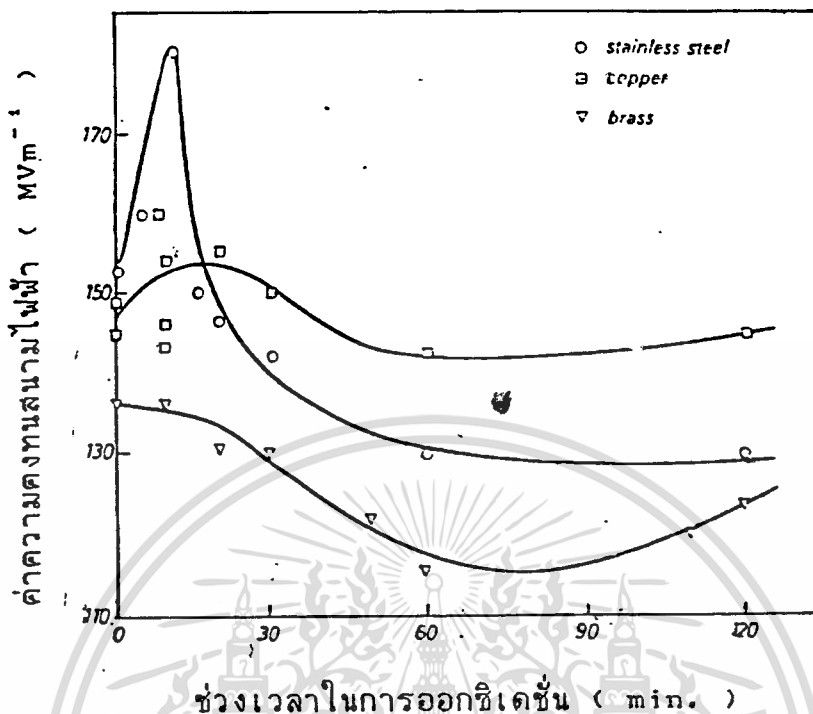
ของวัสดุที่ใช้ และเงื่อนไขการเกิดออกซิเดชันที่ชั่วคาใจด และอาโนด จะเห็นว่าค่าความคงทนจะเปลี่ยนไป แสดงว่าลักษณะของวัสดุที่คาใจดและอาโนดแบบต่างๆ ก็จะทำให้เงื่อนไขการเบรคดาวน์เปลี่ยนไป



รูปที่ 2.7. แสดงค่าความคงทนต่อสนามไฟฟ้าเมื่อกำหนดเงื่อนไขที่ คาใจด และ อาโนด

ส่วนในรูปที่ 2.8. แสดงค่าความคงทนของอิเล็กโตรดชนิดเหล็ก, ทองแดง และทองเหลืองโดยปล่อยให้ออกซิเดชันที่เวลาต่างๆ และฉนวนเหลวที่ใช้เป็นฉนวนเหลวประเภท methane

(รูปที่ 2.8. อยู่หน้าถัดไป)



ช่วงเวลาในการออกซิเดชัน (min.)

รูปที่ 2.8. แสดงค่าความคงทนต่อสนามไฟฟ้า กับ ช่วงเวลาในการออกซิเดชัน ของฉนวนเหลว methane

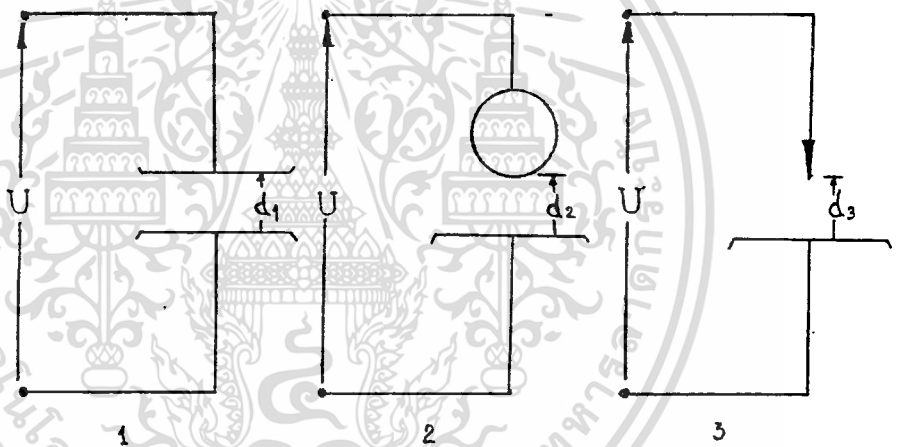
2.1.1.6. พื้นที่ผิวของอิเล็กโตรด

จากการทดลองดูผลของพื้นที่ผิวของอิเล็กโตรดต่อค่าแรงดันเบรคดาวน์ในฉนวนเหลว n-hexane โดย Sharbaugh พบว่าถ้าหากพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นค่าความคงทนสนามไฟฟ้าจะลดลง เมื่อพื้นที่ผิวของอิเล็กโตรดลดลงประมาณ 50% ค่าความคงทนสนามไฟฟ้าจะลดลงประมาณ 20% ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ จากเหตุการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่า ในขณะที่เกิดการเบรคดาวน์จะเกิดประกายไฟ และเกิดการสึกกร่อนมีรูพรุนที่ผิวของอิเล็กโตรด การเบรคดาวน์ครั้งต่อไปจะไม่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งเดิมแต่จะเกิดที่ตำแหน่งใหม่บนพื้นผิว ถ้าอิเล็กโตรดมีพื้นที่ผิวมากโอกาสที่จะเกิดความไม่เรียบหรือมีรูพรุนจะมียมาก แต่พื้นที่ผิวส่วนที่เรียบก็จะมากเช่นเดียวกัน ดังนั้นโอกาสที่เกิดเบรคดาวน์ครั้งต่อไปจะเกิดง่ายกว่าอิเล็กโตรดที่มีพื้นผิวน้อย

2.1.1.7. ผลของสนามไฟฟ้าจากอิเล็กโตรดแบบต่างๆ

อิเล็กโตรดที่ใช้ในการทดลองฉนวนเหนือนั้นโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทดังต่อไปนี้

- (1) ลักษณะของอิเล็กโตรดที่ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ
- (2) ลักษณะของอิเล็กโตรดที่ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย
- (3) ลักษณะของอิเล็กโตรดที่ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง



รูปที่ 2.9. อิเล็กโตรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆกัน

1. สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform field)
2. สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly nonuniform field)
3. สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (Highly nonuniform field)

2.1.1.7.1. ลักษณะของอิเล็กโตรดที่ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หมายถึง อิเล็กโตรดที่มีสนามไฟฟ้า

ทุกๆ จุดในช่องระหว่างอิเล็กโตรดเท่ากัน ซึ่งคำนวณได้จากความสัมพันธ์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{max} = E = U / d \quad (2.1.)$$

เมื่อ U คือ แรงดันที่ป้อนเข้าไประหว่างอิเล็กโทรด

d คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด

E คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า ณ จุดใด ๆ ระหว่างอิเล็กโทรด

E_{max} คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด

นั่นหมายความว่าเมื่อป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ เกิดเบรคดาวน์หรือสปาร์คทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรด (ซึ่งเท่ากับทุกจุด) ถึงค่าที่กำหนดค่าหนึ่งโดยประมาณและกระแสเพิ่มขึ้นอย่างมากในทันทีทันใด ค่ากระแสเบรคดาวน์นี้จะถูกจำกัดด้วยค่าอิมพีแดนซ์ของตัวจ่ายและวงจรภายนอกเท่านั้น ซึ่งก่อนจะเกิดเบรคดาวน์นั้นค่ากระแสจะวัดไม่ได้ดังในรูป 2.9. (แบบ 1) และค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันขณะจะเกิดเบรคดาวน์นี้ก็คือ ค่าความคงทนทางไฟฟ้า หรือความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของการฉนวนนั่นเอง ซึ่งคำนวณได้จาก

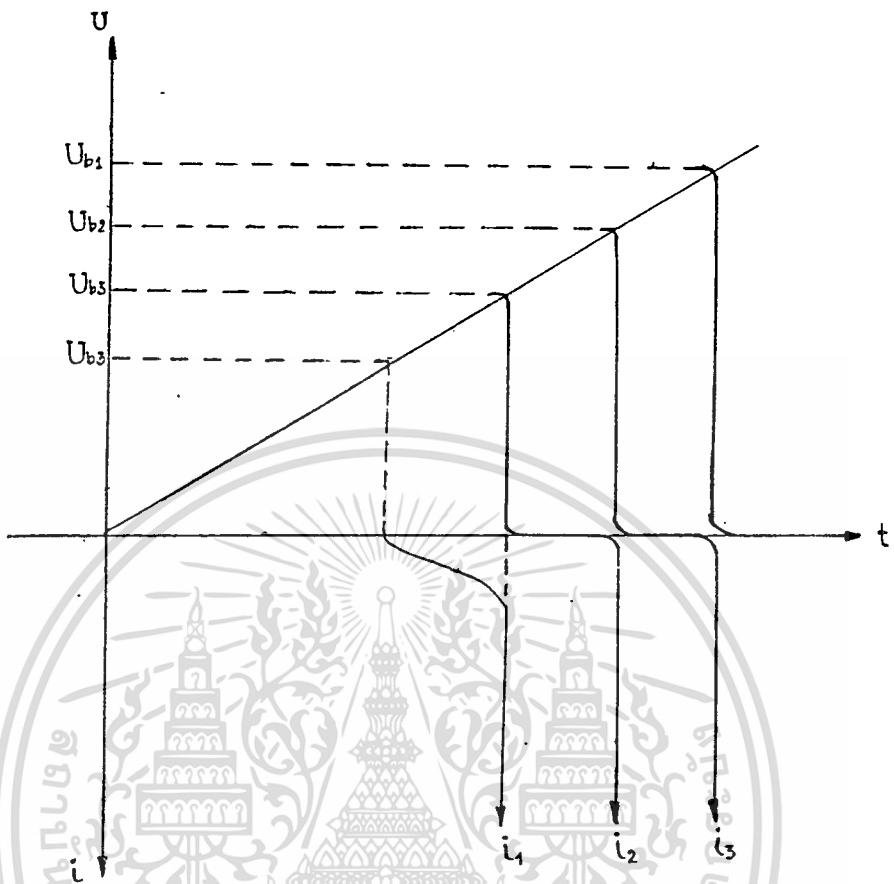
$$E_b = U_b / d \quad (2.2.)$$

เมื่อ U_b คือ แรงดันที่ทำให้เกิดเบรคดาวน์ด้วยสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

E_b คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรคดาวน์ ซึ่ง

เรียกว่าความคงทนทางไฟฟ้าของการฉนวน

อย่างไรก็ตามค่า E_b นี้ของไดอิเล็กตริกชนิดหนึ่งก็มีค่าไม่คงตัวเสมอไป เพราะขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ เช่น แม้แต่ความหนาหรือระยะห่าง d ที่ไม่เท่ากัน ค่า E_b ก็ไม่เท่ากัน ฉะนั้นในมาตรฐานที่กำหนดค่าความคงทนทางไฟฟ้าของฉนวนมักจะกำหนดความหนาของไดอิเล็กตริกไว้ด้วยเสมอ



รูปที่ 2.10. เปรียบเทียบแรงดันที่ทำให้เกิดเบรคดาวนในไดอิเล็กตริกตามลักษณะสนามไฟฟ้า

2.1.1.7.2. ลักษณะของอิเล็กโตรดที่ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ชนิด 1 และ 2

อิเล็กโตรดแบบนี้ความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้น ความแตกต่างกัน ณ จุดต่างๆ จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิเล็กโตรดที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากหรือน้อย ดังเช่น อิเล็กโตรดในรูป 2.9.(2) ถ้าเขียนเส้นสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่าๆ จะได้ดังในรูป 2.11. จะเห็นได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโตรดทรงกลม อาจคำนวณได้จากสมการ

$$E_p = U_p / r \cdot \epsilon \cdot \eta \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ η^* คือ แฟคเตอร์สนามไฟฟ้า (field utilization factor) มีนิยามว่า

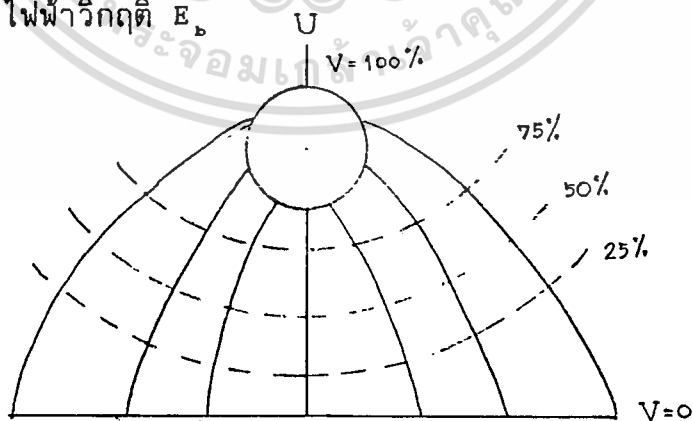
$$\eta^* = E_{av} / E_{max} < \text{หรือ} = 1$$

โดยที่ E_{av} คือ ค่าเฉลี่ยของสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ U / b

จึงอาจกล่าวได้ว่า η^* ก็คือ ดรรชนีชี้บอกให้ทราบว่าอิเล็กโตรดนั้น η มีลักษณะสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากน้อยเพียงใด และโดยอาศัยแฟคเตอร์สนามไฟฟ้านี้เองจึงคำนวณหาความเครียดเบรคดาวน์ของฉนวนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอได้ คือ

$$E_b = U_b / d \cdot \eta^* \tag{2.4}$$

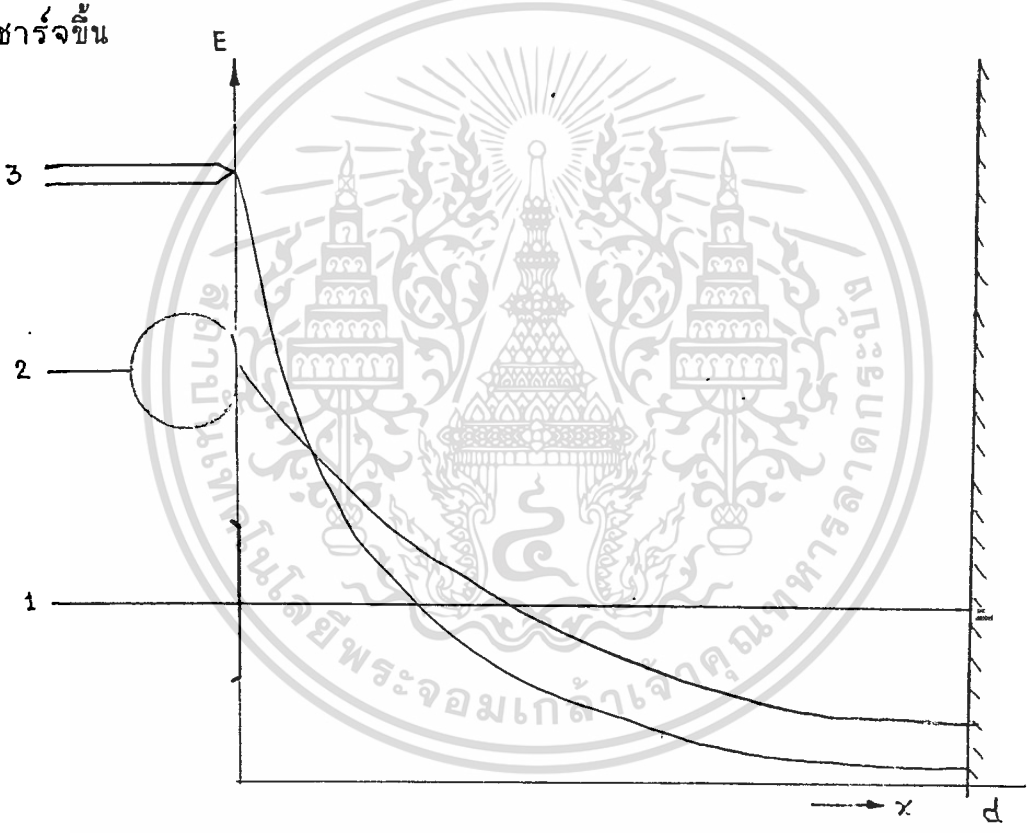
สมการนี้ใช้ได้เฉพาะกรณีที่อิเล็กโตรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยหรือใช้กับกรณีที่ไม่มีโคโรนาหรือพรีดีสชาร์จ (predischarge) เกิดก่อนเบรคดาวน์ ดังอิเล็กโตรดในรูป 2.9.(2) กล่าวคือ ก่อนเกิดเบรคดาวน์จะไม่ปรากฏว่ามีกระแสไหลระหว่างอิเล็กโตรดเลย และลักษณะสนามไฟฟ้าจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง จะเกิดเบรคดาวน์ทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงถึงค่าหนึ่ง คือ ค่าสนามไฟฟ้าวิกฤติ E_b



รูปที่ 2.11. สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่า

- เส้นสนามไฟฟ้า
- - - - - เส้นศักย์เท่า

ในกรณีที่อิลেকโตรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (highly nonuniform field) ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงจะอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับผิวอิลেকโตรดที่มีพื้นผิวน้อยที่สุด เช่น ปลายแหลมดังในรูป 2.9.(3) เมื่อระยะห่างออกไปจากผิวอิลেকโตรดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็วดังในรูป 2.12. อิลেকโตรดแบบนี้ถึงแม้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าถึงค่าวิกฤติแล้วก็ตาม จะไม่เกิดเบรคดาวน์แต่จะเกิดโคโรนาหรือฟริตติสชาร์จขึ้น



รูปที่ 2.12. เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิลেকโตรดลักษณะต่างๆ

ในบริเวณใกล้ผิวอิลেকโตรด คือ บริเวณที่มีความเครียดไฟฟ้าสูงสุด ส่วนบริเวณอื่นๆ ยังมีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำจะไม่เกิดโคโรนา ฉะนั้นในช่องว่างระหว่างอิลেকโตรดจะเกิดดิสชาร์จที่ไม่สมบูรณ์ (คือ ไม่ตลอดแนวระหว่างอิลেকโตรด) เรียกว่าดิสชาร์จบางส่วน (partial discharge) ปรากฏการณ์อาจเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องหรือเป็นช่วงๆ จึงทำให้มีกระแสไหลในวงจรที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรด กระแสนี้จะเกิดขึ้นและวัดได้ก่อนเกิดเบรคดาวน์ เรียกว่า กระแสโคโรนา (corona current) หรือกระแสพริตติสซาร์จดังใน รูป 2.10. แบบ 3 การเกิดโคโรนาจึงทำให้สนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตเปลี่ยน ไป เพราะมีประจุหมอก (space charge) แต่ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ยังคำนวณได้จากสมการ (2.3) แต่ η^* จะเปลี่ยนไป ดังนั้นค่าความเครียด เบรคดาวน์ของการฉนวนจะคำนวณจากสมการ (2.4) ไม่ได้ อย่างไรก็ตาม สมการ (2.4) นี้อาจใช้คำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันโคโรนา เริ่มเกิดได้ เพราะสนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตยังไม่เปลี่ยนแปลง นั่นคือ

$$E_c = U_c / d \cdot \eta^* \quad (2.5)$$

เมื่อ E_c คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าโคโรนาเริ่มเกิด
 U_c คือ แรงดันป้อนที่โคโรนาเริ่มเกิด (corona inception voltage)

โดยที่ E_c และ U_c เป็นค่าความเครียดสนามไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่โคโรนาเริ่มเกิด ฉะนั้นสมการ (2.5) จึงใช้ได้เฉพาะกรณีที่ไม่มีประจุหมอกระหว่างอิเล็กโตรด (free of space charge) หรือกล่าวง่ายๆ ก็คือ สมการ (2.5) นี้ใช้สำหรับคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าหรือแรงดันเริ่มต้น (starting voltage, threshold voltage, inception voltage) ซึ่งหมายถึงแรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงในช่องระหว่างอิเล็กโตรด อาจจะเป็นเบรคดาวน์ (ในกรณีที่อิเล็กโตรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หรือไม่สม่ำเสมอเพียงเล็กน้อย) หรือเป็นแรงดันที่โคโรนาเริ่มเกิด (ในกรณีที่อิเล็กโตรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ค่าแรงดันเบรคดาวน์จะมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเริ่มต้น) ค่าแรงดันเริ่มต้นจึงอาจเขียนในรูปสมการทั่วไปได้ว่า

$$U_c = E_c \cdot d \cdot \eta^* \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ U_1 คือ แรงดันเริ่มต้น

E_1 คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันเริ่มต้น

ในกรณีอิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หรือสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ค่า U_1 คือ U_0 และ E_1 คือ E_0 ถ้าเป็นอิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง $U_0 > U_1$ ค่าแรงดันเบรคดาวน์นี้ไม่อาจจะคำนวณได้ง่ายๆ ทั้งนี้เพราะไม่ทราบถึงการกระจายของประจุหมอกว่าเป็นอย่างไร ฉะนั้นการคำนวณความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของการฉนวนที่อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง มักจะกำหนดด้วยค่าแรงดันเริ่มต้น หรือความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มต้น เป็นตัวบอกถึงค่าความคงทนการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า

2.1.2. เนื่องจากในส่วนของฉนวนเหลว

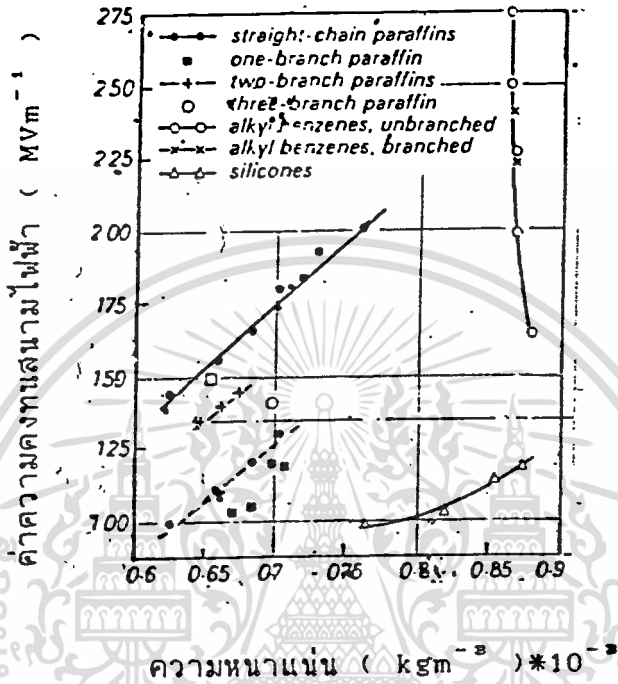
2.1.2.1. ผลจากลักษณะโครงสร้างโมเลกุล

โครงสร้างทางโมเลกุลจะมีผลต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในฉนวนเหลวชนิดเดียวกันซึ่งจะให้ผลการเปลี่ยนแปลงทางด้านกายภาพมากกว่าทางด้านเคมี ตัวอย่าง เช่น Saluage (1951) ได้ทดลองบ่อนความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าดีซีให้แก่ต่างเหลว n-pentane ถึง n-nonane ซึ่งจะทำให้ลักษณะพันธะของมันยาวเพิ่มขึ้นกว่าปกติ Lewis (1953) ก็ได้ใช้ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าดีซีบ่อนให้ไปแก่ไดเมทิลซิลอกเซน (Dimethyl siloxane) ซึ่งจากการที่มีคนหลายคนได้ทดลองนี้ และผลการทดลองทั้งหมดได้สรุปตั้งรูปที่ 2.13. โดยเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากับความหนาแน่นของฉนวนเหลวที่นำมาทดสอบ สำหรับอัลเคน (Alkane) และ ซิลอกเซน (Siloxane) จะได้ลักษณะ curve เป็น slope เส้นตรงเพิ่มขึ้น สำหรับ Alkyl benzenes จะได้ curve คงที่

จากการทดลองที่ผ่านมาหลายครั้ง ได้อธิบายผลตามรูป 2.13. ในลักษณะผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ญาติเห็นว่าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



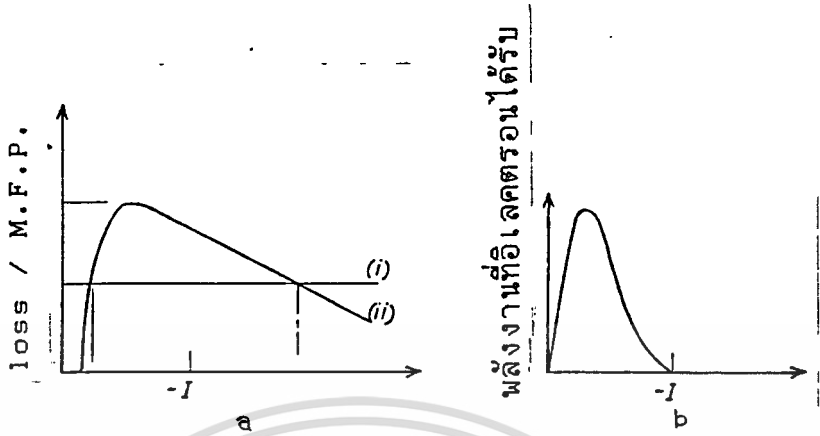
รูปที่ 2.13. แสดงการเปลี่ยนแปลงของความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า

กับ ความหนาแน่นของฉนวนเหลวที่มีโครงสร้างทางโมเลกุลคล้ายกัน ของโครงสร้างโมเลกุลต่อค่าความคงทนของฉนวนเหลวที่แสดงให้เห็น การควบคุมแรงอิเล็กตรอนแล้วถ่ายเทพลังงานให้แก่ฉนวนเหลว พลังงานที่ได้รับจากอิเล็กตรอนและการชนกันของอิเล็กตรอนจะทำให้เกิดขบวนการนำไฟฟ้า และเบรคดาวน์ในที่สุดสำหรับในของแข็ง แต่เรารู้ลักษณะฉนวนเหลวในขอบเขตที่จำกัด เช่น รายละเอียดการสูญเสียพลังงานของอิเล็กตรอนในไฮโดรคาร์บอน และโมเลกุลในฉนวนเหลว Lewis ได้ศึกษาความสั่นสะเทือนจากการชนกัน (Vibrational collisions) ซึ่งจะทำให้เกิดประสิทธิภาพดีมากในการถ่ายเทพลังงาน ในรูป 2.14. a. แสดงไดอะแกรมการสูญเสีย

พลังงานจากการสั่นสะเทือนของการชนกัน พลังงานที่ได้รับโดยอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นใบเขียวประเขยขึ้นด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14. แสดงไคอะแกรมพลังงานการสิ้นสเทือนเนื่องจากการชน

การชน

รูปที่ 2.14.(a) แสดงการสูญเสียพลังงานจากการสิ้นสเทือน

ของการชน

รูปที่ 2.14.(b) แสดงการแบ่งแยกพลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับ

จากสนามไฟฟ้า (E)

จากการป้อนค่าสนามไฟฟ้า (E) เข้าไป จะต่ำกว่าค่าการเบรคดาว์น ซึ่งแสดงโดยเส้นตามแนวราบ $Ee\lambda_m$ เมื่อ λ_m เป็นค่า mean free path ที่น้อยที่สุด ระหว่างการชนกันของอิเล็กตรอนคู่หนึ่งๆ การแบ่งแยกพลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับจากสนามไฟฟ้า (E) แสดงตามรูป 2.14.b. ที่สนามไฟฟ้าสูงเพียงพอ , อิเล็กตรอน จะได้รับพลังงานสูงขึ้นจนถึงระดับสูงสุดดังในรูป 2.14.b. เมื่อความเร็วของมันมีค่าสูงจนกระทั่งการสิ้นของโมเลกุลมีค้ายาวนานภายใต้สภาวะนี้ ความเร่งของอิเล็กตรอนจะต่อเนื่องไปเรื่อยๆ การแบ่งแยกพลังงานในรูป 2.14.b. จะเพิ่มพลังงานให้สูงขึ้น และการชนกันจนเกิดไอออไนซ์ด้วย ซึ่งจะนำไปสู่การเบรคดาว์น ดังนั้น พลังงานที่สมมูลย์ที่จุดเบรคดาว์นจะแสดงได้ด้วยสมการ

$$eE\lambda_m = Ch\nu \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $h\nu$ เป็นพลังงานคว้นตัมที่สูงเกินไปของอิเล็กตรอนในระหว่างการสั่นสะเทือนจากการชน C เป็นค่าคงที่ที่เปลี่ยนแปลงตามสภาวะการทดลอง ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามขบวนการไอออไนเซชัน เพื่อให้เกิดการนำกระแส เพื่อนำไปสู่การเบรคดาว์นจะประยุกต์ใช้สมการ 2.14. กับฉนวนเหลว พาราฟิน (Paraffines) , Lewis ได้กล่าวว่าค่าเป็นค่าความคงทนต่อการสั่นสะเทือนในพันธะ C-H ซึ่งจะมีความถี่ และ พลังงานคว้นตัมจะประมาณ 0.37 CV. เราจะแสดงว่า ค่า Mean-Free-Path จะมีความสัมพันธ์กับ

N ; (ความหนาแน่นของโมเลกุล) และ scattering cross-section Q โดยได้ว่า $(\lambda_m)^{-1} = NQ$ ในการรวมทุกๆ โมเลกุล สมมติให้ การชนกันเป็นอิสระ

ดังนั้น $(\lambda_m)^{-1}$ จะเขียนได้เป็น

$$(\lambda_m)^{-1} = N \sum n_i Q_i \quad (2.8.)$$

เมื่อ แทนค่าจำนวนกลุ่มของไฮโดรคาร์บอน ซึ่งมีค่า cross-section Q_i

จากสมการ 2.7. และ 2.8. ความคงทนสนามไฟฟ้า จะได้เป็น

$$E = kN (n_1 Q_1 + n_2 Q_2 + n_3 Q_3) \quad (2.9.)$$

เมื่อ k เป็นค่าคงที่ ซึ่งรวม C, e และ h และ $n_1 Q_1, n_2 Q_2, n_3 Q_3$ แสดงถึงกลุ่มของ CH, CH_2, CH_3 ตามลำดับ

Adamczewski ได้กล่าวถึงลักษณะของของเหลวไฮโดรคาร์บอนเหมือนกับของ Lewis แต่เป็นการสั่นสะเทือน (vibration) ของพันธะ C-C. สำหรับพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด (total cross-section) ของการกระตุ้น การสั่นสะเทือนของโมเลกุลจะประมาณได้เท่ากับพื้นที่หน้าตัดตามความยาวของโมเลกุล (longitudinal cross-section)

ดังนั้นพื้นที่หน้าตัดการชนกันของโมเลกุล n-alkane แสดงได้ตามสมการ

$$Q = d^2 l (n-1) \quad (2.10.)$$

เมื่อ d เป็นระยะทางเฉลี่ยระหว่างโมเลกุล

l เป็นความยาวของพันธะ C-C

n เป็นจำนวนคาร์บอนอะตอมทั้งหมด

จากสมการ 2.10. แทนใน สมการ 2.7. และ 2.8. โดยให้ $C = 1$

ค่าความเข้มสนามไฟฟ้า (electric strength) จะเป็น

$$E = h \nu^2 d l (n-1) N \quad (2.11.)$$

Adamczewski ได้กล่าวว่าความเข้มสนามไฟฟ้าของฉนวนเหลว

จะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความยาวลูกโซ่

ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มสนามไฟฟ้า และโครงสร้างของโมเลกุลได้เกิดขึ้นจากการศึกษาของ Lewis และ Adamczewski ซึ่งเป็นรูปแบบสำคัญในทฤษฎีการเบรคดาว์นสมัยใหม่คือ ทฤษฎีการเบรคดาว์นแบบอิเล็กทรอนิกส์

2.1.2.2. จากโพรงและฟองก๊าซ (CAVITATION BREAKDOWN)

ในฉนวนเหลวอาจมีฟองก๊าซเกิดขึ้นได้เนื่องจากหลายสาเหตุด้วยกัน เช่น มีโพรงก๊าซอยู่ที่ผิวอิเล็กโตรด หรือเนื่องจากแรงอิเล็กโตรดสแตติกส์ระหว่างกลุ่มประจุด้วย ซึ่งอาจมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดที่อิเล็กโตรดหรือเกิดก๊าซจากการแตกตัวของโมเลกุลฉนวนเหลวเนื่องจากการชนของอิเล็กตรอน หรือโคโรนาดีสชาร์จ ทำให้ฉนวนเหลวระเหยเป็นไอ เมื่อมีฟองก๊าซเกิดขึ้นก็จะขยายตัวยึดในแนวสนามไฟฟ้าเพื่อลดพลังงานศักย์ในสนามไฟฟ้า สมมติว่าปริมาตรของฟองก๊าซคงตัวในขณะที่ยึดออก เบรคดาว์นจะ

เกิดขึ้นเมื่อแรงดันตกคร่อมความยาวของฟองก๊าซมีค่าเท่ากับค่าต่ำสุดของเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โค้งพาสเชน (paschen's curve) ของฟองกาสนั้น Alston ได้ให้ความสัมพันธ์ง่าย ๆ สำหรับคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าของฟองก๊าซ E_p

ในฉนวนเหลวซึ่งมีค่าเปอร์มิตติวิตี 1 ไว้คือ

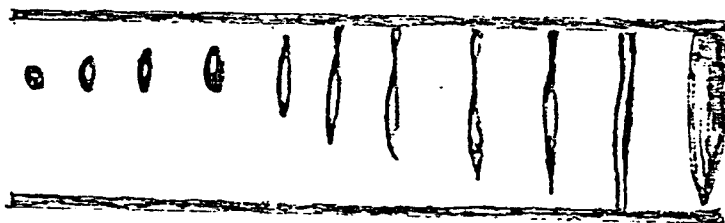
$$E_p = 3\epsilon E_0 / (2\epsilon + 1) \quad (2.12.)$$

โดยที่ E_0 คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวนเหลวเมื่อไม่มีฟองก๊าซ

เมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าของฟองก๊าซ E_p มีค่าเท่ากับความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตของกาสนั้นจะเกิดดิสชาร์จผ่านฟองก๊าซ เป็นผลให้เกิดการแยกตัวของโมเลกุลฉนวนเหลว นำไปสู่การเกิดเบรคดาวนี้ทั้งหมด

ถ้าบนอิเล็กโตรดมีจุดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง ฉนวนเหลวอาจเกิดไอ ณ จุดนั้น ดิสชาร์จผ่านฟองไอทำให้เกิดฟองก๊าซขึ้นและทำให้เกิดเบรคดาวนี้ได้เช่นกัน

ในกรณีฉนวนเหลวมีสิ่งเจือปนเป็นหยดลูกกลมของเหลวชนิดอื่นปนอยู่ เช่น หยดน้ำ เบรคดาวนี้อาจเกิดขึ้นเนื่องจากความไม่คงรูปของหยดน้ำนี้ ในสนามไฟฟ้า สมมติว่าหยดลูกกลมนี้มีค่าเปอร์มิตติวิตี ϵ_2 จมอยู่ในฉนวนเหลวที่มีค่าเปอร์มิตติวิตี ϵ_1 อยู่ในสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ คืออยู่ระหว่างอิเล็กโตรดแผ่นระนาบขนานกัน เนื่องจากหยดลูกกลมนี้ยึดไม่ได้ ผลของสนามไฟฟ้าจะทำให้หยดลูกกลมนี้ยึดตัวออกตามแนวสนามไฟฟ้าดังในรูป 2.15. (Krasucki)



(คำอธิบาย รูปหน้าที่แล้ว)

รูป 2.15. หยตลูกกลมเจือปนในฉนวนเหลวซิลิโคน (Alston)

ความเครียดสนามไฟฟ้าในหยตลูกกลมที่อัดตัวไม่ได้มีปริมาตร 4/3

อาจคำนวณได้จากความสัมพันธ์ (Alston)

$$E_2 = 2 \sqrt{\frac{2\pi b \epsilon_1 \beta^{2/3} (2\beta - 1 - \frac{1}{\beta^2})}{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 R}} \quad (2.13.)$$

เมื่อ b คือ ความตึงผิวของฉนวนเหลว

ϵ_1 และ ϵ_2 คือ เปรอริมิตติวิตีของฉนวนเหลวและของหยตลูกกลมเหลวเจือปนตามลำดับ

β คือ อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลางส่วนแคบของหยตลูกกลม

R คือ รัศมีของหยตเจือปน

และความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าภายในหยตลูกกลม E_2 กับสนามไฟฟ้าในฉนวนเหลวที่ปราศจากหยตลูกกลม E อาจเขียนได้ว่า

$$E_2 = \frac{\epsilon_1 E}{\epsilon_1 - (\epsilon_1 - \epsilon_2) G} \quad (2.14)$$

$$\text{เมื่อ } d = \frac{1}{\beta^2 - 1} \left\{ \frac{\beta \cosh^{-1} \beta}{(\beta^2 - 1)^{1/2}} - 1 \right\}$$

จากสมการ (2.13.) และ (2.14.) จัดรูปใหม่ได้

$$E = 600 \sqrt{\frac{\pi b}{\epsilon_1 R} \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_1 - \epsilon_2} - G \right) H} \quad (2.15)$$

$$\text{เมื่อ } H^2 = 8 \beta^{1/3} (2\beta - 1 - 1/\beta^2)$$

Alston ได้เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง β กับ $\left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_1 - \epsilon_2} - G \right) H$ และชี้ให้เห็นว่า ถ้า ϵ_2 / ϵ_1 มากกว่า 20 ค่า E จะเพิ่มขึ้นถึงค่าสูงสุด

แล้วลดลงเมื่อ β เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารูปร่างของหยตลูกกลมไม่เสถียร

ภาพเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าถึงค่าวิกฤต แต่ถ้า ϵ_2 / ϵ_1 น้อยกว่า

20 จะไม่มีค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตแม้ว่า β จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างมากก็ตาม

ในกรณีที่ยหดยลกกมลเจือปนเป็นตัวนำ คือ $\epsilon_2/\epsilon_1 \rightarrow \infty$ สมการ (2.14.)

จะเป็น

$$E = 600 \sqrt{\frac{\pi \delta}{\epsilon_1 R}} GH \quad (2.16)$$

ค่า GH จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.45865 มีค่าประมาณ 1.85

ความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติที่ทำให้หดยลกกมลเสียสภาพจะมีค่า

$$E_{cr} = 487.7 \sqrt{\frac{\delta}{R \epsilon_1}} \text{ V/cm.} \quad (2.17)$$

ตั้งตัวอย่างสมมติว่ามีหดยลกกมลน้ำ ซึ่งมี $\delta = 43 \text{ dyne/cm}$ และ

$R = 1 \text{ um}$ อยู่ น้ำมันหม้อแปลง $\epsilon_1 = 2$ ความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติ

จากสมการ (2.17) จะมีค่า

$$E_{cr} = 226 \text{ kV/cm}$$

จัดเป็นค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าโดยประมาณของน้ำมันหม้อแปลงเชิงการค้า ซึ่งต่ำกว่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวที่สะอาดที่มีค่าถึง 1000 kV/cm

ดังนั้นถ้าลองวิเคราะห์ดูว่าหดยลกกมลตัวนำนี้เล็กที่สุดเท่าใด จึงจะเริ่มมีผลกระทบต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวที่สะอาด (1000 kV/cm)

โดยใช้ค่า δ และ ϵ_1 ดังกล่าวข้างต้น จะพบว่าหดยลกกมลมีขนาดรัศมีประมาณ 0.05 μm

ในกรณีของฟองก๊าซ สมการของความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติในฉนวน

เหลว คือสมการ (2.13.) อาจเขียนได้ว่า (Naidu & Kamaraju)

$$E_{cr} = 600 \sqrt{\frac{\pi \delta}{\epsilon_1 R}} \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_1 - \epsilon_2} - G \right) \left(\frac{8A'B}{3\beta(\epsilon_1 - \epsilon_2)} \right)^{\frac{1}{2}} \sqrt{\cosh \theta}$$

เมื่อ

$$A = \frac{2}{\beta} - 1 - \frac{1}{\beta^2}$$

$$B = 2\epsilon_1 \beta^2 - \epsilon_2 (1 - \beta^2)$$

G, δ และ R เป็นของหดยลกกมลเหลวดังกล่าวข้างต้น

$$\theta = \frac{1}{3} \cosh^{-1} \left(\frac{p \cdot r}{b} \left\{ \frac{27\beta^5 (\epsilon_1 - \epsilon_2)^3}{2\beta^2} \right\} \right)$$

โดยที่ p คือความดันของเหลว

และหน่วยต่างๆ ในสมการ (2.17.) เป็น c.g.s.

2.1.2.3. สิ่งเจือปนของแข็ง

สิ่งเจือปนของแข็งที่อาจมีอยู่ในฉนวนเหลว เป็นผงฝุ่นหรือในรูปไฟเบอร์ ถ้าสิ่งเจือปนมีค่าเปอร์มิตติวิตีต่างไปจากค่าของฉนวนเหลว และอยู่ในสนามไฟฟ้า E จะเกิดแรงกระทำบนอนุภาคของแข็งที่มีลักษณะทรงกลมจะเป็น (Alston)

$$F = \frac{1-r^3}{2} \frac{(\epsilon_2 - \epsilon_1)}{2\epsilon_1 + \epsilon_2} \text{grad } E^2 \quad (2.19)$$

เมื่อ r คือ รัศมีของอนุภาคของแข็ง

ϵ_1 คือ เปรอ์มิตติวิตีของฉนวนเหลว

ϵ_2 คือ เปรอ์มิตติวิตีของอนุภาคของแข็งเจือปน

ถ้า $\epsilon_2 > \epsilon_1$ ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นเช่นนั้น แรงนี้จะทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง ผลนี้จะได้ชัดเจนมากขึ้น ถ้าหากสนามไฟฟ้าเป็นแบบไม่สม่ำเสมอมากขึ้น แต่ในกรณีของฟองก๊าซ $\epsilon_2 < \epsilon_1$ จะมีทิศทางของแรงกระทำในทางตรงข้าม คือ เคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำ ผลของแรงที่เกิดขึ้นจะทำให้อนุภาคของแข็งเรียงตัวต่อกันเป็นลูกโซ่ เชื่อมโยงระหว่างอิเล็กโตรดทำให้เกิดเบรคดาวขึ้นได้

แรงที่กระทำบนอนุภาคเพิ่มเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า ϵ_2 ฉะนั้นถ้าอนุภาคนั้นเป็นตัวนำ $\epsilon_2 \rightarrow \infty$ แรงกระทำบนอนุภาคจะเป็น $F_\infty = \frac{r^3}{2} \text{grad } E^2$ และอนุภาคตัวนำทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าเฉพาะที่มีค่าสูงขึ้น ถ้าความเครียดสนามไฟฟ้านี้สูงกว่าค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวก็จะทำให้เกิดสปาร์คโกล์ อนุภาค เกิดฟองก๊าซขึ้น และนำไปสู่การเกิดเบรคดาวในฉนวนเหลวในที่สุด

ฉนวนเหลวเชิงการค้ำมักจะมิโครงสร้างซับซ้อนและสิ่งเจือปนผสมอยู่ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวขึ้นอยู่กับปริมาณสิ่งเจือปน สิ่งเจือปนอาจเป็นผงฝุ่น เศษชิ้นของแข็งเล็กๆ และจะเรียงตัวต่อกันเป็นลูกโซ่ไปตามแนวสนามไฟฟ้า เป็นเหตุให้เบรคดาวน์ได้ง่ายขึ้น ฉะนั้นในกรณีที่จะใช้ฉนวนเหลวรับความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่า 100 kV/cm ต่อเนื่องกันตลอดเวลา จะใช้ฉนวนเหลวร่วมกับฉนวนแข็งเป็นผนังกัน เพื่อกันมิให้ของแข็งเจือปนเรียงตัวต่อกัน จะช่วยให้มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงถึง 1000 kV/cm และผลดีที่ใช้ของเหลวร่วมกับของแข็งก็คือ ฉนวนเหลวจะซึมเข้าไปแทนที่รูพรุนเป็นขจัดฟองอากาศด้วย ความชื้นเป็นสิ่งหนึ่งที่มีผลต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลว โดยเฉพาะที่เป็นน้ำมันฉนวนเก่าสกปรก เช่น น้ำมันที่ดูดซึมความชื้นไว้ 0.005% จะมีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าน้ำมันแห้งและสะอาดถึง 30% ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ (ϵ_r) จะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ เช่น ที่อุณหภูมิ 20° มี $\epsilon_r = 4.5$ จะเพิ่มขึ้นเป็น 20 ที่อุณหภูมิ 90°C ฉนวนเหลวอาจละลายฉนวนแข็งและวัสดุที่ใช้เป็นชั้นส่วนปิดผนึก จะทำให้เกิดพลังงานสูญเสียเปล่าของไดอิเล็กตริกเพิ่มมากขึ้น หากเกิดดีสชาร์จบางส่วน จะทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี อาจเป็นพิษและเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้ อย่างไรก็ตามสิ่งสกปรก และสิ่งเจือปนของฉนวนเหลวเก่านี้ อาจกรองให้สะอาดใหม่ได้ และค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าก็จะเพิ่มสูงขึ้น

1.2. ดีสชาร์จบางส่วน (Partial Discharges)

ดีสชาร์จบางส่วน คือ ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นระหว่างแลป โดยที่การเบรคดาวน์ระหว่างอิเล็กโตรดยังเชื่อมโยงไม่ถึง สามารถแบ่งออกได้ดังนี้

1. ดิสชาร์จตามผิว (surface discharge)
2. โคโรนาดิสชาร์จ (corona discharge)
3. ดิสชาร์จภายใน (internal discharge)

ซึ่งจากการดิสชาร์จบางส่วนดังกล่าว โคโรนาดิสชาร์จ และ ดิสชาร์จภายในจะมีผลต่อฉนวนเหลว โดยที่โคโรนาดิสชาร์จ เกิดจากการ ดิสชาร์จในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงรอบปลายอิเล็กโทรดแหลม เรียกว่า โคโรนา โคโรนาดิสชาร์จจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าเกินค่า -สนามไฟฟ้าวิกฤติ

ผลจากโคโรนาที่สังเกตจากการทดลอง การเบรคดาวน์ในฉนวน เหลวคือ

1. จะได้ยินเสียงฮิสซี
2. เกิดการเดือดของของเหลว

ส่วนในกรณีของดิสชาร์จภายใน เป็นดิสชาร์จเกิดขึ้นภายในฉนวนแข็ง หรือฉนวนเหลว ซึ่งมีฟองก๊าซอยู่ภายใน ความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวนที่ ดิสชาร์จภายในเริ่มเกิดขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าของก๊าซที่แฝงอยู่ภายใน ซึ่งสามารถคำนวณได้ในบางกรณี ฉนวนที่มีสิ่งเจือปนอยู่จะทำให้เกิดก๊าซขึ้น หลังจากเกิดเบรคดาวน์ครั้งแรก การมีฟองก๊าซอยู่ภายในฉนวนจะเป็นต้นเหตุ นำไปสู่การเกิดเบรคดาวน์ในที่สุด จึงอาจกล่าวได้ว่าฉนวนใดที่มีดิสชาร์จภายใน จะทำให้อายุการใช้งานของฉนวนสั้นลง ฉะนั้นการตรวจสอบคุณภาพของ การฉนวนจึงมีเรื่องการตรวจดิสชาร์จภายในที่เรียกว่า พาร์เซียลดิสชาร์จ เป็นเรื่องสำคัญประการหนึ่ง

2.3. ผลของประจุค้างที่มีต่อแรงดันเบรคดาวน์ต่างขั้ว

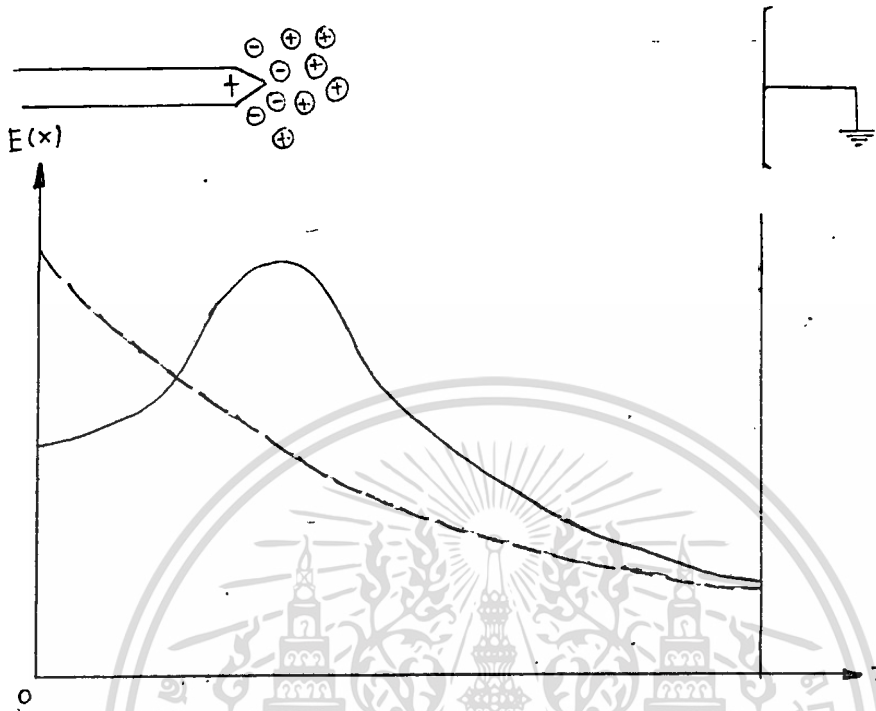
จากการทดลอง ทำให้สามารถสรุปได้ว่าลักษณะของขั้วที่แห้ง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กโตรดมีผลต่อค่าแรงดันเบรคดาวว่าจะมีค่ามากขึ้น หรือน้อยลงก็ได้ ซึ่งการอธิบายถึงเหตุผลดังกล่าวสามารถใช้ทฤษฎีของก๊าซเข้ามาช่วยในการอธิบายปรากฏการณ์ในการเบรคดาวนั้นของของเหลวได้ โดยลักษณะการอธิบายดังกล่าวสามารถอธิบายได้เป็น 2 ลักษณะ ดังนี้ คือ

(2.3.1.) เมื่อใช้ปลายแหลมซี่บวก และ แผ่นระนาบซี่वल

ผลของการทดลองที่ได้มาจากการเบรคดาวนั้นในฉนวนเหลวโดยที่ใช้ปลายแหลมซี่บวก และแผ่นระนาบซี่वलนั้น ปรากฏว่าค่าแรงดันเบรคดาวนั้นที่ได้มีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ปลายแหลมซี่वल และ แผ่นระนาบซี่वल ปรากฏการณ์จากการทดลองดังกล่าว สามารถให้เหตุผลได้ดังนี้ คือ เนื่องมาจากหลักการที่ว่า อิเล็กตรอนมีความเร็ว ในการเคลื่อนที่สูงกว่าไอออนบวก ดังนั้น อิเล็กตรอนก็จะเคลื่อนที่ไปยังปลายแหลมซี่บวกก่อนโดยที่รวมตัวเป็นกลาง ซึ่งเป็นผลทำให้ความเครียดน้อยลงที่ปลายแหลมซี่บวก ส่วนไอออนบวกนั้นเคลื่อนที่ช้าก็จะออกันอยู่หน้าปลายแหลมซี่บวก ซึ่งเป็นผลทำให้ความเครียดมากที่ระนาบซี่वल ลักษณะดังกล่าวนี้เปรียบเสมือนปลายแหลมซี่บวกยื่นเข้าไปใกล้แผ่นระนาบซี่वल ผลดังกล่าวนี้จะทำให้เสมือนระยะแถบน้อยลงการเบรคดาวนั้นจะเกิดได้ง่ายขึ้น จากหลักการดังกล่าวสามารถเขียนเป็นรูปกราฟได้ดังต่อไปนี้

(รูปกราฟ อยู่หน้าถัดไป)



----- : - ในกรณีที่ไม่คิดประจุค้าง
 _____ : - ในกรณีที่คิดประจุค้าง

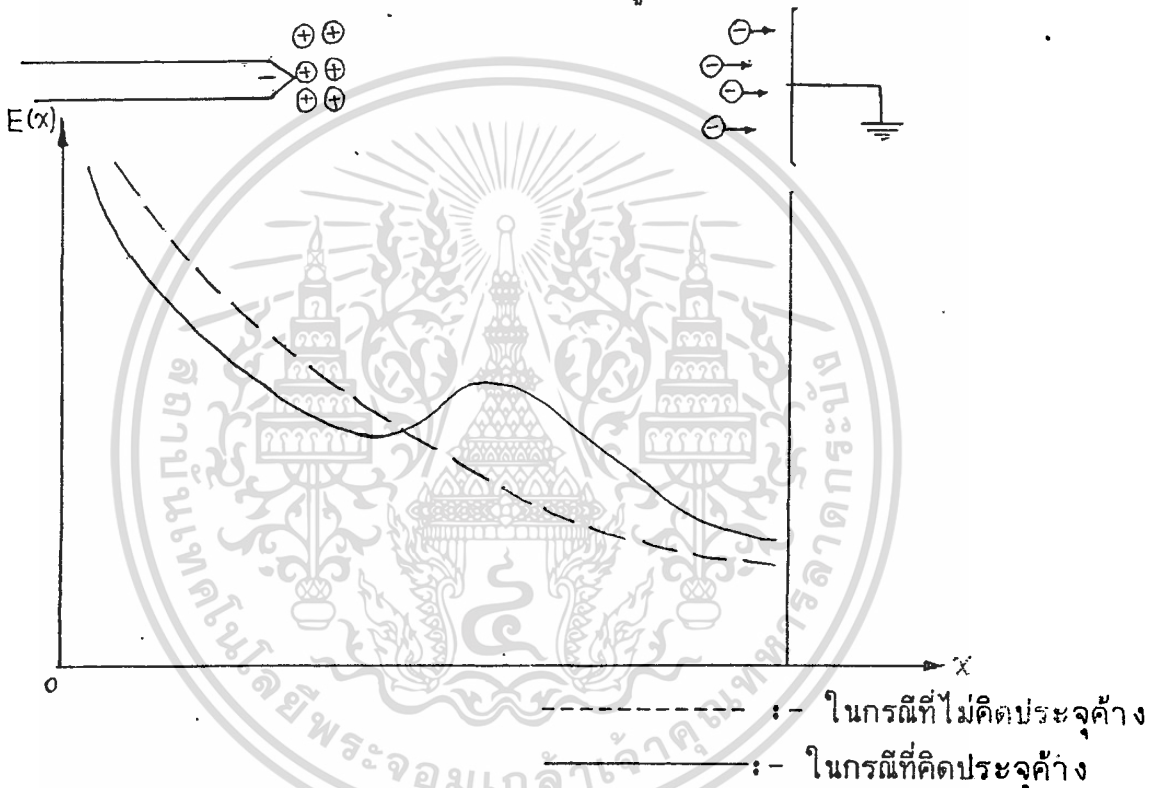
จากกราฟจะเห็นว่าที่บริเวณหน้าปลายแหลมขั้วบวกจะมีค่าสนามไฟฟ้าต่ำกว่าตรงบริเวณที่ไอออนบวกออกันอยู่ และถ้าระยะใกล้แผ่นระนาบขั้วลบก็จะมีค่าสนามไฟฟ้าต่ำลง (อธิบายโดยการคิดประจุค้าง)

(2.3.2.) เมื่อใช้ปลายแหลมขั้วลบและแผ่นระนาบขั้วบวก

ผลของการทดลองที่ได้มาจากการเบรคดาวนในฉนวนเหลวโดยที่ใช้ปลายแหลมขั้วลบ และแผ่นระนาบขั้วบวก ปรากฏว่าค่าแรงดันเบรคดาวนที่ได้มีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ปลายแหลมขั้วบวกและแผ่นระนาบขั้วลบ ปรากฏการณ์จากการทดลองดังกล่าว สามารถให้เหตุผลได้ดังนี้คือ เนื่องมาจากหลักการที่ว่าอิเล็กตรอนมีความเร็วในการเคลื่อนที่สูงกว่าไอออนบวก ดังนั้นอิเล็กตรอนก็จะเคลื่อนที่ไปยังแผ่นระนาบขั้วบวกก่อนโดยที่รวมตัวเป็นกลาง ซึ่งเป็นผลทำให้ความเครียดน้อยลงที่แผ่นระนาบขั้วบวก ส่วนไอออนบวกนั้นเคลื่อน

ที่ซ้าก็จะออกันอยู่หน้าปลายแหลมขั้วลบ ซึ่งเป็นผลทำให้ความเครียดมากที่ปลายแหลมขั้วลบ แต่สนามไฟฟ้าระหว่างหมอกประจุค่าง (ก็คือ ไอออนบวก) กับระนาบขั้วบวกจะกลับสม้าเสมอติขึ้นเนื่องมาจากประจุค่าง จึงทำให้แรงดันเบรคตาวนมีค่ามากกว่าในกรณีของปลายแหลมขั้วบวก และแผ่นระนาบขั้วลบ

จากหลักการดังกล่าวสามารถเขียนเป็นรูปกราฟได้ดังต่อไปนี้



จากกราฟจะเห็นว่าที่บริเวณหน้าปลายแหลมขั้วลบจะมีค่าสนามไฟฟ้าสูง ส่วนบริเวณระหว่างประจุค่างที่ปลายแหลมขั้วลบและแผ่นระนาบขั้วบวกจะมีค่าค่อนข้างสม้าเสมอ (อธิบายโดยการคิดประจุค่าง)

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในการทดลองจะต้องมีมาตรฐานในการวัด เช่น IEC AIBL.156, JISC2320 เป็นต้น แต่ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้มาตรฐาน IEC PUBL 156 และมาตรฐาน IEEE STANDARD TECHNIQUE FOR HIGH-VOLTAGE TESTING ในการวัด ส่วนระบบอิเล็กทรอนิกส์ในการทดลองเราใช้มาตรฐาน ASTM ในการออกแบบอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวต่อไปดังข้างล่างนี้

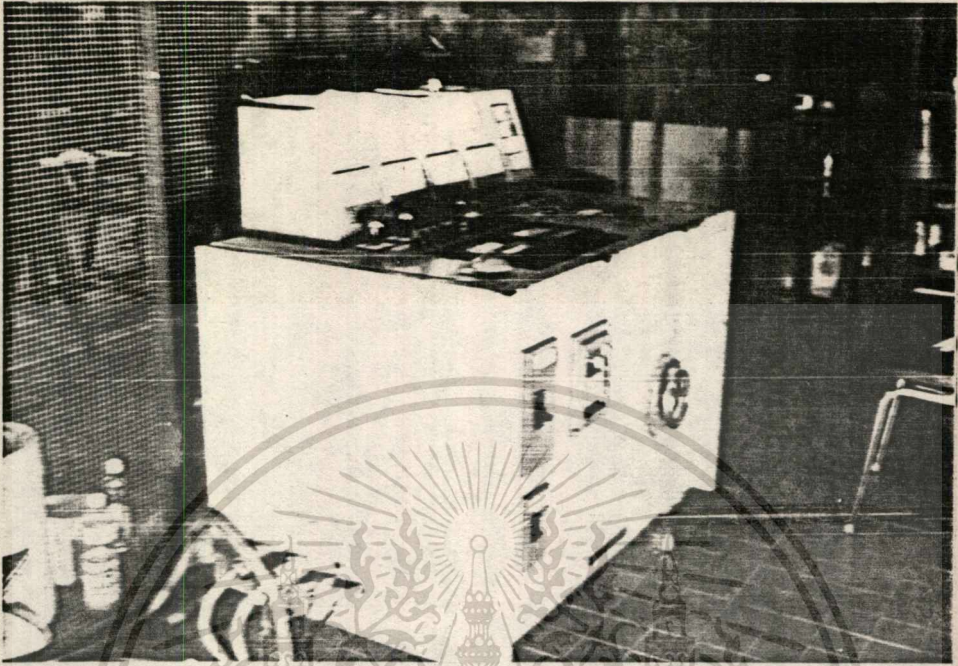
ชุดอุปกรณ์การทดลอง

แบ่งออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้ คือ

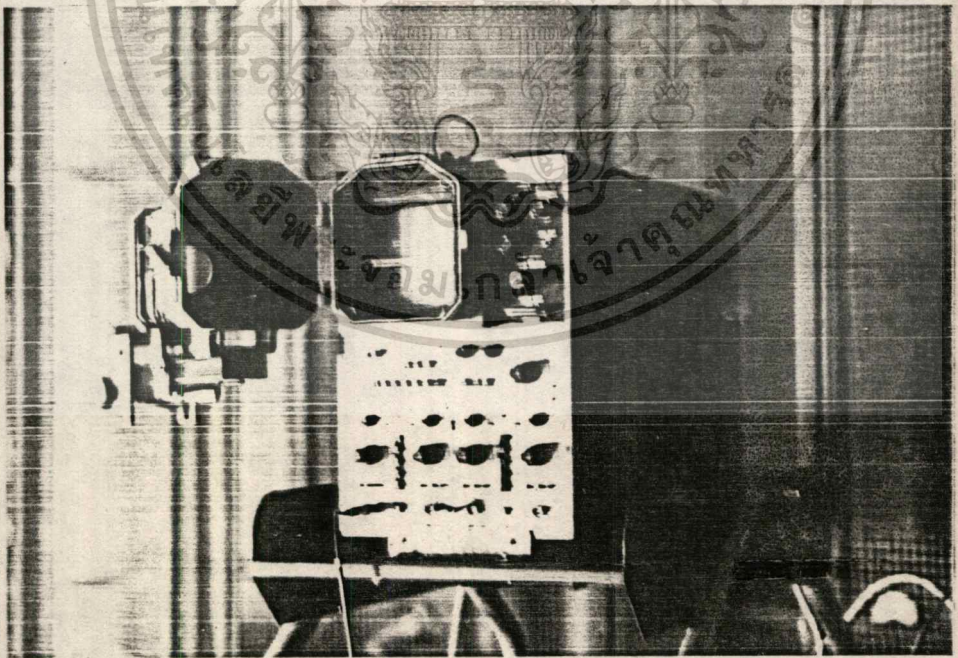
- 3.1 ชุดแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง (DC HIGH VOLTAGE GENERATOR) ดังแสดงในรูป 3.4.
- 3.2 ชุดหน่วยควบคุมแรงดัน (VOLTAGE CONTROL UNIT) ดังแสดงในรูป 3.1.
- 3.3 ชุดภาชนะทดสอบ (TEST CELL) ดังแสดงในรูป 3.3.
- 3.4 ชุดอุปกรณ์เครื่องมือวัด ดังแสดงในรูป 3.2.

3.1 แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้เป็นของบริษัท นิลิน อิเล็กทริก จำกัด มีพิกัดทางด้านอินพุต 10, 50Hz, 220V, 12KVA ทางด้านเอาต์พุตเป็น 600 kV, 10ma, 30 minutes โดยมีวงจรการทำงานแบบโวลต์เตจควบคุมเบลอร์ (VOLTAGE DOUBLE CIRCUIT) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ภายในอาคาร (INDOVR) ใช้น้ำมันเป็นฉนวนและเป็นตัวระบายความร้อนเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่กำเนิดออกมามีขั้วเป็นลบเมื่อเทียบกับดิน ดังนั้นสายส่งไฟฟ้าแรงสูงจากตัวกำเนิดแรงดันไฟฟ้าจึงต่อเข้ากับขั้วดาโรด และขั้วอาโนดถูกต่อลงดิน สายส่งไฟฟ้าแรงสูงถูกห่อหุ้มด้วยปลอกอลูมิเนียม เพื่อเพิ่มพื้นที่หน้าตัดช่วยลดความต่างศักย์บนพื้นผิว

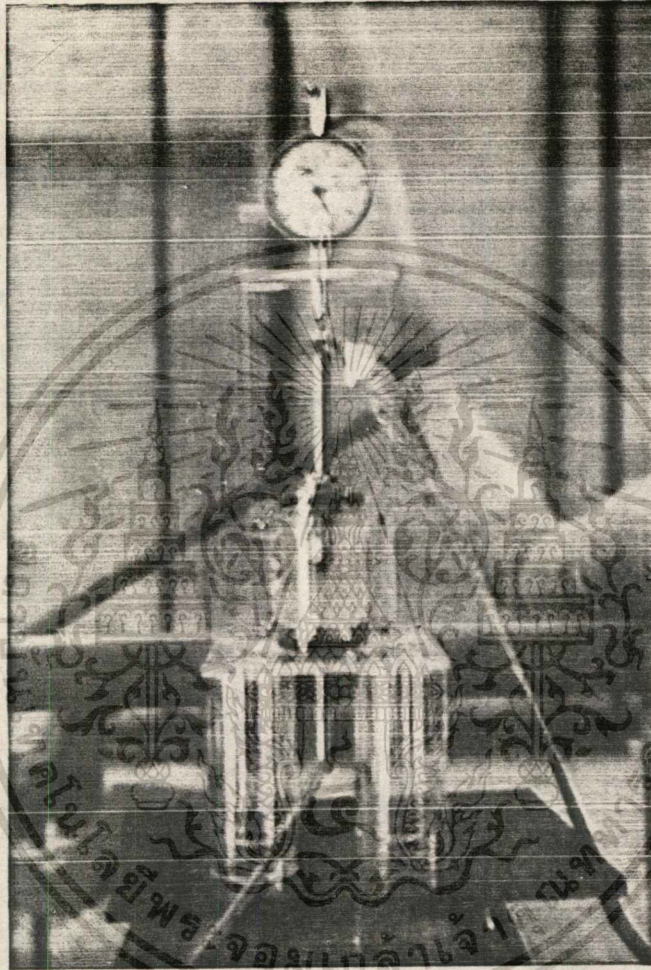


รูปที่ 3.1. ชุดอุปกรณ์หน่วยควบคุมแรงดัน



รูปที่ 3.2. ชุดอุปกรณ์วัดสัญญาณไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3. ชุดอุปกรณ์ทดสอบนวนเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4. ชุดเครื่องกำเนิดแรงดันกระแสดตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายส่ง ช่วยลดปรากฏการณ์โคโรน่าในระบบ

3.2 หน่วยควบคุมแรงดันไฟฟ้า

หน่วยควบคุมแรงดันไฟฟ้าได้ถูกแยกออกจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งเป็นส่วนอันตรายอยู่นอกห้อง เพื่อให้เกิดความปลอดภัยแก่ผู้ทดลอง เป็นอุปกรณ์ควบคุมการทำงานที่ใช้ภายในอาคารโดยมีไฟเข้าและไฟออกเป็น 10 , 50Hz , 220 V ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ดังนี้ AC Voltmeter พิกัด 0-300 V class 2.5 สำหรับดูไฟเข้าและจ่าย ไปยังเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูง AC ammeter พิกัด 0.50 A class 1.5 สำหรับดูกระแสเข้าตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูง DC VOLTMETER พิกัด 0-600 KV CLASS 1.5 สำหรับดูแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่ออกมาจากตัว เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูง DC AMMETER พิกัด 0-10 ma class 1.5 สำหรับดูกระแสที่ไหลของตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง นอกจากนี้บนแผงควบคุมยังประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่บ่งสภาวะที่กำลังใช้งาน เช่น อุปกรณ์ตัดต่อระบบไฟฟ้า , อุปกรณ์ป้องกันความปลอดภัยในการใช้งาน

3.3 ชุดภาชนะทดสอบ

เลือกใช้วัสดุตามข้อกำหนดในมาตรฐาน IEC PUBL 156 เกี่ยวกับชุดภาชนะทดสอบในการทดลองนี้ตัวภาชนะประกอบจากอะคริลิก (ACRYLIC) เป็นสารในจำพวกพลาสติกแข็งแรง ทนแรงดัน และอุณหภูมิได้สูง ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำมันทดสอบ มีลักษณะโปร่งใสเหมือนแก้ว สามารถมองเห็นปรากฏการณ์ของการเบรคดาวน์ได้ดี ภายในหลอดอะคริลิกประกอบไปด้วยแกนทองเหลือง 2 ส่วน ส่วนแรกจะเป็นทองเหลืองแบบแผ่นราบ ส่วนสองจะเป็นทองเหลืองปลายแหลม โดยส่วนทองเหลืองแผ่นราบจะติดอยู่กับที่ ส่วนที่เป็นปลายแหลมจะสามารถปรับเลื่อนเข้าเลื่อนออกได้ เพื่อการปรับระยะแถบได้ในช่วง

0.1-25 มม. ดังรูป

3.4 ชุดอุปกรณ์เครื่องมือวัด

อุปกรณ์ที่ใช้นี้ควรมีความละเอียดสูงมาก เครื่องมือวัดประกอบด้วย ซิงค์โคสโคป (SYNCHROSCOPE) เครื่องมือวัดความดันบรรยากาศ (BAROMETER) เครื่องมือวัดความชื้น (HYGRÖMETER) เครื่องมือวัดอุณหภูมิ (TERMOMETER) และเครื่องมือวัดระยะแกป (DIALLING MICROMETER)

3.5 การวัดระยะแกป

การวัดระยะแกปสามารถวัดจากภายนอกขณะทดสอบด้วยไดออลลิงไมโครมิเตอร์วัดได้ช่วง 0.01-30 มม. มีความแม่นยำประมาณ 0.01 มม. โดยให้แกนเลื่อนของเครื่องวัดสัมผัสกับปลายของแกนทองเหลือง ทำหน้าที่ยึดอิเล็กโตรดด้านที่ต่อลงดินตลอดเวลาด้วยแรงดันจากสปริงในเครื่องวัด แกนเลื่อนดังกล่าวติดอยู่กับเข็มหน้าปัดโดยตรงผ่านกลไกทางแมคคานิกของเครื่องวัด ทำให้เข็มหมุนตามระยะแกปที่เลื่อนในการวัดกระทำได้โดยการทำให้ผิวของอิเล็กโตรดทั้งสองติดกัน จากนั้นก็หมุนแกนอิเล็กโตรดด้านต่อลงดินไปตามระยะที่ต้องการ

3.6 ระบบอิเล็กโตรด

อิเล็กโตรดที่ 17 ในการทดลองนี้ประกอบไปด้วยอิเล็กโตรดที่มีรูปทรงเรขาคณิตที่แตกต่างกันออกไป ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.6.1 อิเล็กโตรดแบบจุด (POINT)

กำหนดตามมาตรฐาน ASTM D-3300-85 กำหนดอิเล็กโตรดแบบจุดมีขนาดบริเวณปลายสุดกว้าง 0.06 mm+20 %

3.6.2 อิเล็กโตรดแบบจานกลม

กำหนดตามมาตรฐาน ASTM D-877-84(a) กำหนดให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางจานกลม 25 มม. หรือ 1 นิ้ว มีความหนาน้อยกว่า 4 มม. หรือ

0.16 นิ้ว และบริเวณขอบเป็นเหลี่ยมและทำจากทองเหลือง

3.7 วิธีการทดลอง

ในการวัดแรงดันเบรคดาวน์หรือความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลว มีการคาดเคลื่อนอย่างมากต่อสิ่งแปลกปลอม ซึ่งมีโอกาสเกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นในขั้นตอนนี้ควรคำนึงถึงความสะอาด กระทำทุกขั้นตอนด้วยความระมัดระวัง เพื่อลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในขณะทดลองสามารถแยกขั้นตอน และเทคนิคในการทดลองดังต่อไปนี้

3.7.1 การเตรียมชุดภาชนะทดสอบ

เมื่อเราสร้างชุดภาชนะทดสอบแล้วควรตรวจสอบรอยรั่วซึม ซึ่งต้องระวังมากเนื่องจากในขณะเบรคดาวน์ของฉนวนเหลวจะมีความเครียด เนื่องจากสนามไฟฟ้าและความดันภายในภาชนะจะสูงน้ำมันจะไหลซึมออกมา เมื่อแน่ใจว่าไม่พบรอยรั่วซึม ควรล้างและทำความสะอาดโดยใช้เบนซิน และ เอทเชน เนื่องจากเป็นตัวทำลายที่ดี และนำภาชนะไปตากแดด เพื่อกำจัด ความชื้นถ้าไม่ได้ใช้ชุดภาชนะทดสอบ ควรบรรจุน้ำมันเบนซินให้เต็ม นอกจากนี้ควรเก็บไว้ในที่ปราศจากฝุ่นละออง

3.7.2 การวัดแรงดันเบรคดาวน์ของฉนวนเหลว

เมื่อเตรียมขั้นตอนเรียบร้อยแล้ว บ้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเข้า ที่ขั้วอิเล็กโตรดทางด้านไฟฟ้าแรงสูง จากนั้นปรับแรงดันไฟฟ้าด้วยอัตราเร็ว 2 kV/sec จากนั้นสังเกตเข็มของมิลลิแอมมิเตอร์ จะไหลอย่างรวดเร็ว และ เข็มของโวลต์มิเตอร์จะตกลงในขณะเกิดการสปาร์คครั้งแรกข้างช่องว่าง ซึ่ง เราถือว่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการสปาร์คครั้งแรกว่า แรงดันเบรคดาวน์ของ ฉนวนเหลว ทำการวัดแรงดันเบรคดาวน์ประมาณ 5-20 ครั้งในแต่ละจุด สำหรับเทคนิคในการทดลองควรบ้อนแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดเพื่อให้

น้ำมันปรับตัวประมาณ 5 นาที ณ ระดับแรงดัน 1 KV เพื่อกำจัดฟองอากาศก่อน
การทดลอง



บทที่ 4

ผลการทดลอง และ วิจารณ์

4.1. การทดสอบ

จากการศึกษาผลของการเบรคดาว์น ของฉนวนเหลวสามารถแยกลักษณะการทดลองได้เป็นดังต่อไปนี้

การทดลองที่ 1 ศึกษาปรากฏการณ์เบรคดาว์นของน้ำมันหม้อแปลง โดยใช้อิเล็กโตรดแบบจุด-พื้นระนาบ (point-plane) แบบปลายแหลมซี่บวก และ ปลายแหลมซี่ลอบโดยใช้ point และ plane เป็นอิเล็กโตรดที่ทำจากทองเหลือง

การทดลองที่ 2 ศึกษาปรากฏการณ์เบรคดาว์นของน้ำมันถั่วเหลือง โดยใช้อิเล็กโตรดแบบจุด-พื้นระนาบ (point-plane) แบบปลายแหลมซี่บวก และ ปลายแหลมซี่ลอบโดยใช้ point และ plane เป็นอิเล็กโตรดที่ทำจากทองเหลือง

การทดลองที่ 3 ศึกษาปรากฏการณ์เบรคดาว์นของน้ำมันหม้อแปลง โดยใช้อิเล็กโตรดแบบจุด-พื้นระนาบ (point-plane) แบบปลายแหลมซี่บวก และ ปลายแหลมซี่ลอบโดยใช้ point ที่ทำจากทองเหลือง และ plane ที่ทำจากปรอท

การทดลองที่ 4 ศึกษาปรากฏการณ์เบรคดาว์นของน้ำมันถั่วเหลือง โดยใช้อิเล็กโตรดแบบจุด-พื้นระนาบ (point-plane) แบบปลายแหลมซี่บวก และ ปลายแหลมซี่ลอบโดยใช้ point ที่ทำจากทองเหลือง และ plane ที่ทำจากปรอท

ในการทดสอบต้องทดสอบความพร้อมของอุปกรณ์ที่ใช้ทดลองโดยเพื่อที่จะ

ปรับชุดการทดลองโดยใช้น้ำมันหม้อแปลง และ น้ำมันพืช เพื่อให้เกิดความคุ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคย ความปลอดภัย เข้าใจธรรมชาติโดยทั่วไปของปรากฏการณ์ก่อนการเบรคดาวน ในขณะเกิดการเบรคดาวน และ หลังการเบรคดาวนในฉนวนเหลว

การทดลองที่ 1

เป็นการศึกษาปรากฏการณ์เบรคดาวนของน้ำมันหม้อแปลง ในลักษณะอิเล็กโตรดแบบ point-plane โดยการเปลี่ยนระยะแคบที่ระยะต่างๆซึ่งในการทดลองนี้จะปรับแคบที่ระยะแคบน้อยเพราะผลจากการที่แท่งอิเล็กโตรดปลายแหลมมีขนาดไม่ใหญ่มาก ถ้าปรับระยะแคบให้มากเกินไปจะเกิดปรากฏการณ์โคโรนาที่แท่งอิเล็กโตรดทำให้มีการสูญเสียจะเกิดการเบรคดาวนได้ยาก ผลที่ได้จากการทดสอบ

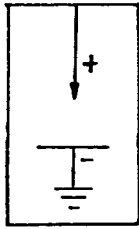
ลักษณะของอิเล็กโตรด	ระยะแคบ (m.m.)	แรงดันเบรคดาวน 6 ครั้ง (K.V.)						ค่าเฉลี่ย
ปลายแหลมขั้วบวก (Positive Needle)	1.0	3	5	4	6	4	5	4.50
	1.5	7	9	11	8	9	10	9.00
	2.0	13	14	15	15	16	14	14.50
	2.5	19	20	21	18	20	19	19.50
ปลายแหลมขั้วลบ (Negative Needle)	1.0	7	8	6	7	6	6	6.67
	1.5	10	12	11	10	9	10	10.33
	2.0	15	17	20	19	18	18	17.83
	2.5	25	26	27	26	28	27	26.50

ตารางที่ 4.1. แสดงแรงดันเบรคดาวน กับ ระยะแคบที่เปลี่ยนแปลงไป โดยใช้

อิเล็กโตรดแบบปลายแหลมขั้วบวก และ ปลายแหลมขั้วลบที่ทำจากทองเหลือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

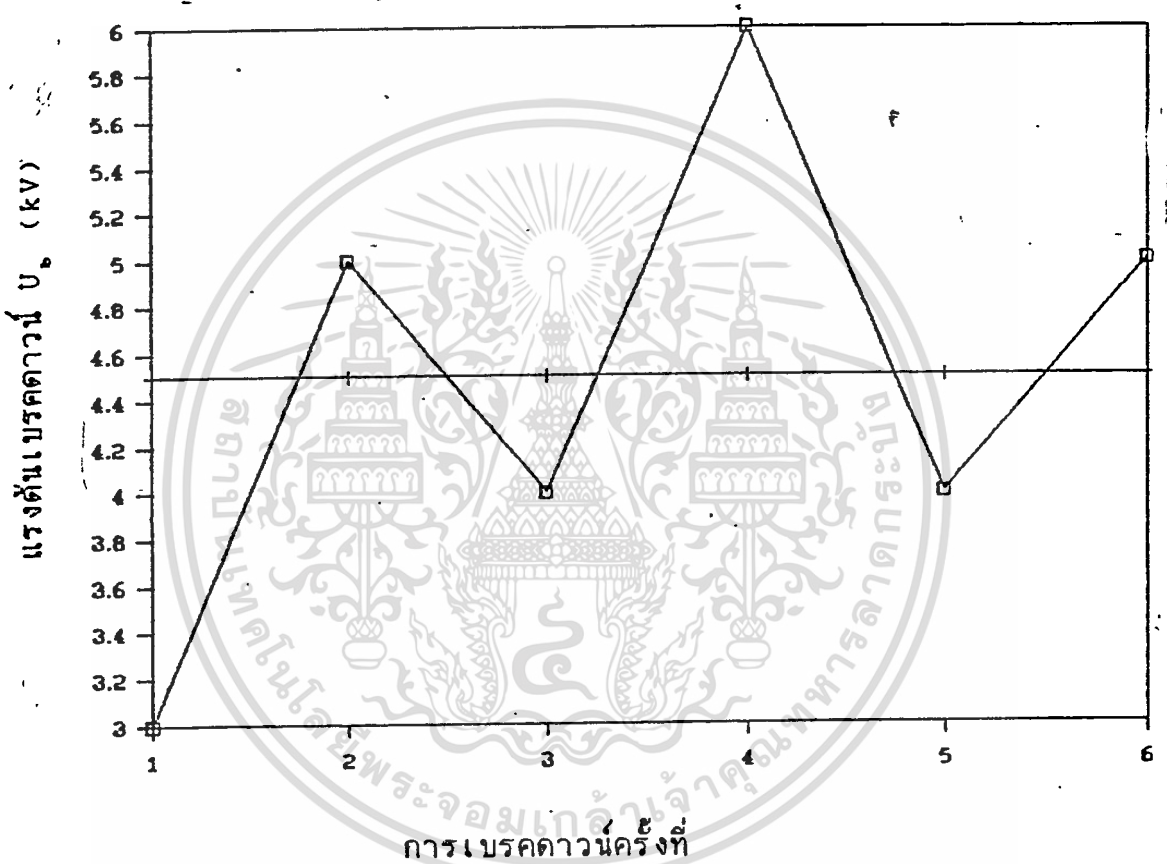
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



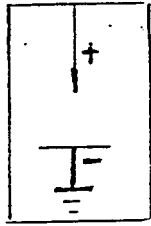
ระยะแกป = 1 มม.

μ = 4.5 kV.

σ = 0.96 kV.



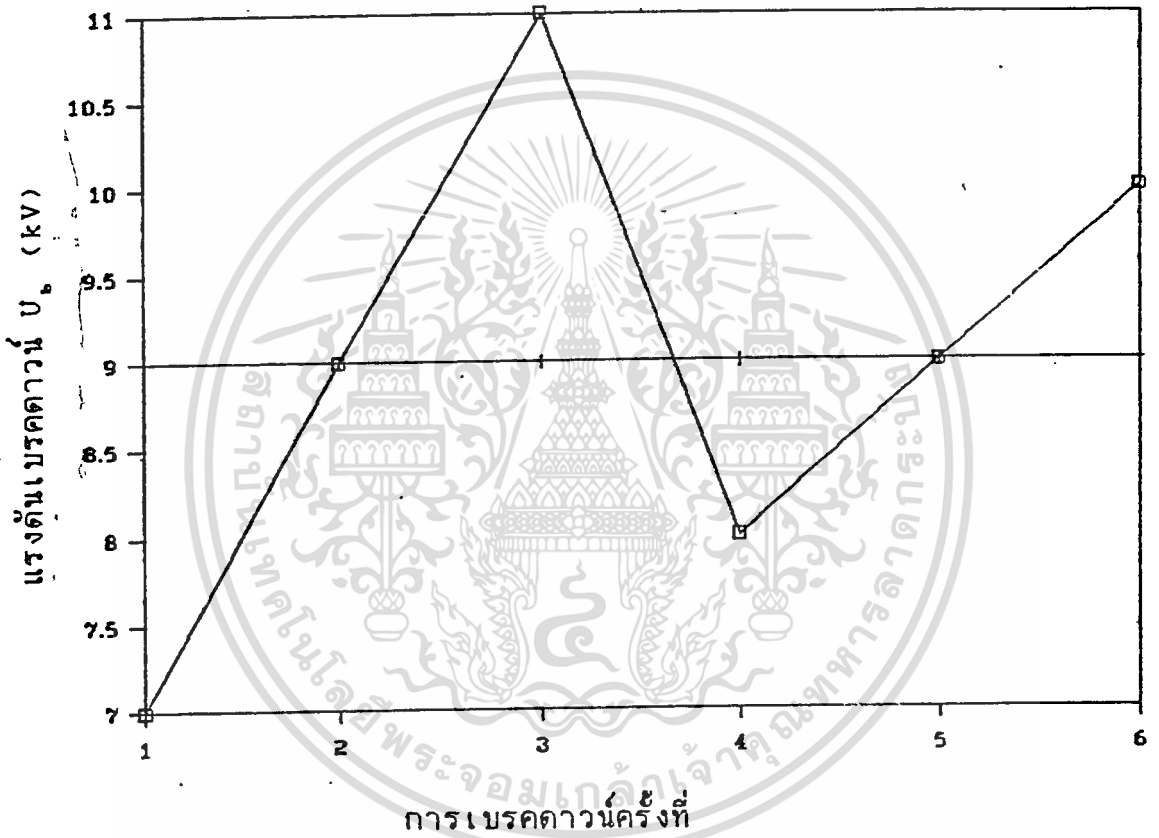
กราฟที่ 4.1.1. แสดงแรงดันเบรคดาวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์ โดยอิเล็กโตรดแบบจุด-พื้นระนาบ ทำจากทองเหลือง



ระยะแกน = 1.5 ม.ม.

μ = 9 kV.

6n = 1.29 kV.

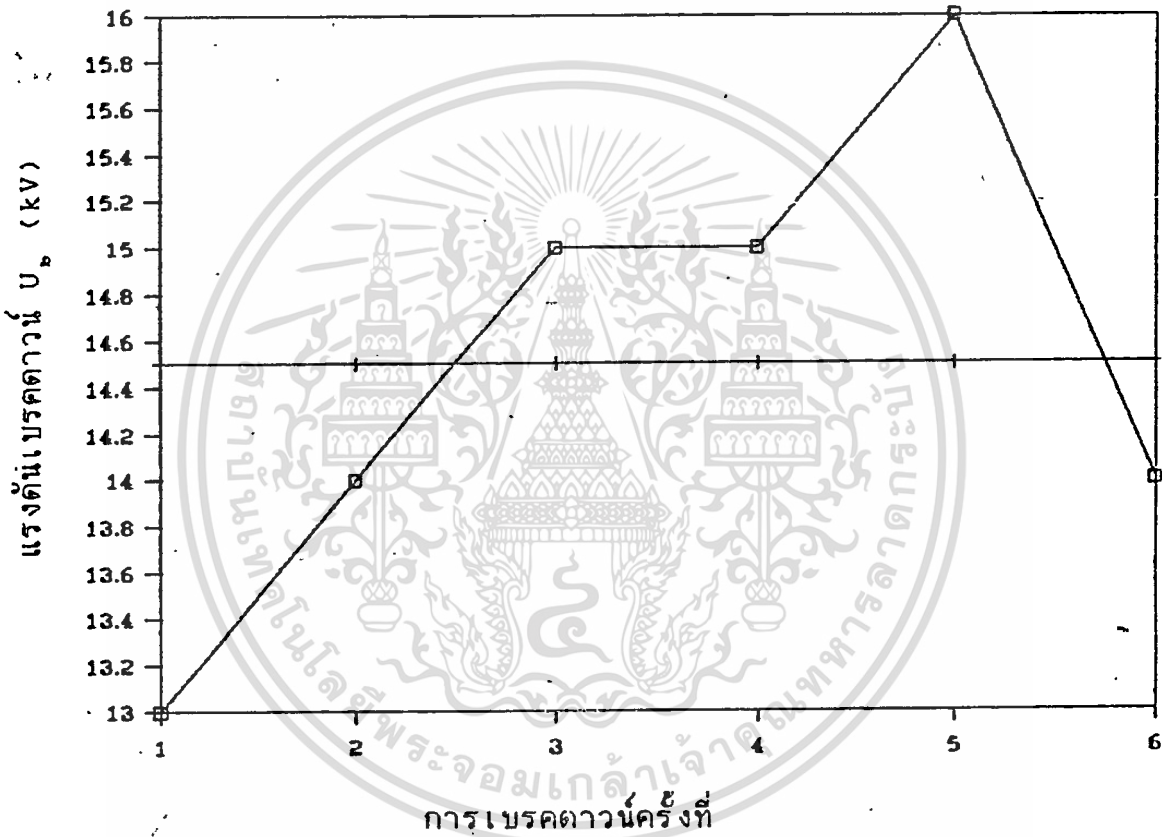
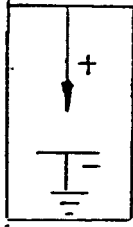


กราฟที่ 4.1.2. แสดงแรงดันเบรคดาวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าศาลเท็กซ์ โดยอิเล็กโตรดแบบจุด-พื้นระนาบ ทำจากทองเหลือง

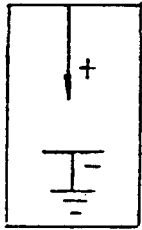
ระยะแกป = 2 มม.

μ = 14.50 kV.

ϕ_n = 0.96 kV.



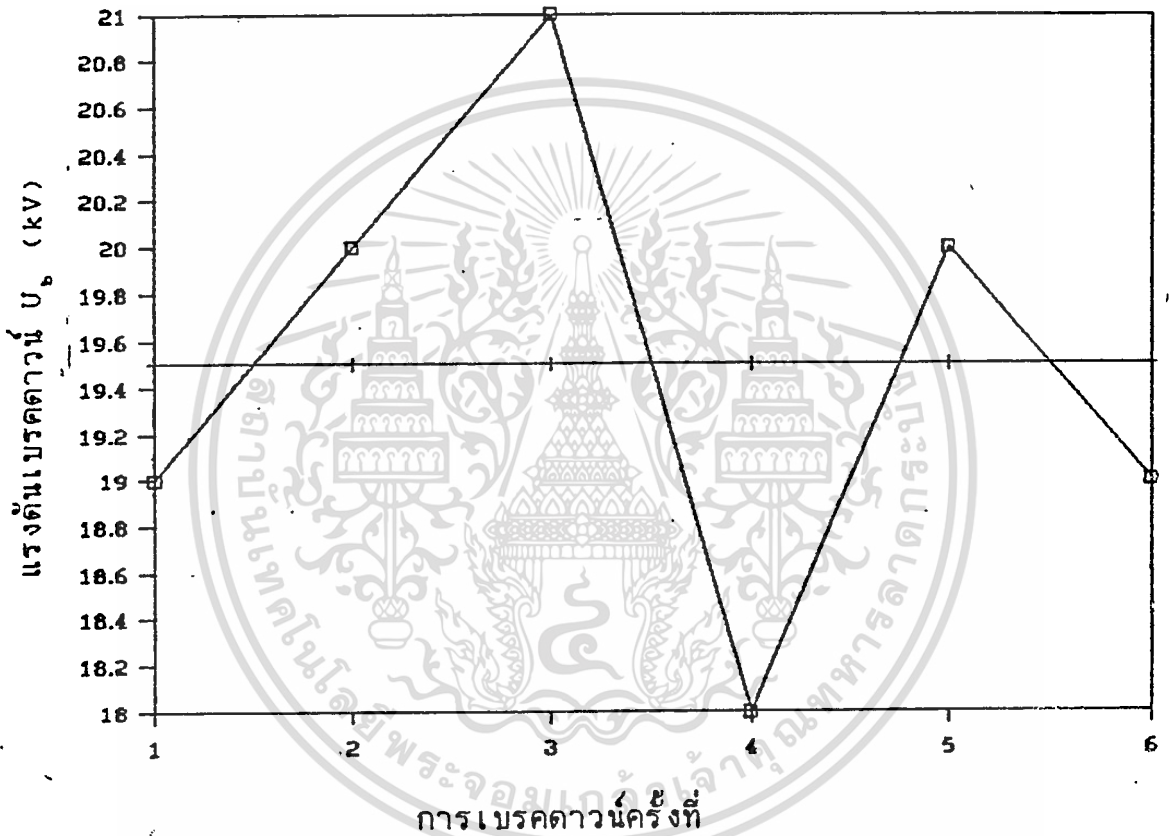
กราฟที่ 4.1.3. แสดงแรงดันเบรคดาวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้ากาลเท็คซ์ โดยอิเล็กทรอนิกส์แบบจุด-พื้นระนาบ ทำจากทองเหลือง



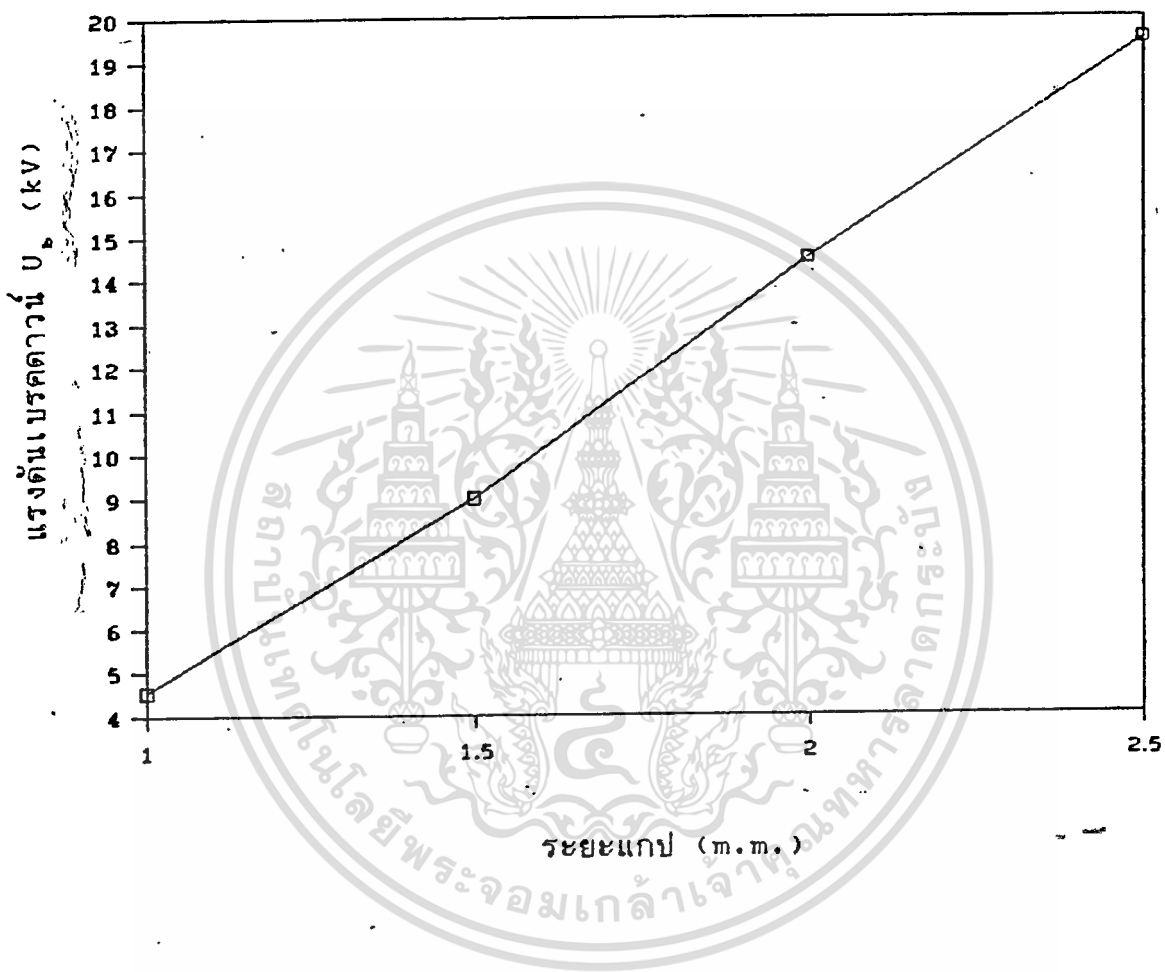
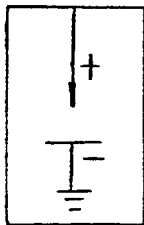
ระยะแกน = 2.5 ม.ม.

μ = 19.5 kV.

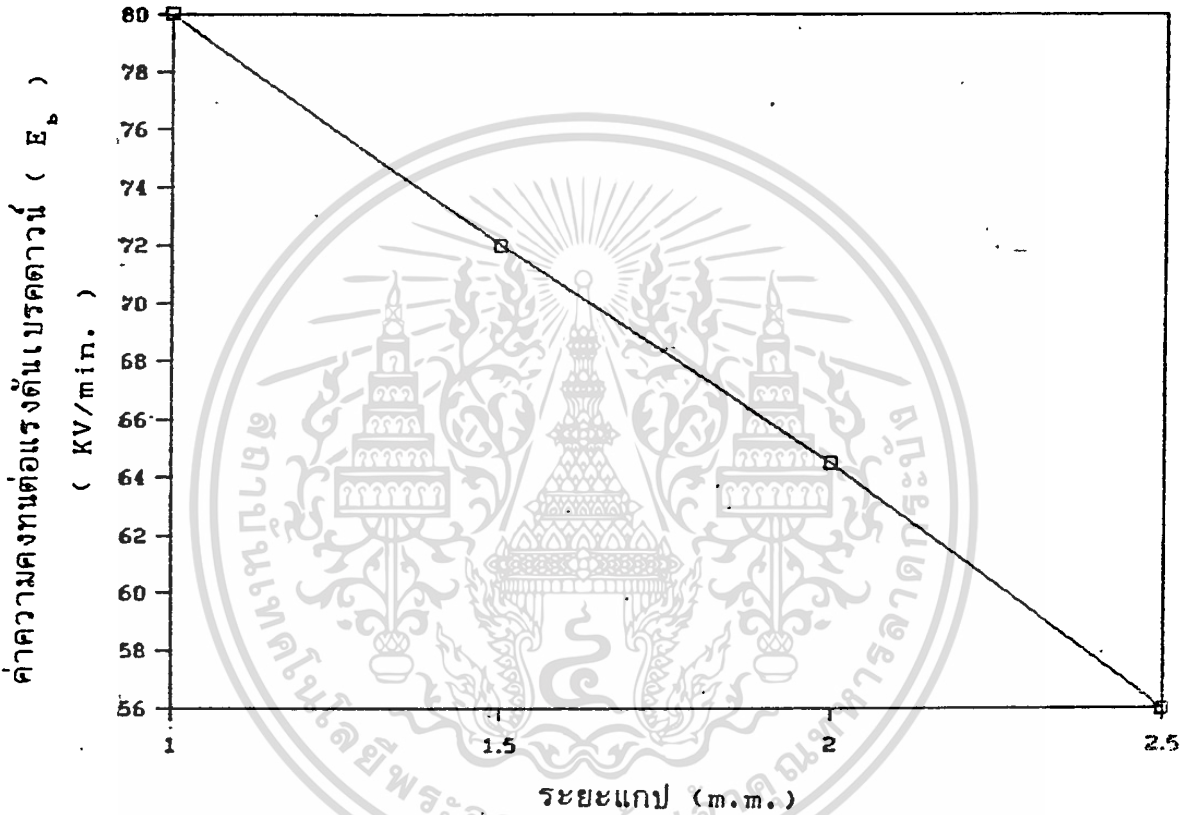
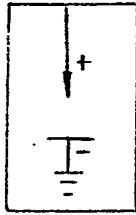
δn = 0.96 kV.



กราฟที่ 4.1.4. แสดงแรงดันเบรคความของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์ โดยอิเล็กทรอนิกส์แบบจุด-น๊อระนาบ ทำจากทองเหลือง



กราฟที่ 4.1.5. แสดงค่าแรงดันเบรคตาวาน์เฉลี่ยกับระยะแกปต่างๆ

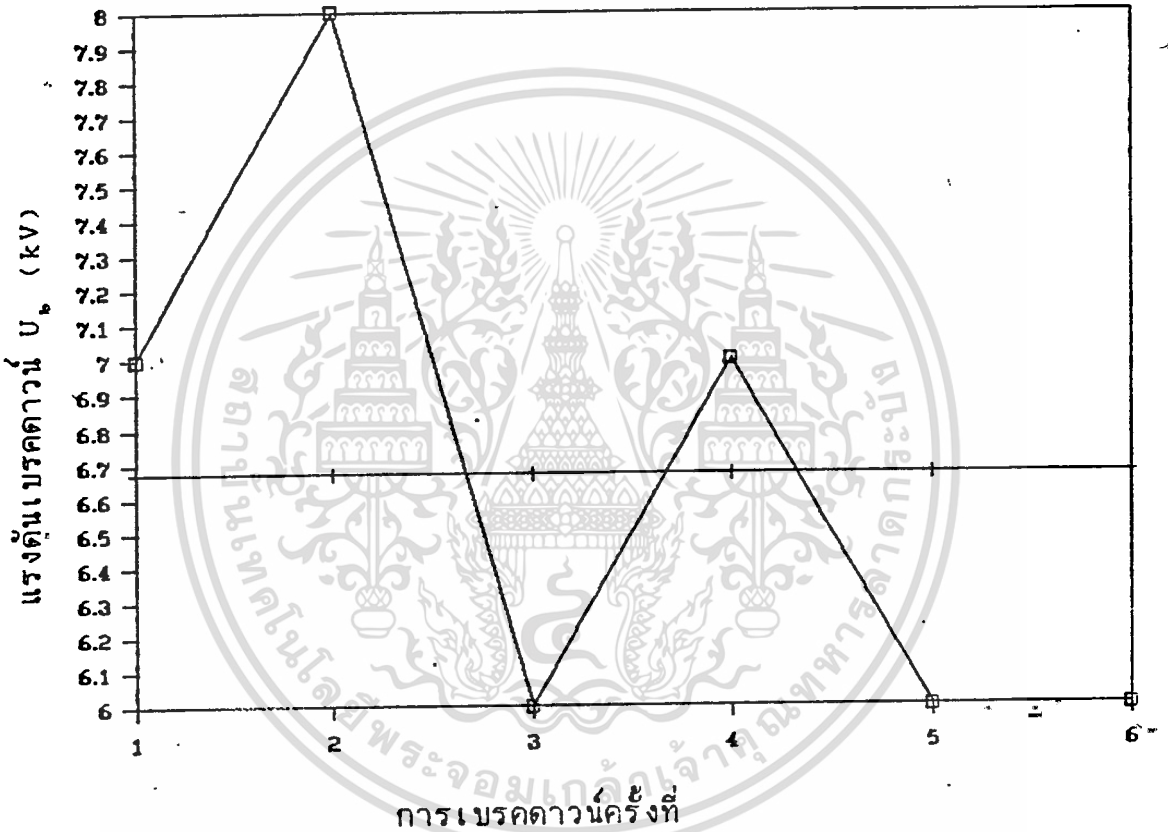
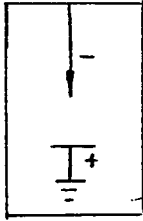


กราฟที่ 4.1.6. แสดงค่าความคงทนต่อแรงดันเบรคตาวร์น
กับระยะแก๊ปต่างๆ

ระยะแก๊ป = 1 มม.

μ = 6.67 kV.

δ_n = 0.53 kV.

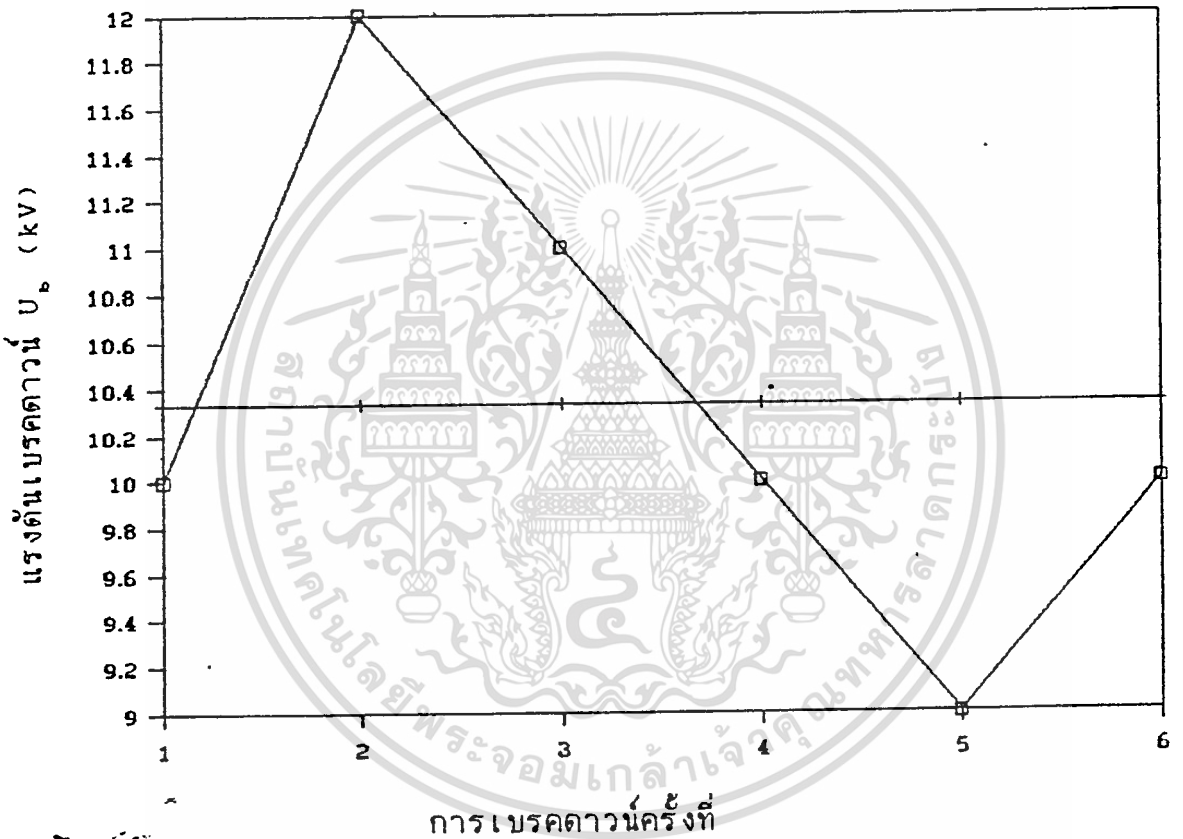
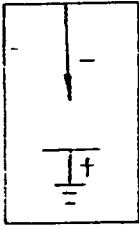


กราฟที่ 4.1.7. แสดงแรงดันเบรกดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์ โดยอิเล็กโตรดแบบจุด-พื้นระนาบ ทำจากทองเหลือง

ระยะแกป = 1.5 มม.

μ = 10.33 kV.

ϕ_n = 0.77 kV.

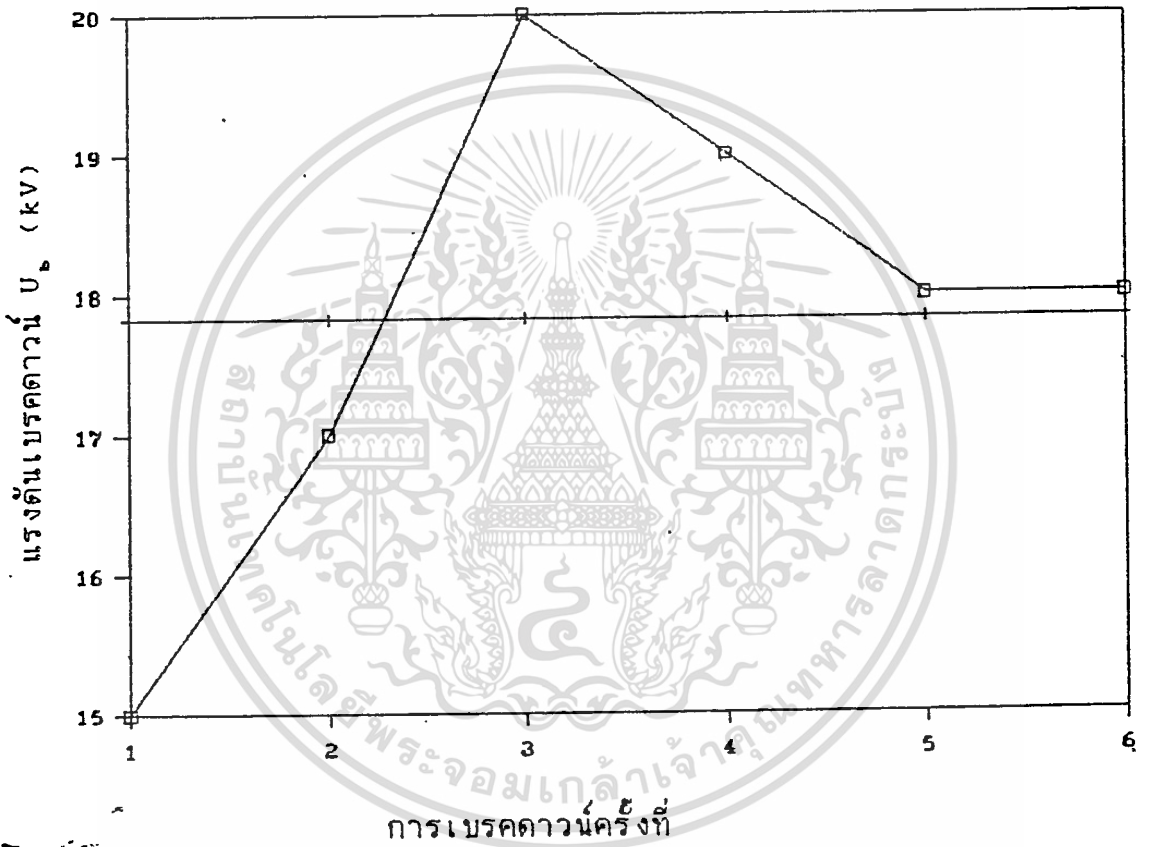
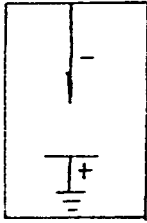


กราฟที่ 4.1.8. แสดงแรงดันเบรคดาวของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าศาลเท็กซ์ โดยอีเลคโตรดแบบจุด-พื้นระนาบ ทำจากทองเหลือง

ระยะแกป = 2 มม.

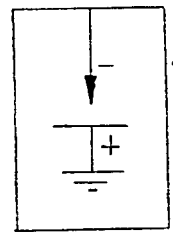
μ = 17.83 kV.

๕ก = 1.57 kV.



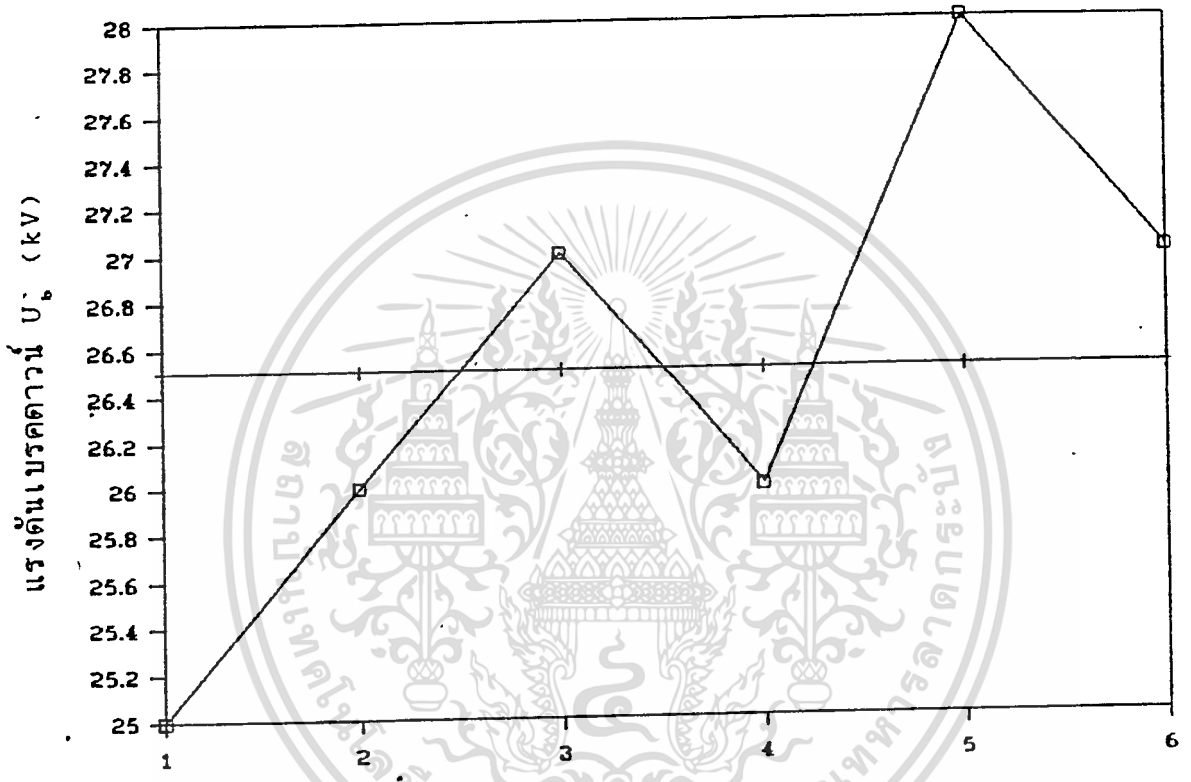
กราฟที่ 4.1.9. แสดงแรงดันเบรคตาว์นของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์ โดยอิเล็กโตรดแบบจุด-พื้นระนาบ ทำจากทองเหลือง

ระยะแกป = 2.5 ม.ม.



μ = 26.50 kV.

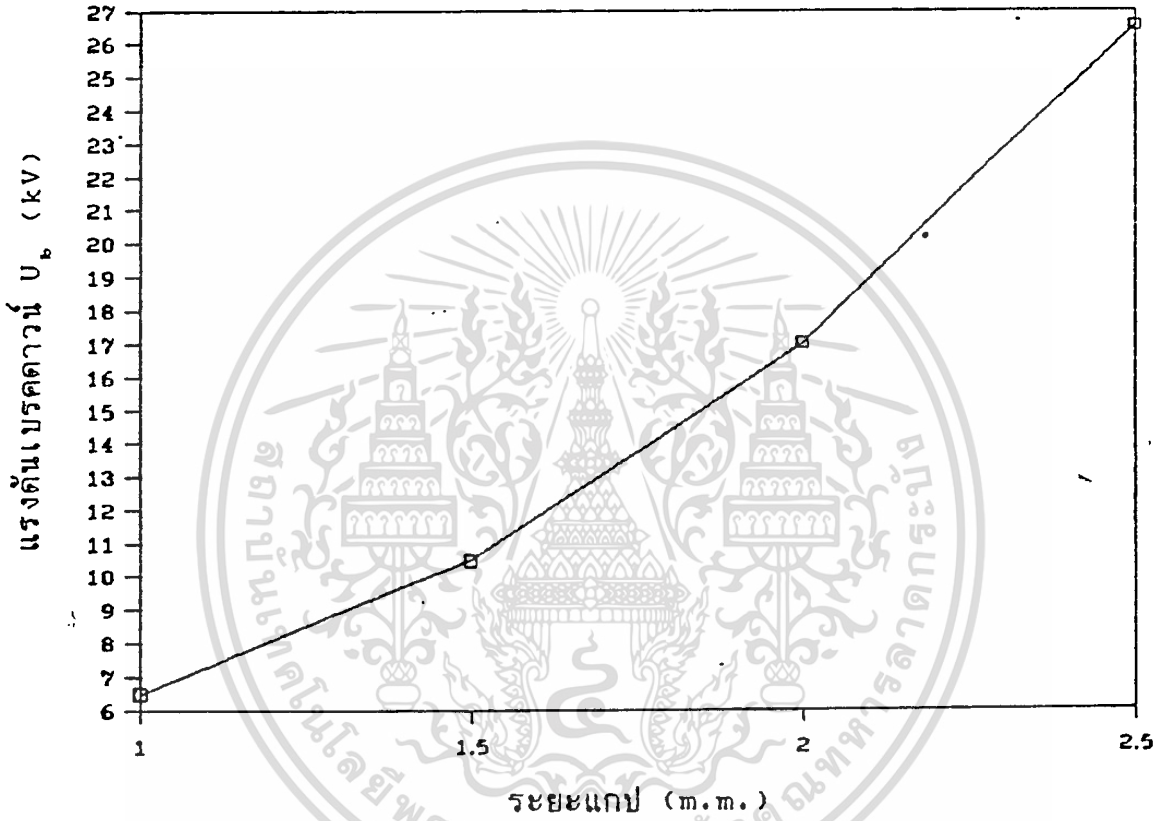
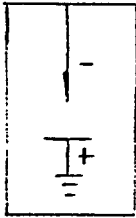
6ก = 0.96 kV.



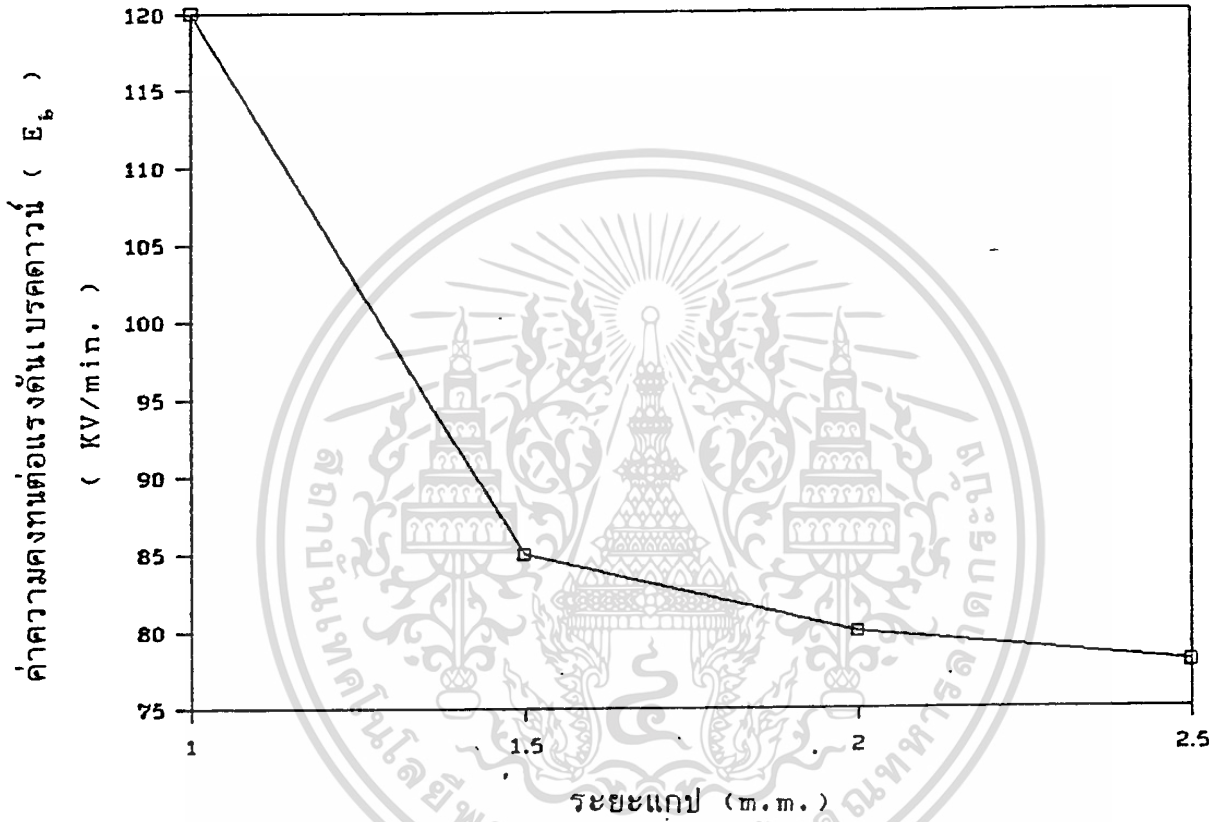
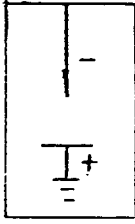
การเบรคดาวน์ครั้งที่

กราฟที่ 4.1.10. แสดงแรงดันเบรคดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์

โดยอิเล็กทรอนิกส์-พีระนาบ ทำจากทองเหลือง



กราฟที่ 4.1.11. แสดงค่าแรงดันเบรคตาวาน์เฉลี่ยกับระยะแกปต่างๆ



กราฟที่ 4.1.12. แสดงค่าความคงทนต่อแรงดัน เบรคดาวน์
กับระยะแกปต่างๆ

การทดลองที่ 2.

เป็นการศึกษาปรากฏการณ์เบรคดาวน์ของน้ำมันถั่วเหลือง ในลักษณะอิเล็กโตรดแบบ point-plane ที่ทำจากทองเหลือง ผลที่ได้จากการทดสอบ

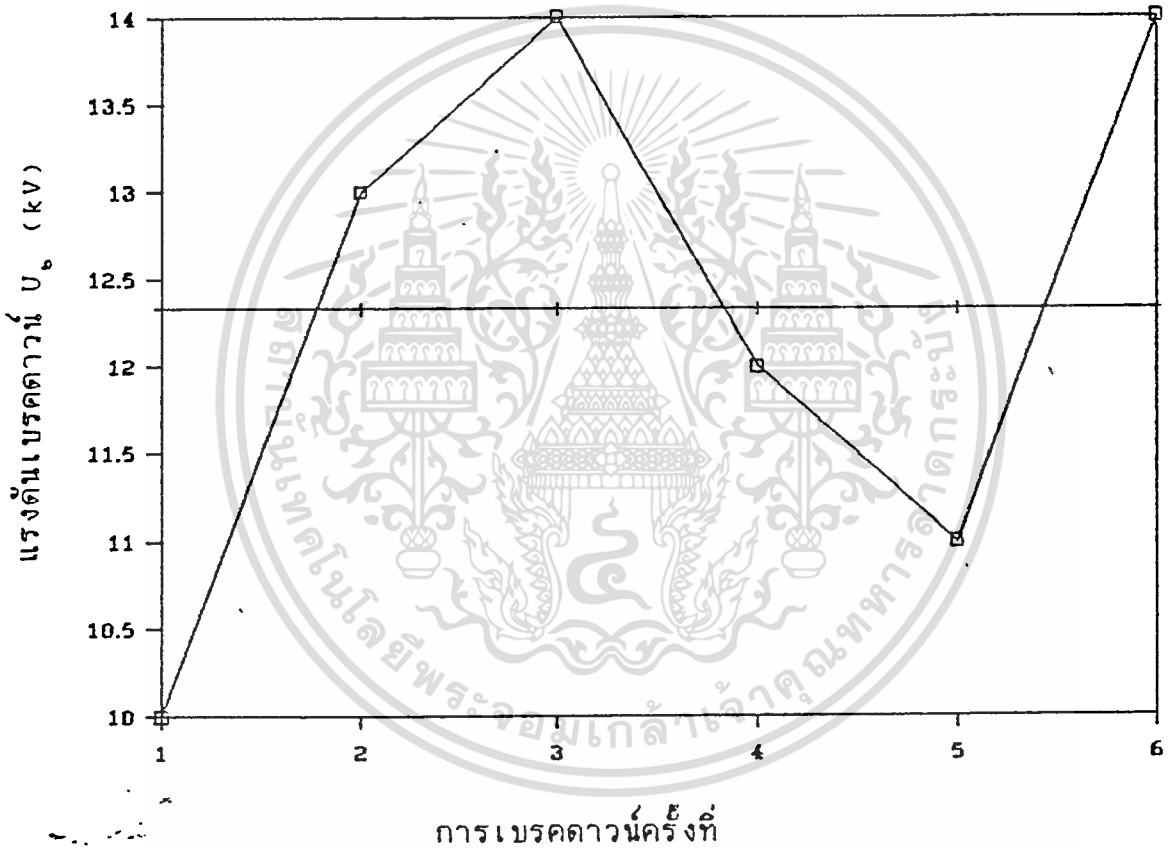
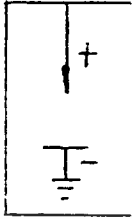
ลักษณะของอิเล็กโตรด	ระยะแกป (m.m.)	แรงดันเบรคดาวน์ 6 ครั้ง (K.V.)						ค่าเฉลี่ย
ปลายแหลมซี่บวก (Positive Needle)	1.0	10	13	14	12	11	14	12.33
	1.5	14	17	16	15	18	17	16.17
	2.0	19	18	19	21	20	20	19.50
	2.5	21	22	23	24	24	24	23.00
ปลายแหลมซี่ลบ (Negative Needle)	1.0	11	15	13	16	17	16	14.67
	1.5	17	21	22	19	20	21	20.00
	2.0	23	25	24	25	26	24	24.50
	2.5	28	30	31	29	28	30	29.33

ตารางที่ 4.2. แสดงแรงดันเบรคดาวน์ กับ ระยะแกปที่เปลี่ยนแปลงไป โดยใช้ อิเล็กโตรดแบบปลายแหลมซี่บวก และ ปลายแหลมซี่ลบที่ทำจากทองเหลือง

ระยะแกป = 1 ม.ม.

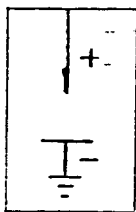
μ = 12.33 kV.

ϕ_n = 1.49 kV.



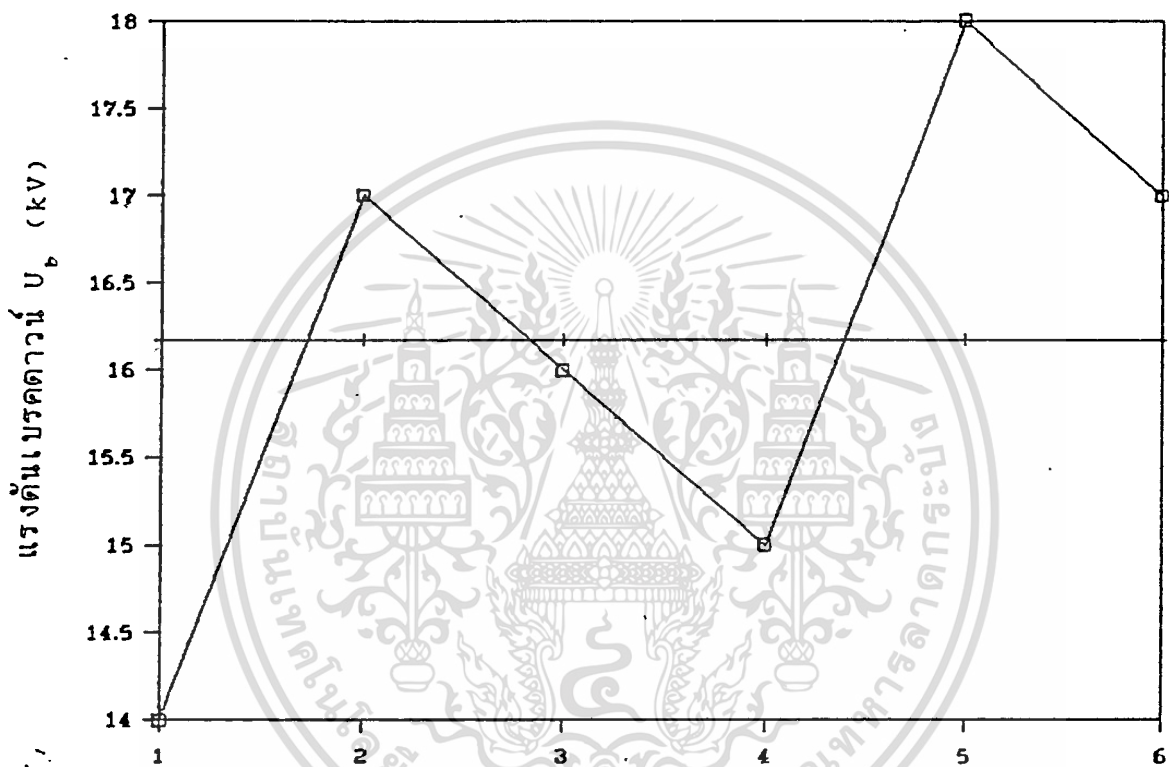
กราฟที่ 4.2.1. แสดงแรงดันเบรคตาวาน์ของน้ำมันถั่วเหลือง ทรายงุ่น โดยอิเล็กโตรดแบบจุด-พื้นระนาบ ทำจากทองเหลือง

ระยะแกป = 1.5 มม.



V_{μ} = 16.17 kV.

V_n = 1.30 kV.



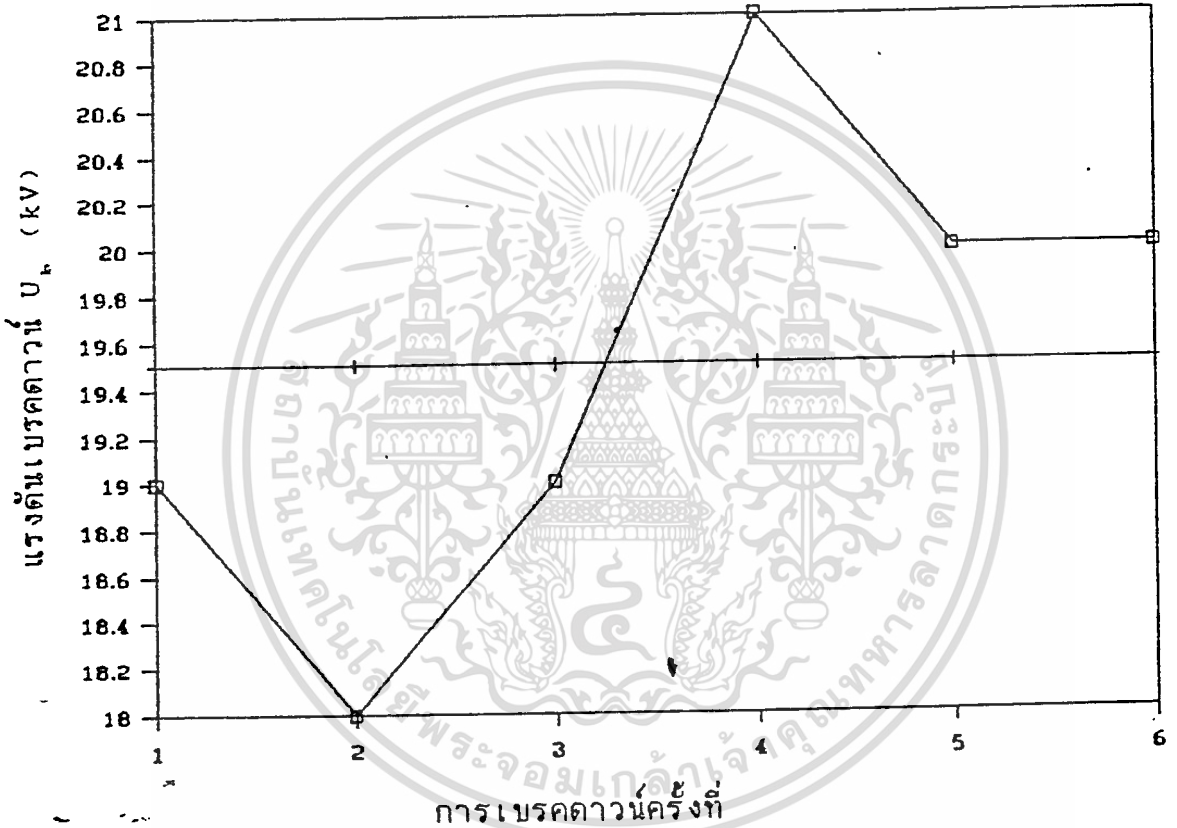
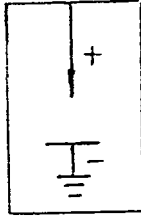
การเบรคตาวนครั้งที่

กราฟที่ 4.2.2. แสดงแรงดันเบรคตาวนของน้ำมันตัวเหลือง ทรายอู่น โดยอิเล็กโตรดแบบจุด-พื้นระนาบ ทำจากทองเหลือง

ระยะแถบ = 2 มม.

μ = 19.50 kV.

σ_n = 0.96 kV.

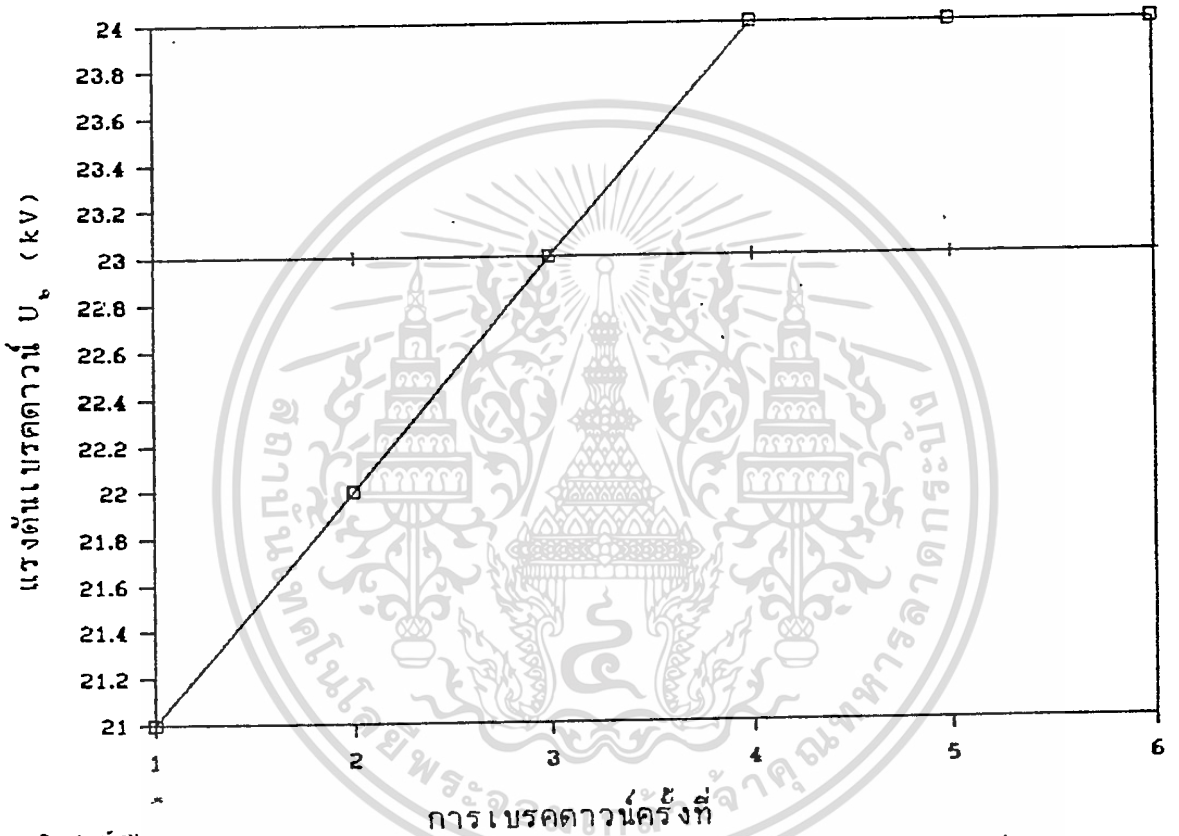
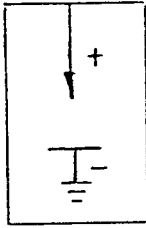


กราฟที่ 4.2.3. แสดงแรงดันเบรคตาวนของน้ำมันถั่วเหลือง ทรายงุ่น โดยอิเลคโตรดแบบจุด-พื้นระนาบ ทำจากทองเหลือง

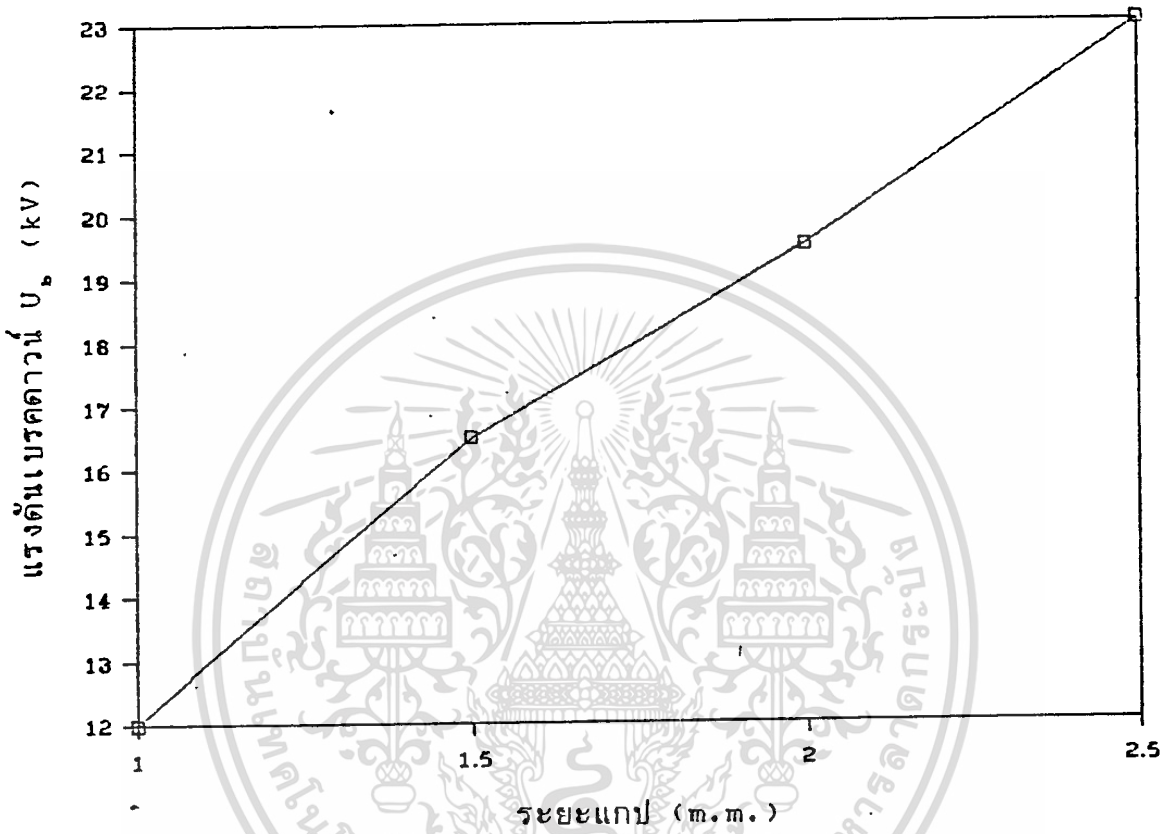
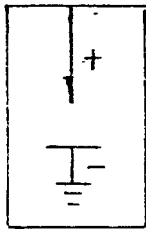
ระยะแกบ = 2.5 มม.

μ = 23.00 kV.

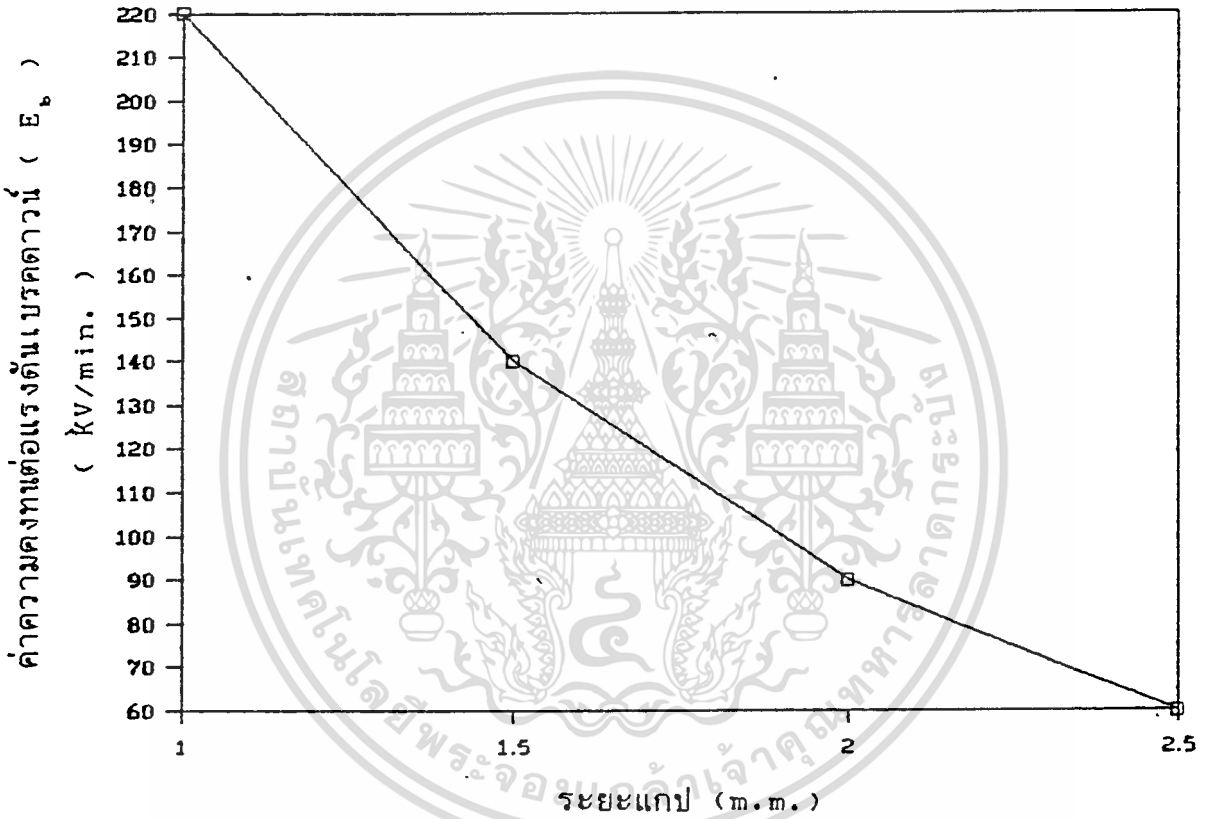
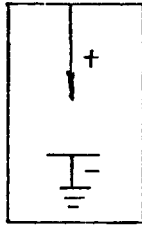
σ_k = 1.15 kV.



กราฟที่ 4.2.4. แสดงแรงดันเบรคตาวนของน้ำมันถั่วเหลือง ตราอู๋น โดยอิเล็กโตรดแบบจุด-พื้นระนาบ ทำจากทองเหลือง



กราฟที่ 4.2.5. แสดงค่าแรงดันเบรคดาวน์เฉลี่ยกับระยะแฉกต่างๆ

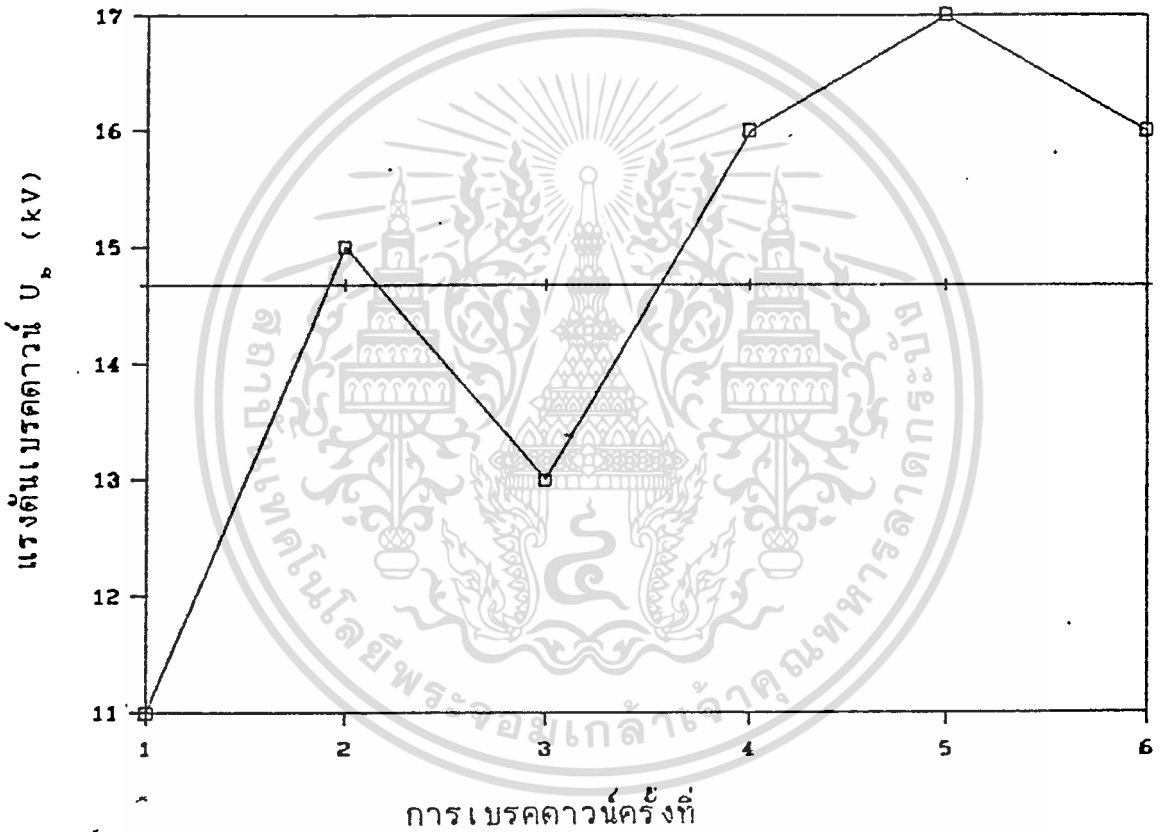
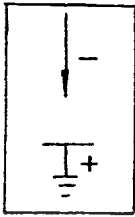


กราฟที่ 4.2.6. แสดงค่าความคงทนต่อแรงดันเบรคตาวน
กับระยะแกปต่างๆ

ระยะแกป = 1 มม.

μ = 14.67 kV.

ส่วน = 2.05 kV.

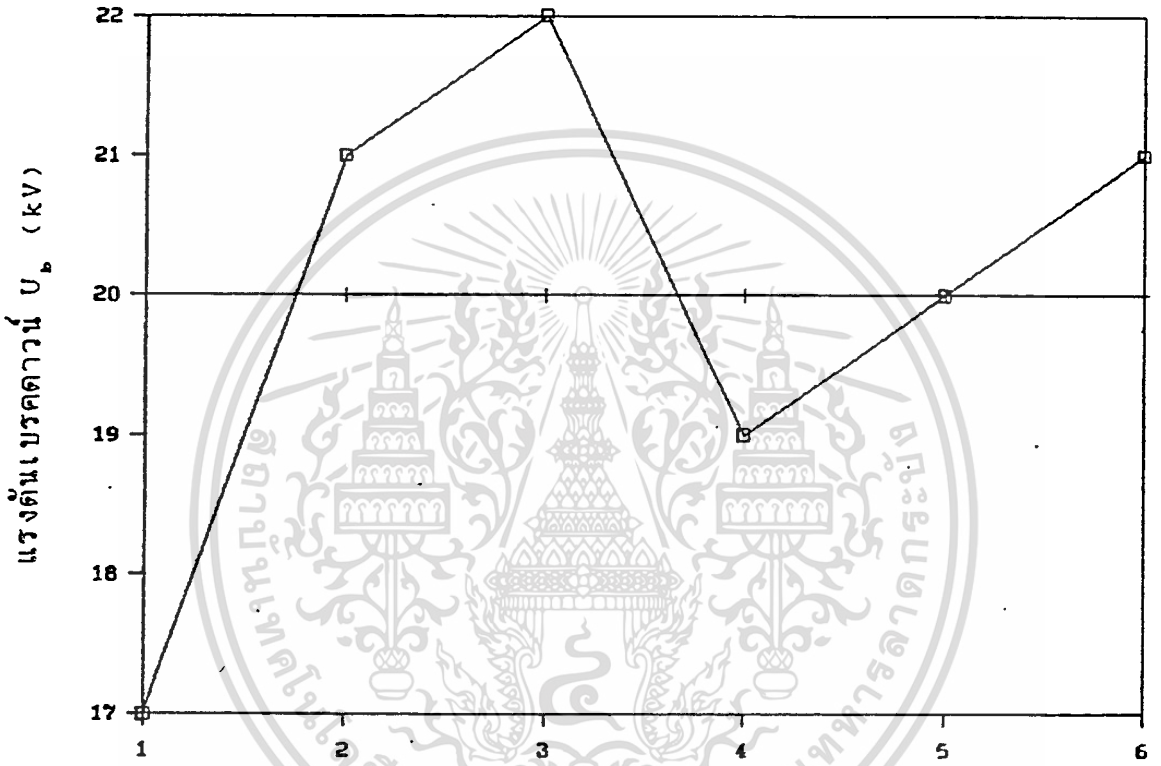
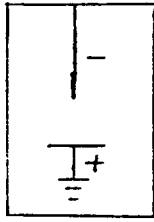


กราฟที่ 4.2.7. แสดงแรงดันเบรคดาวน์ของน้ำมันถั่วเหลือง ตราอู๋น โดยอิเล็กโตรดแบบจุด-พื้นระนาบ ทำจากทองเหลือง

ระยะแกน = 1.5 มม.

μ = 20.00 kV.

δn = 1.63 kV.



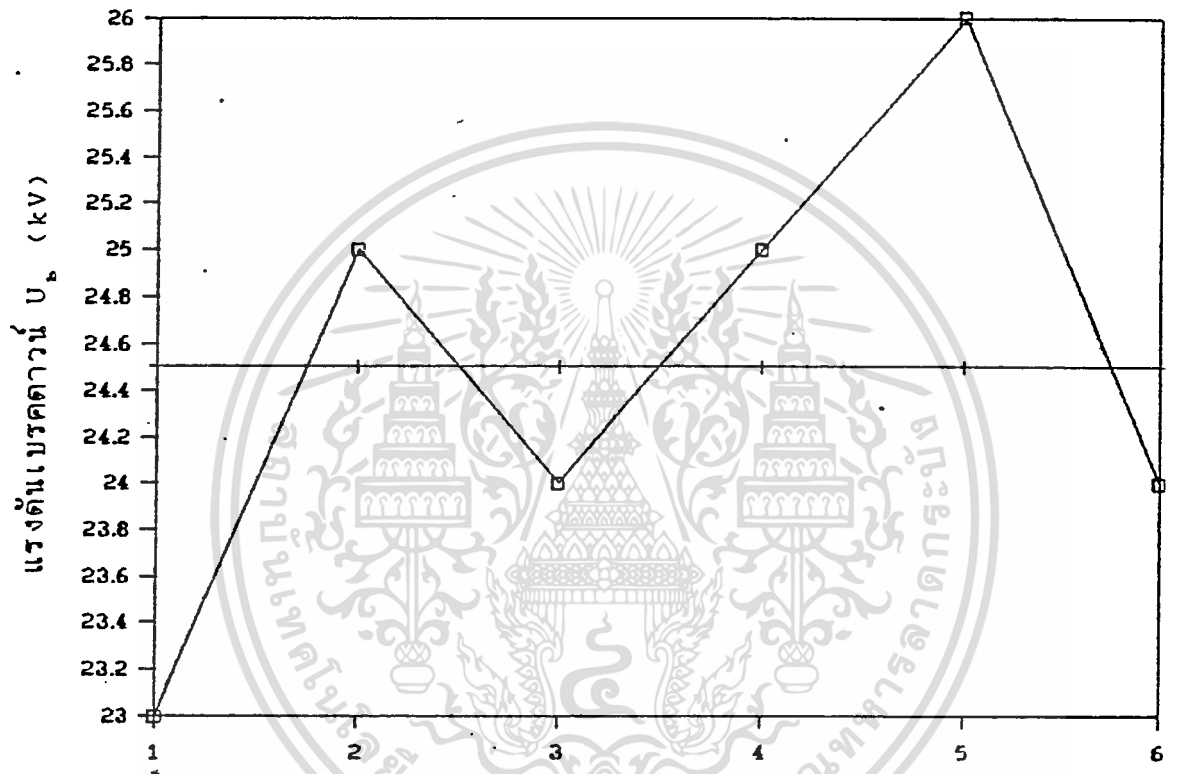
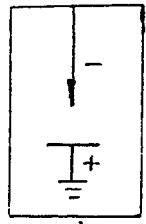
การเบรคดาวนครั้งที่

กราฟที่ 4.2.8. แสดงแรงดันเบรคดาวนของน้ำมันถั่วเหลือง ทรายอูน โดยอิเล็กโตรดแบบจุด-พื้นระนาบ ทำจากทองเหลือง

ระยะแถบ = 2 มม.

μ = 24.50 kV.

σ_n = 0.96 kV.



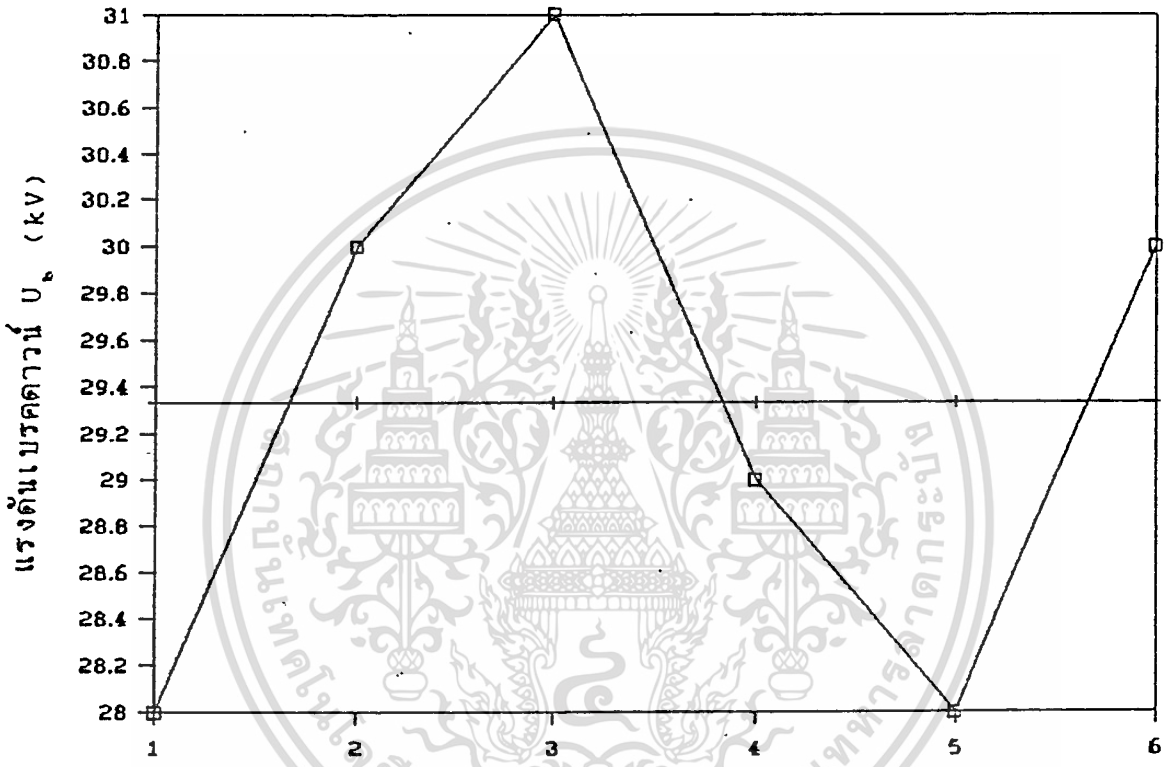
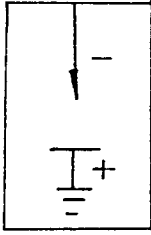
การเบรคดาวครั้งที่

กราฟที่ 4.2.9. แสดงแรงดันเบรคดาวของน้ำมันถั่วเหลือง ตราอู๋น โดยอิเล็กโตรดแบบจุด-พื้นระนาบ ทำจากทองเหลือง

ระยะแกป = 2.5 มม.

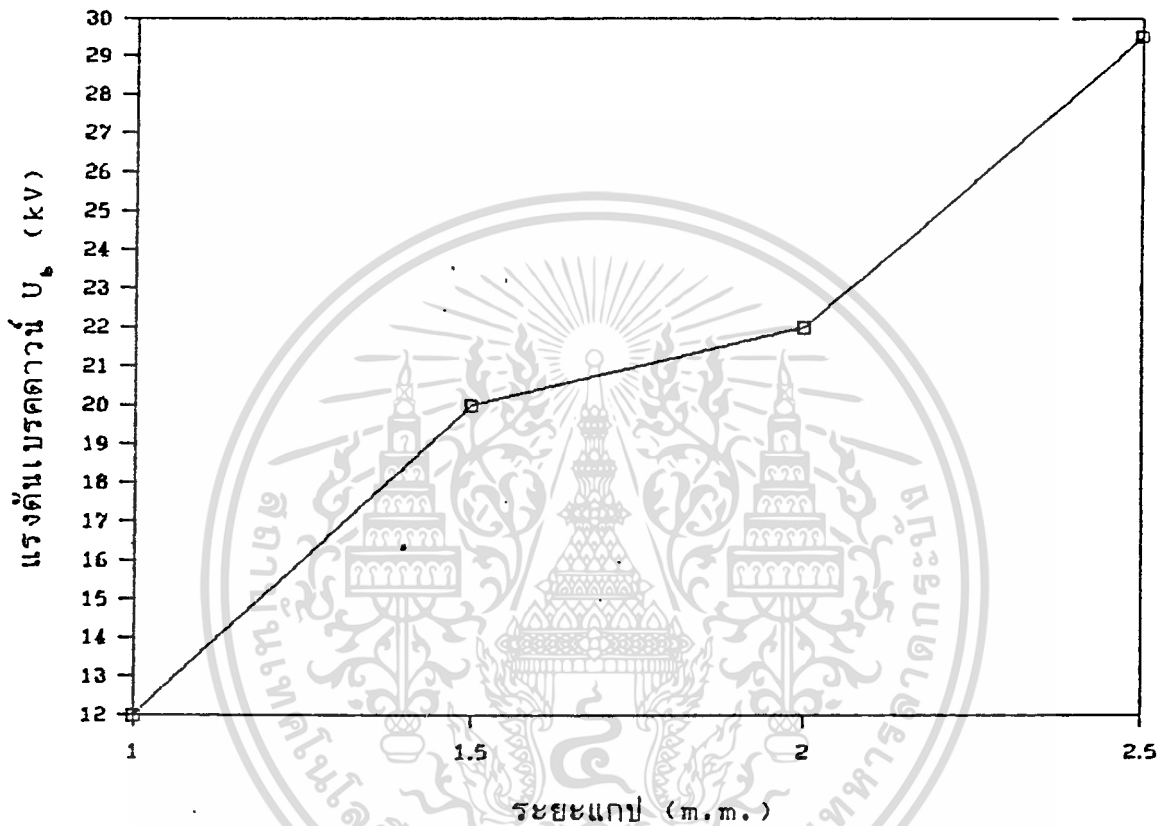
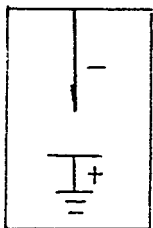
μ = 29.33 kV.

ϕn = 1.11 kV.

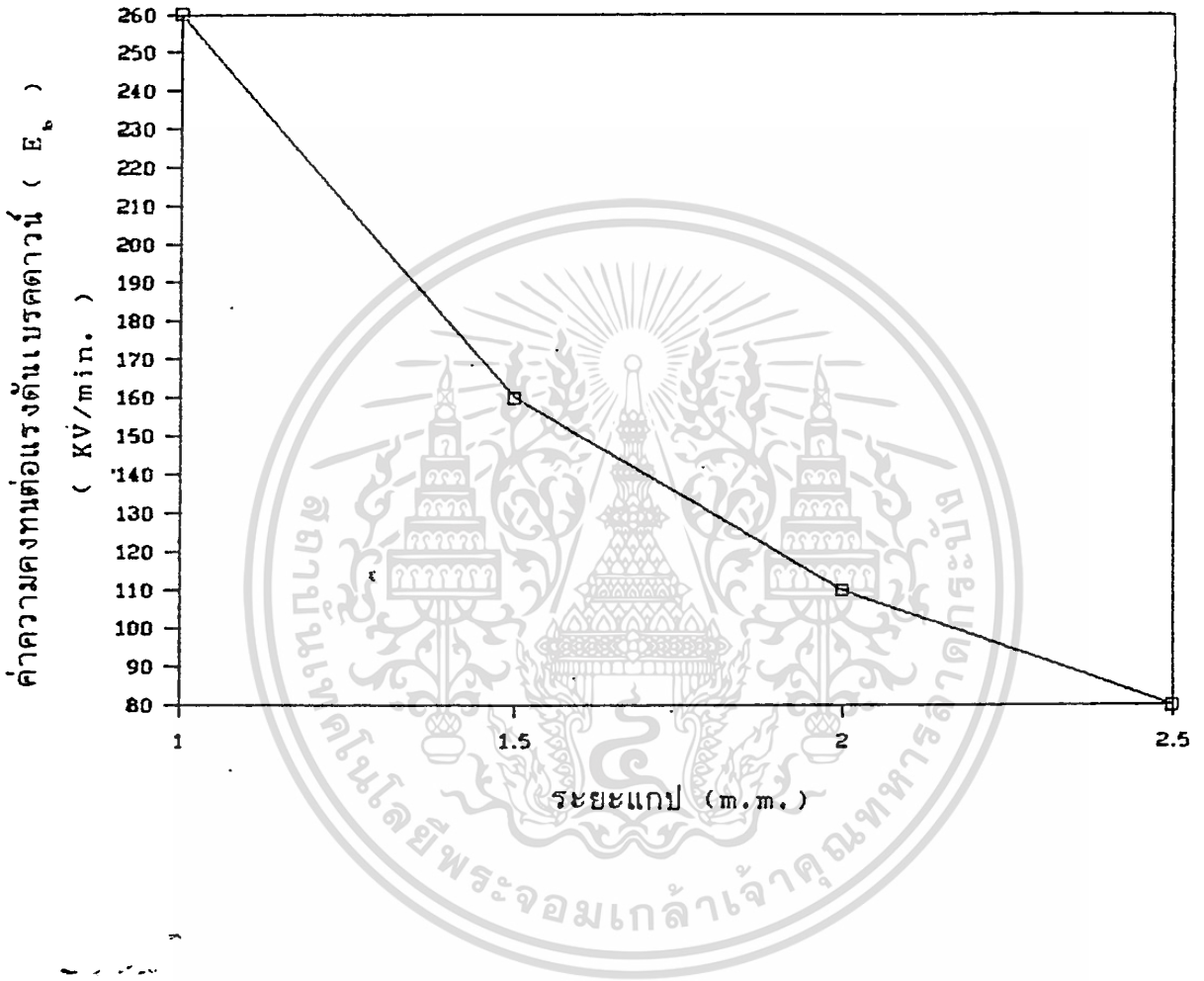
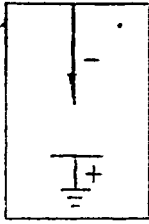


การเบรคตาวนครั้งที่

กราฟที่ 4.2.10. แสดงแรงดันเบรคตาวนของน้ำมันถั่วเหลือง ทรายอูน โดยอิเล็กโตรดแบบจุด-พื้นระนาบ ทำจากทองเหลือง



กราฟที่ 4.2.11. แสดงค่าแรงต้านเบรคตาวนเฉลี่ยกับระยะแกว้ต่างๆ



กราฟที่ 4.2.12. แสดงค่าความคงทนต่อแรงดันเบรคตาวน
กับระยะแกปต่างๆ

การทดลองที่ 3.

เป็นการศึกษาปรากฏการณ์เบรคดาว์นของน้ำมันหม้อแปลง โดยใช้
ใช้อิเลคโตรดปลายแหลม-พินระนาบ โดยที่ใช้พินระนาบเป็นปรอทสูง 2 m.m.

กับ ปลายเป็นทองเหลือง

ผลที่ได้จากการทดลอง

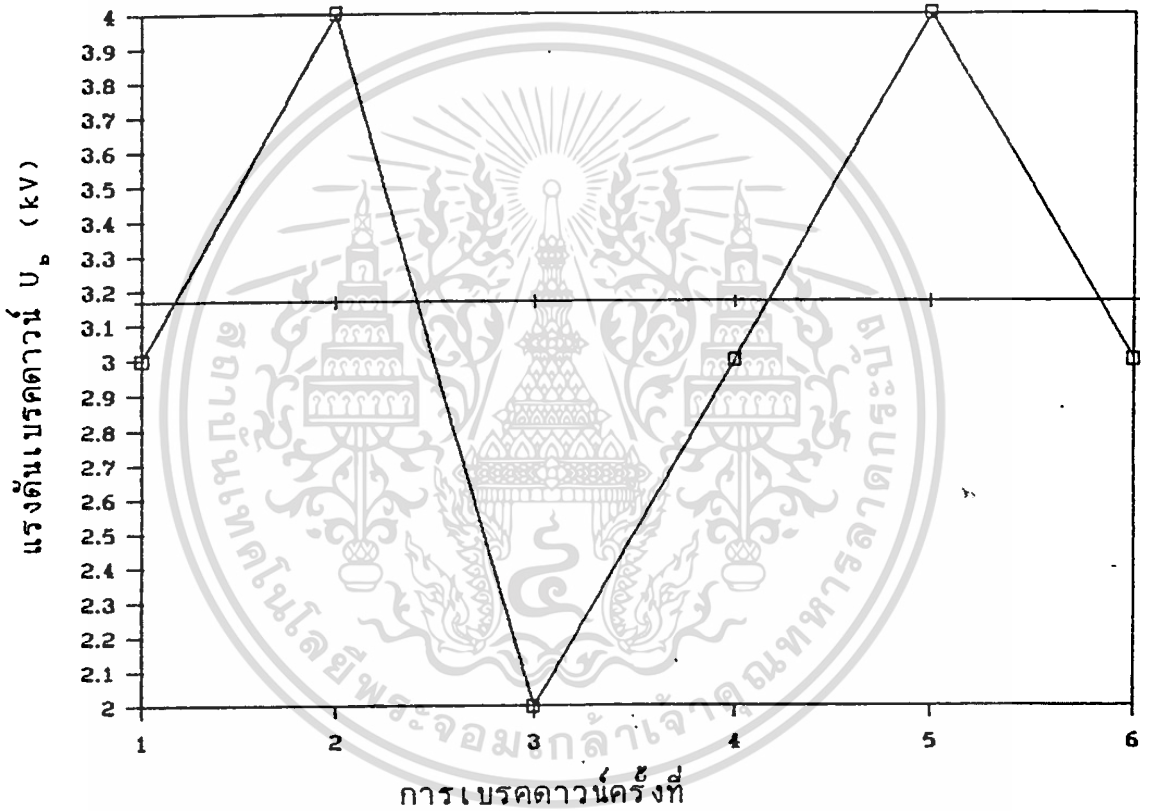
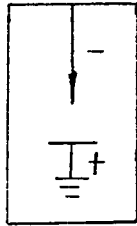
ลักษณะของอิเลคโตรด	ระยะแกป (m.m.)	แรงดันเบรคดาว์น 6 ครั้ง (K.V.)						ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5	6	
ปลายแหลมขั้วลบ (Negative Needle)	1.0	3	4	2	3	4	3	3.17
	2.0	7	7	6	7	5	6	6.33
	3.0	18	18	17	16	18	15	17.00
	4.0	20	22	21	22	21	23	21.50
ปลายแหลมขั้วบวก (Positive Needle)	1.0	4	4	4	5	3	4	4.00
	2.0	7	6	5	6	7	5	6.00
	3.0	15	16	14	10	12	11	13.00
	4.0	19	20	18	19	18	20	19.00

ตารางที่ 4.3. แสดงแรงดันเบรคดาว์น กับ ระยะแกปที่เปลี่ยนแปลงไป โดยใช้
อิเลคโตรดแบบปลายแหลมที่ทำจากทองเหลือง และ พินระนาบที่ทำจากปรอท

ระยะแกป = 1 ม.ม.

μ = 3.17 kV.

ϕn = 0.84 kV.

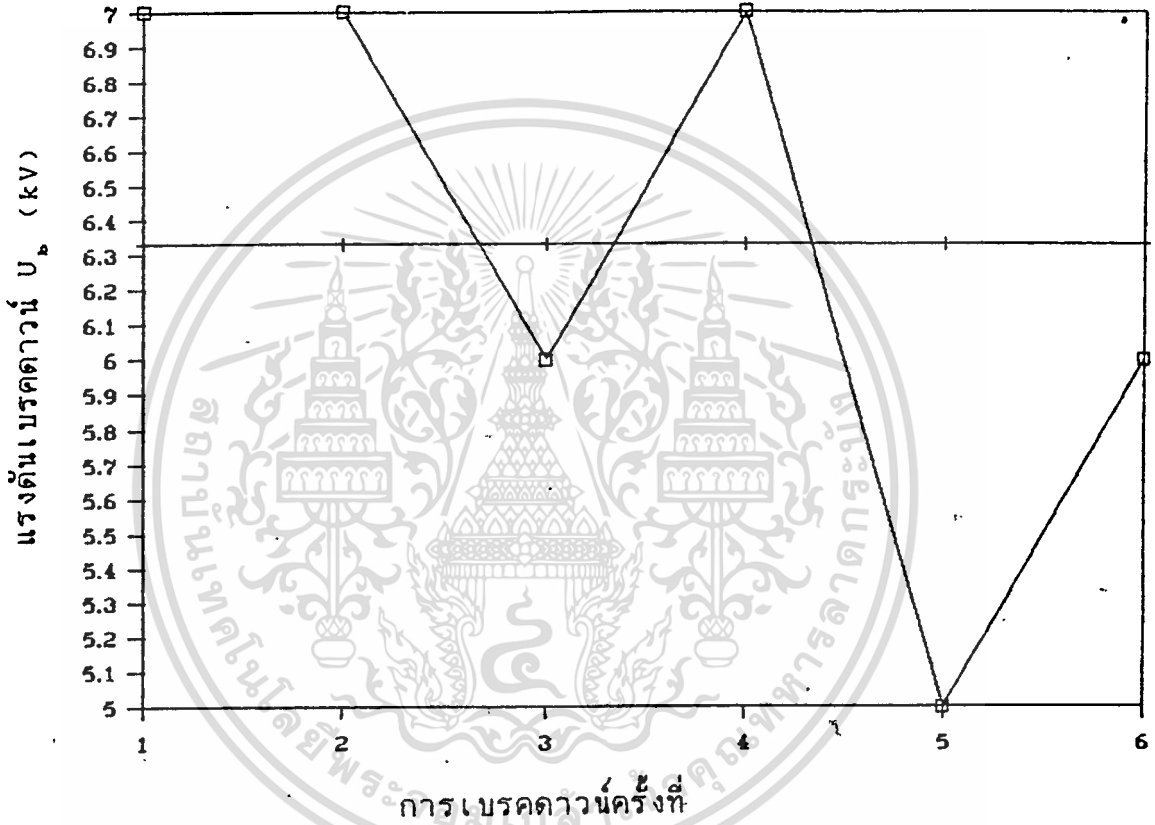
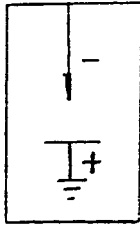


กราฟที่ 4.3.1. แสดงแรงดันเบรคดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์ โดยอิเล็กทรอนิกส์แบบจุดทำจากทองเหลือง-พื้นระนาบเป็นปรอท

ระยะแกป = 2 มม.

μ = 6.33 kV.

ϵn = 0.19 kV.

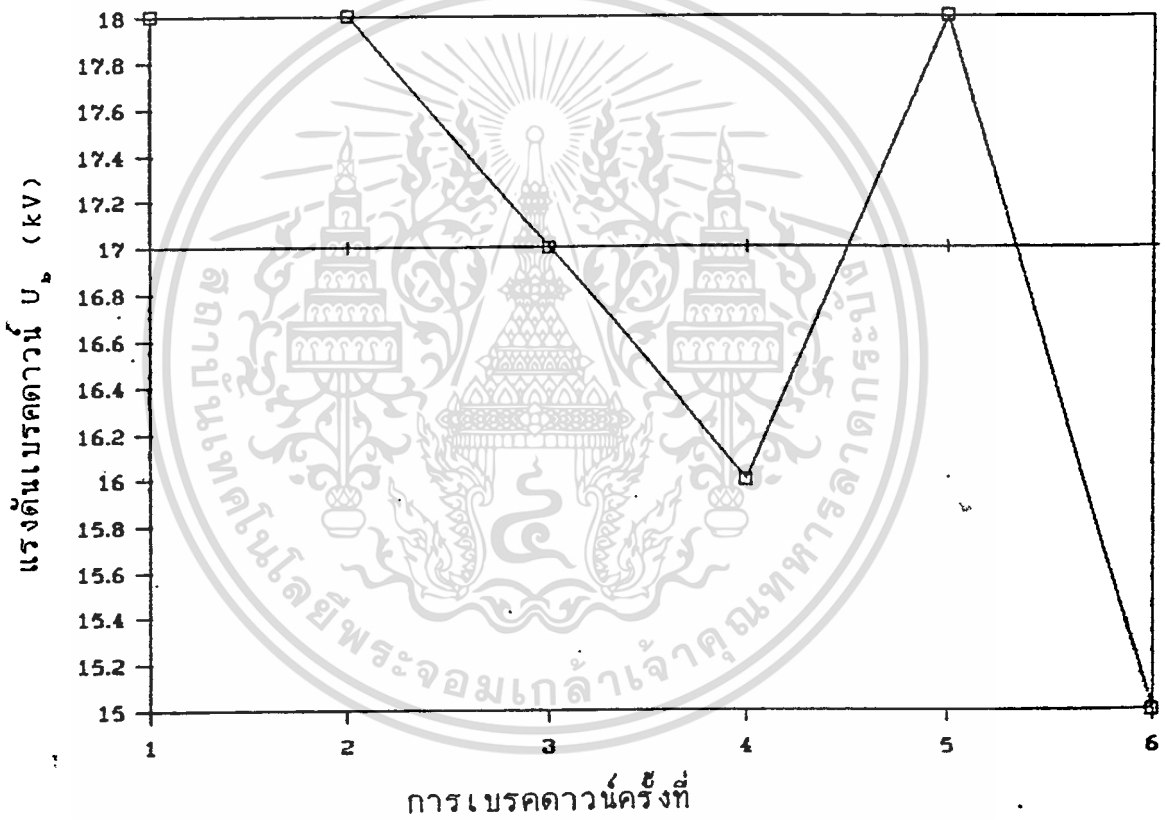
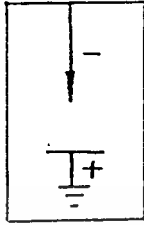


กราฟที่ 4.3.2. แสดงแรงดันเบรคดาวี่ของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์ โดยอิเล็กโตรดแบบจุดทำจากทองเหลือง-พื้นระนาบเป็นปรอท

ระยะแกป = 3 มม.

μ = 17.00 kV.

ϕ_n = 1.15 kV.

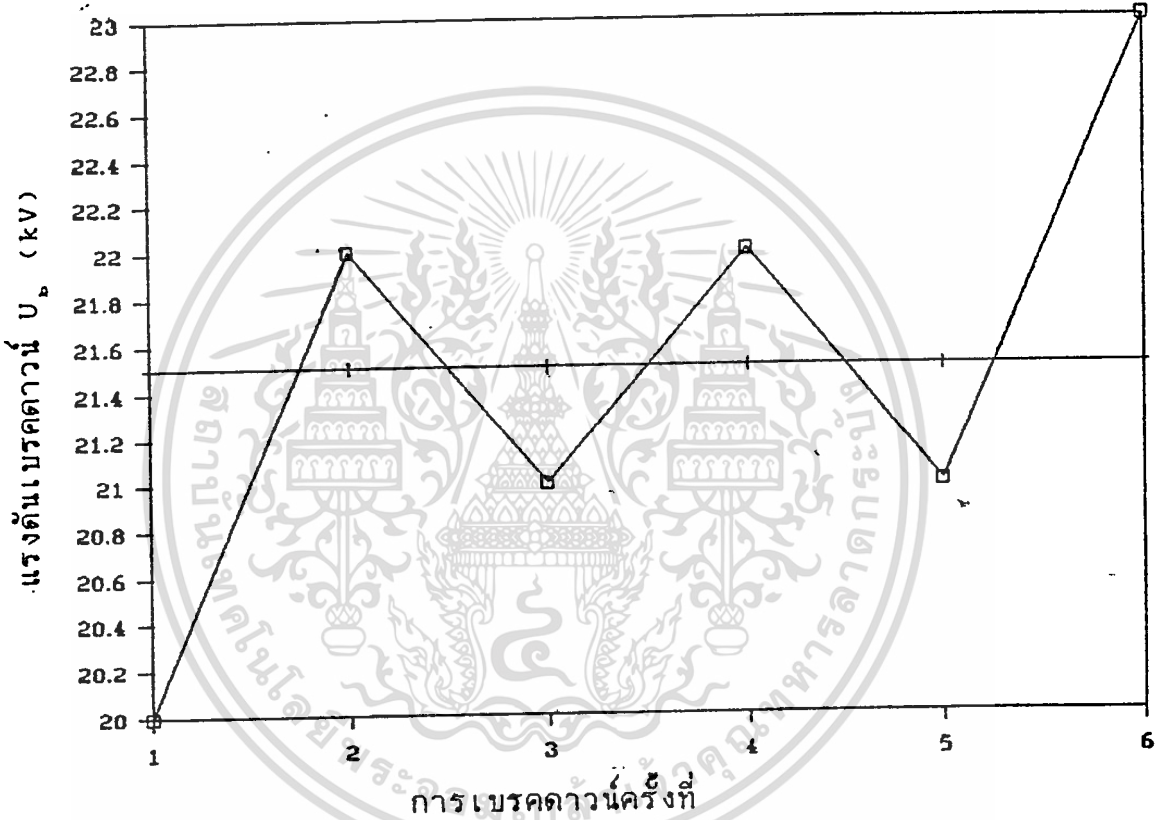
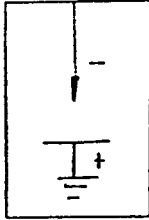


กราฟที่ 4.3.3. แสดงแรงดันเบรคดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์ โดยอิเล็กทรอนิกส์แบบจุดทำจากทองเหลือง-พื้นระนาบเป็นปรอท

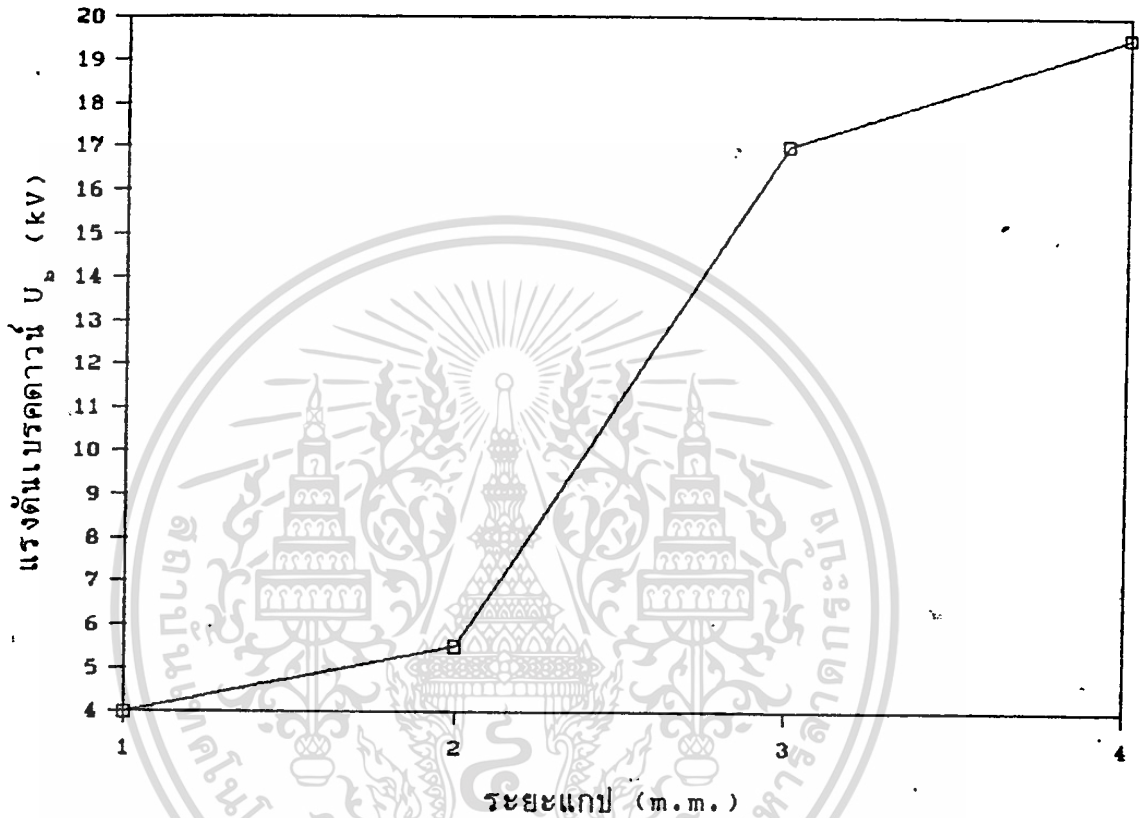
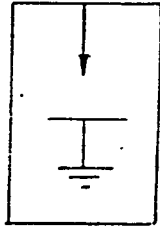
ระยะแกป = 4 ม.ม.

μ = 21.50 kV.

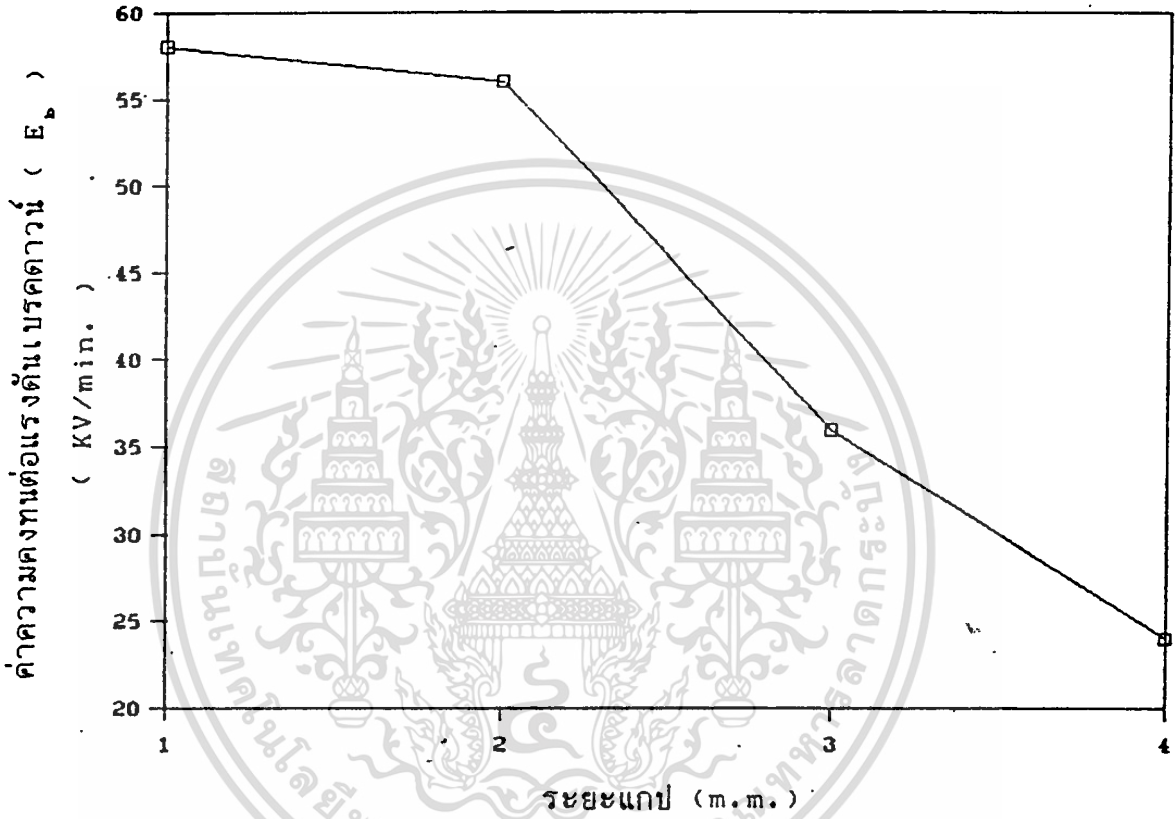
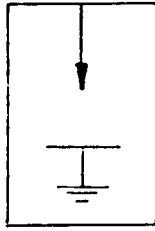
ϕ_n = 1.50 kV.



กราฟที่ 4.3.4. แสดงแรงดันเบรคดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์ โดยอิเล็กทรอนิกส์ทำจากทองเหลือง-พื้นระนาบเป็นปรอท



กราฟที่ 4.3.5. แสดงค่าแรงดันเบรคดาวน์เฉลี่ยกับระยะแกปต่างๆ

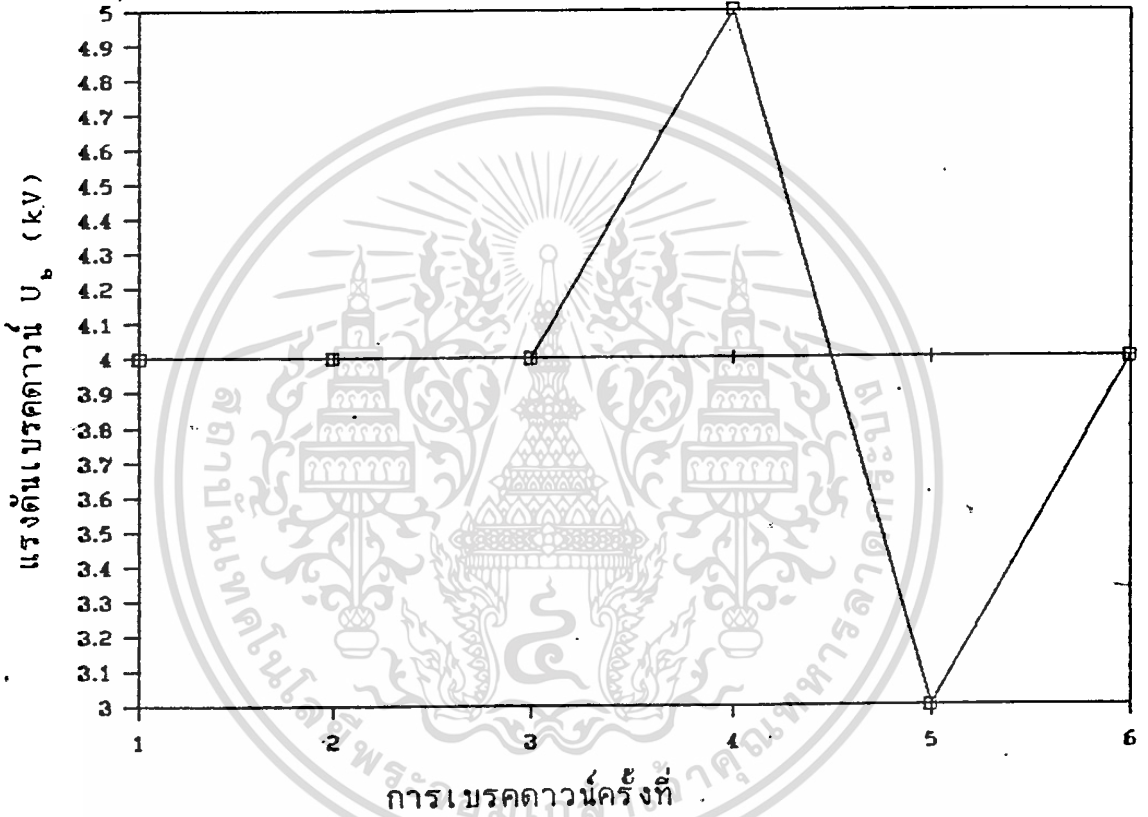
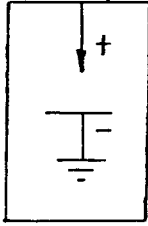


กราฟที่ 4.3.6. แสดงค่าความคงทนต่อแรงดันเบรคดาวน์
กับระยะแก๊ปต่างๆ

ระยะแกป = 1 มม.

μ = 4.00 kV.

ϕ_n = 0.58 kV.

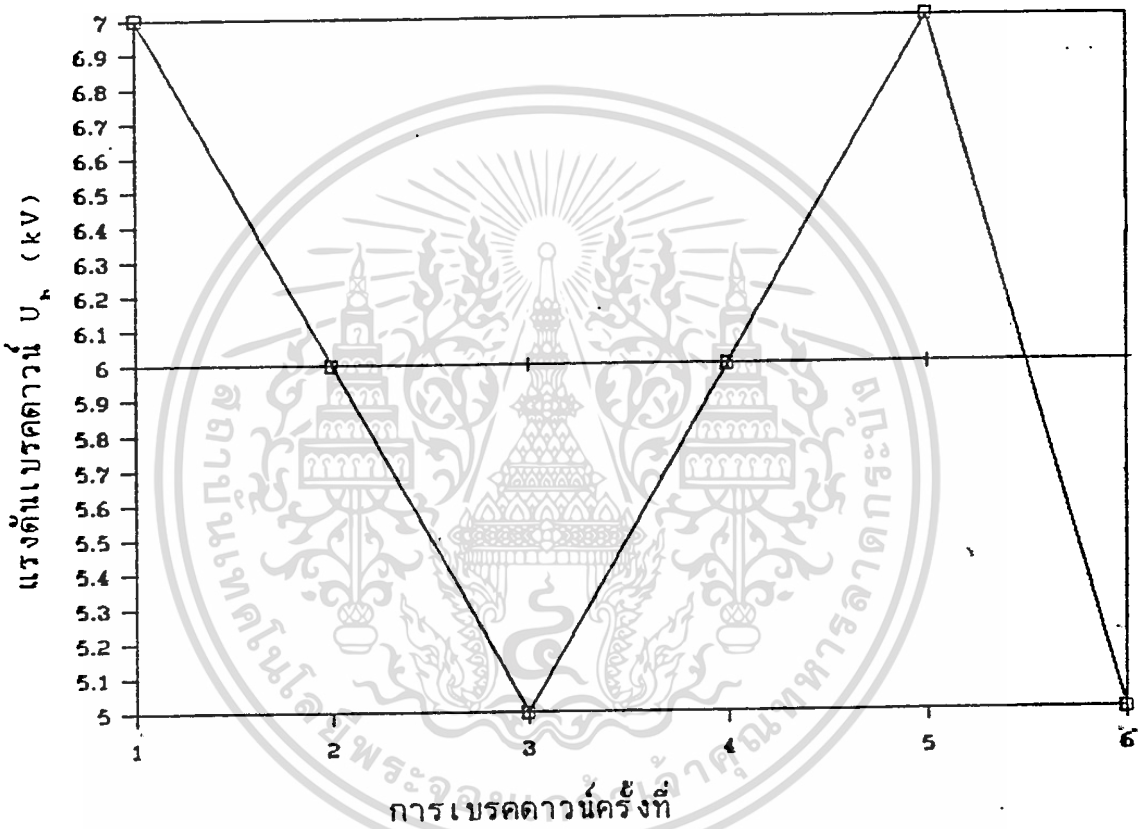
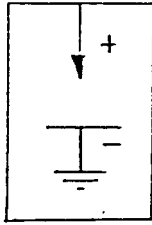


กราฟที่ 4.3.7. แสดงแรงดันเบรคตาวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์ โดยอิเล็กโตรดแบบจุดทำจากทองเหลือง-พื้นระนาบเป็นปรอท

ระยะแกป = 2 ม.ม.

μ = 6.00 kV.

ϕ_n = 0.82 kV.

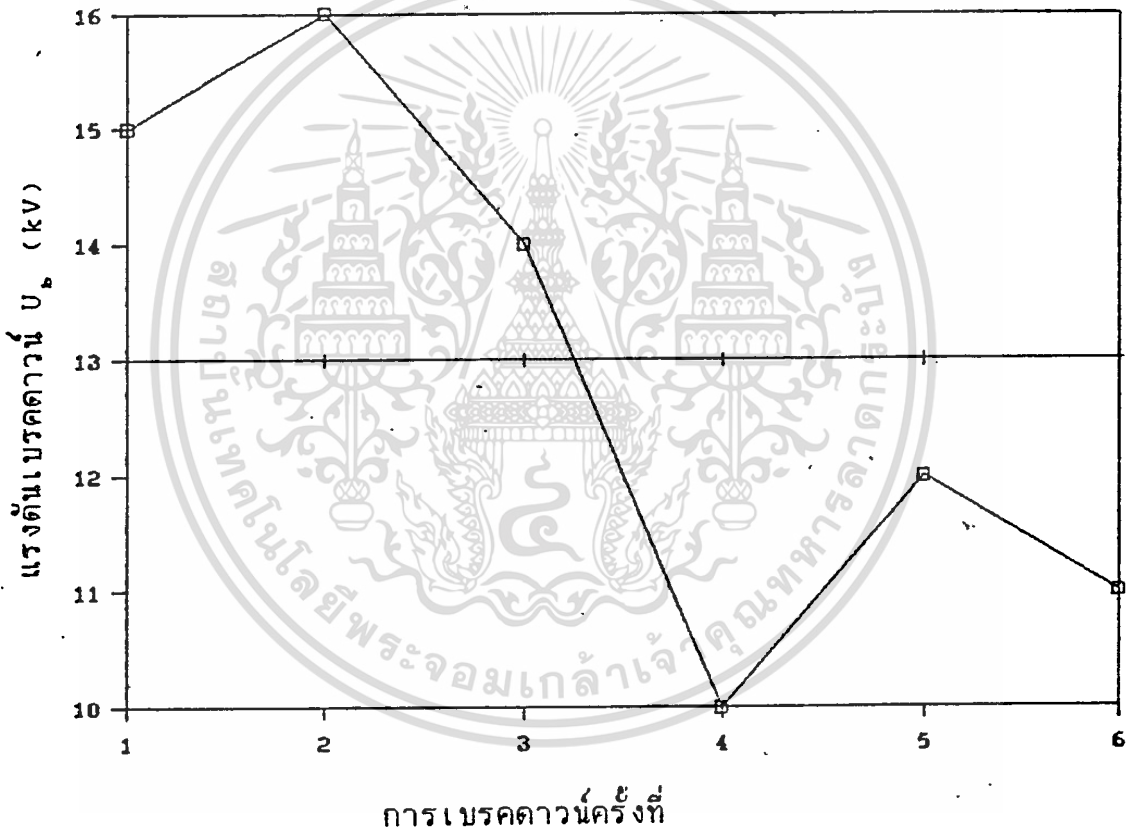
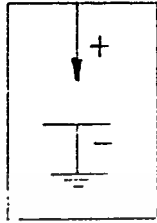


กราฟที่ 4.3.8. แสดงแรงดันเบรคดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสที่กซ์ โดยอิเล็กทรอนิกส์แบบจุดทำจากทองเหลือง-พื้นระนาบเป็นปรอท

ระยะแก๊ป = 3 มม.

μ = 13.00 kV.

σ = 2.16 kV.

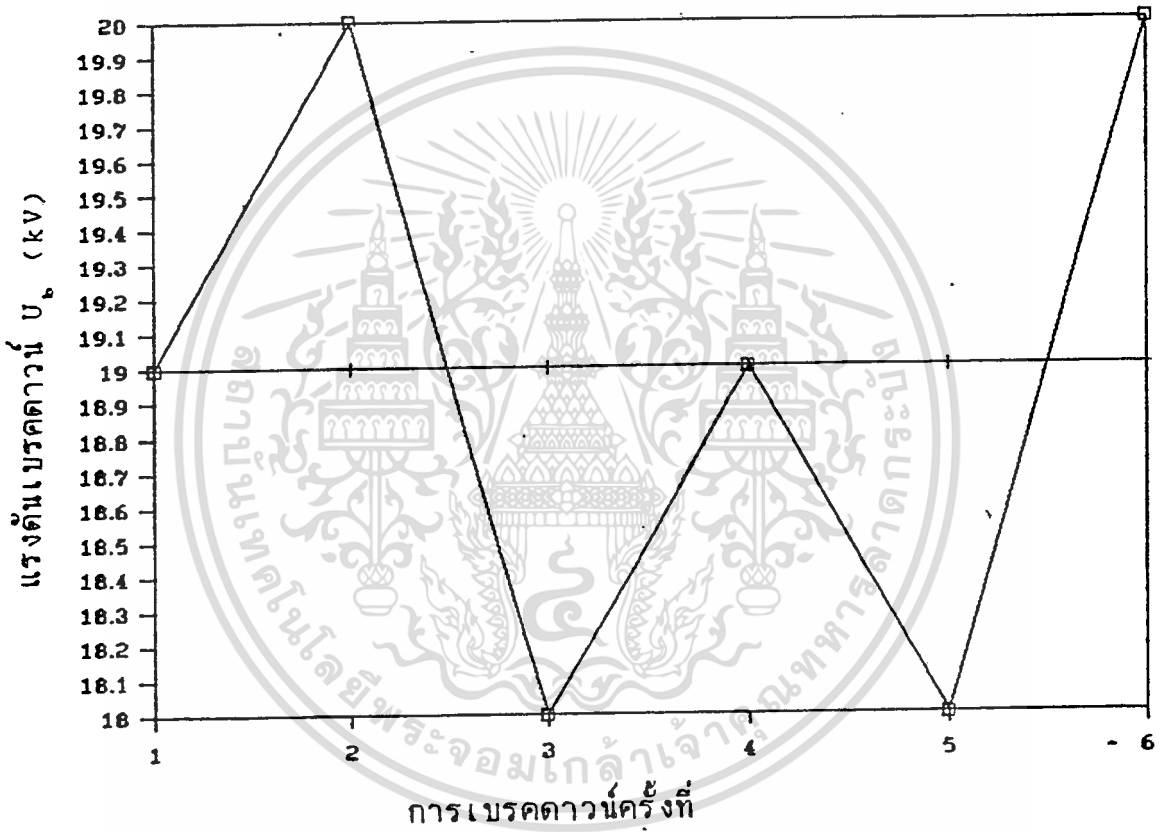
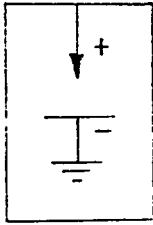


กราฟที่ 4.3.9. แสดงแรงดันเบรคดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์ โดยอิเล็กทรอนิกส์แบบจุดทำจากทองเหลือง-พื้นระนาบเป็นปรอท

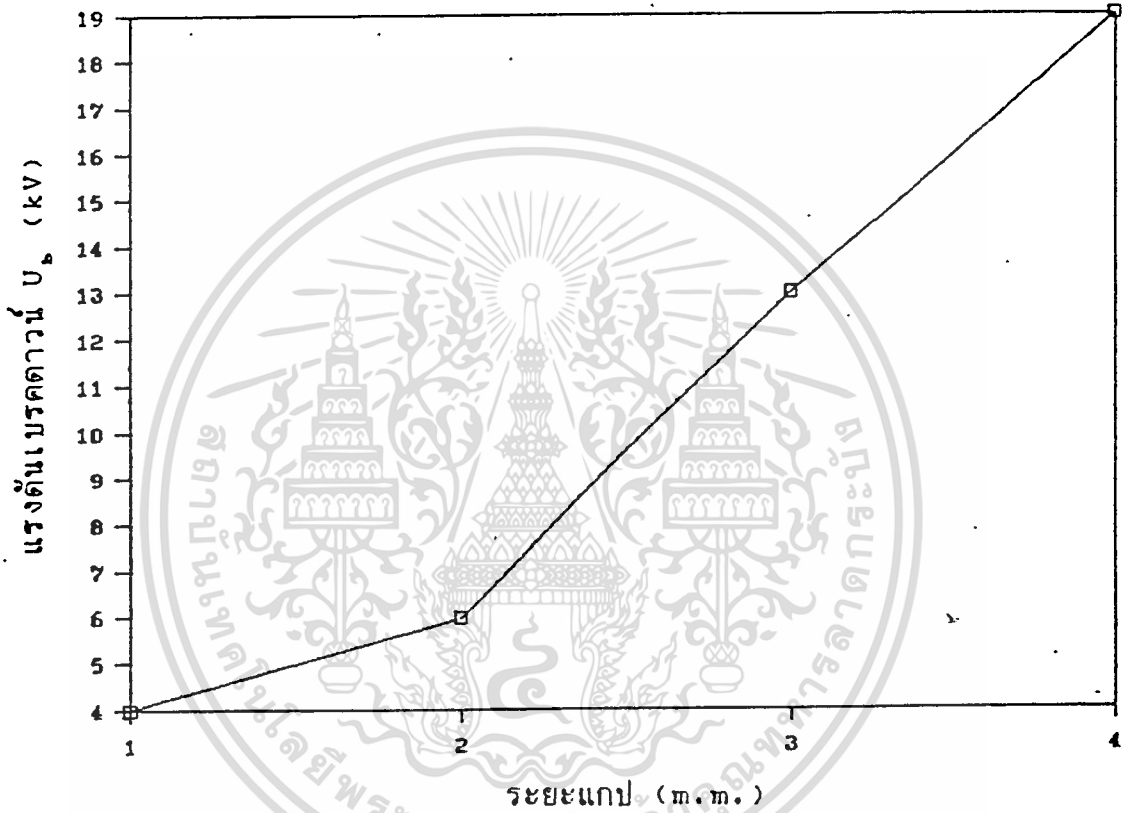
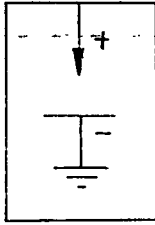
ระยะแกป = 4 มม.

μ = 19.00 kV.

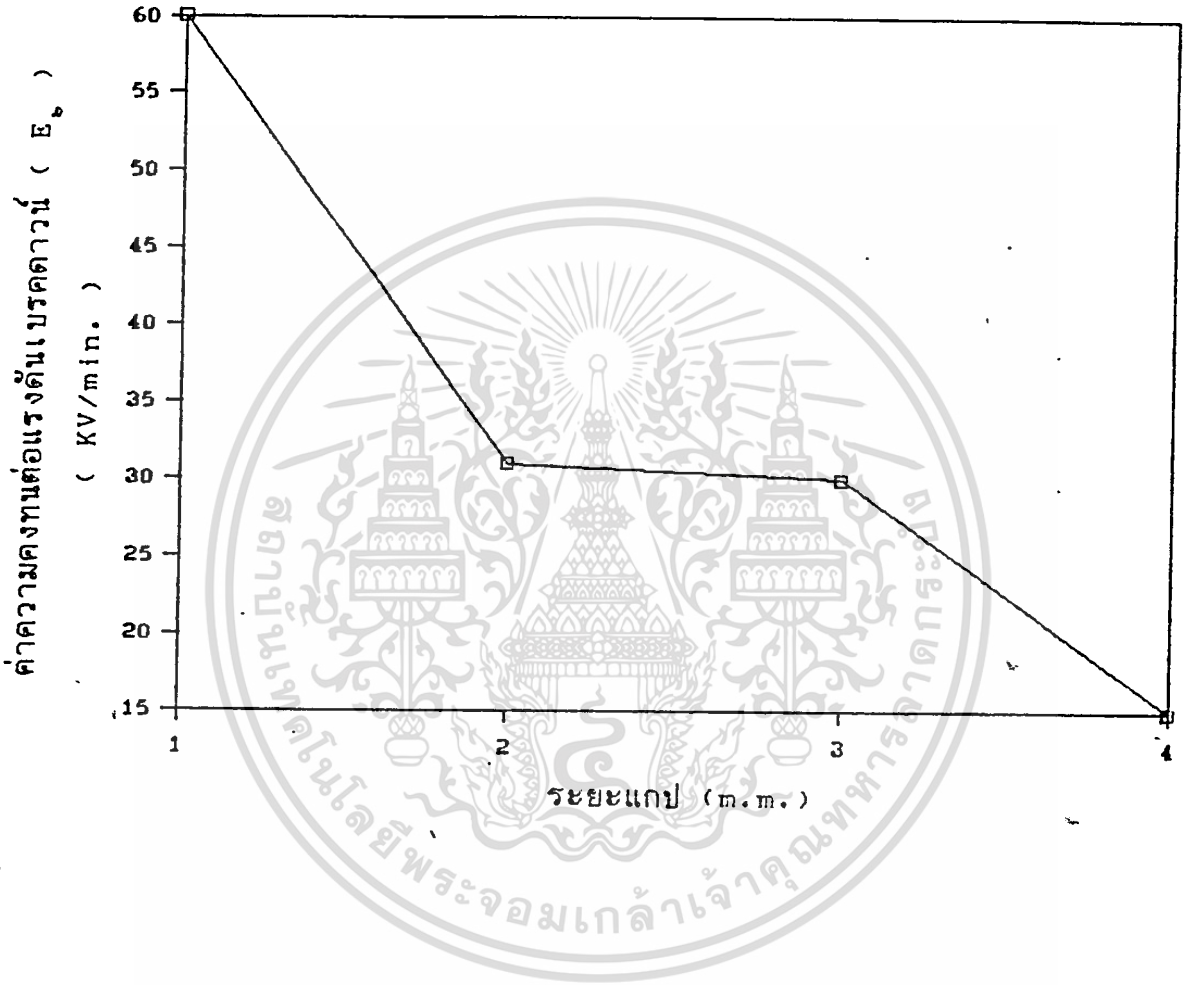
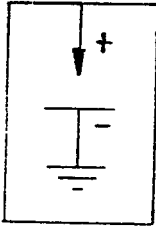
ϕn = 0.82 kV.



กราฟที่ 4.3.10. แสดงแรงดันเบรคดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์ โดยอิเล็กทรอนิกส์แบบจุดทำจากทองเหลือง-พื้นระนาบเป็นปรอท



กราฟที่ 4.3.11. แสดงค่าแรงดันเบรคตาวนเฉลี่ยกับระยะแกปต่างๆ



กราฟที่ 4.3.12. แสดงค่าความคงทนต่อแรงดันเบรคตาวน
กับระยะแกวต่างๆ

การทดลองที่ 4.

เป็นการศึกษาปรากฏการณ์เบรคดาวน์ของน้ำมันถั่วเหลือง โดยอิเล็กโตรดปลายแหลม-พื้นระนาบ โดยที่ใช้พื้นระนาบเป็นปรอทสูง 2 m.m. กับปลายเป็นทองเหลือง
ผลที่ได้จากการทดสอบ

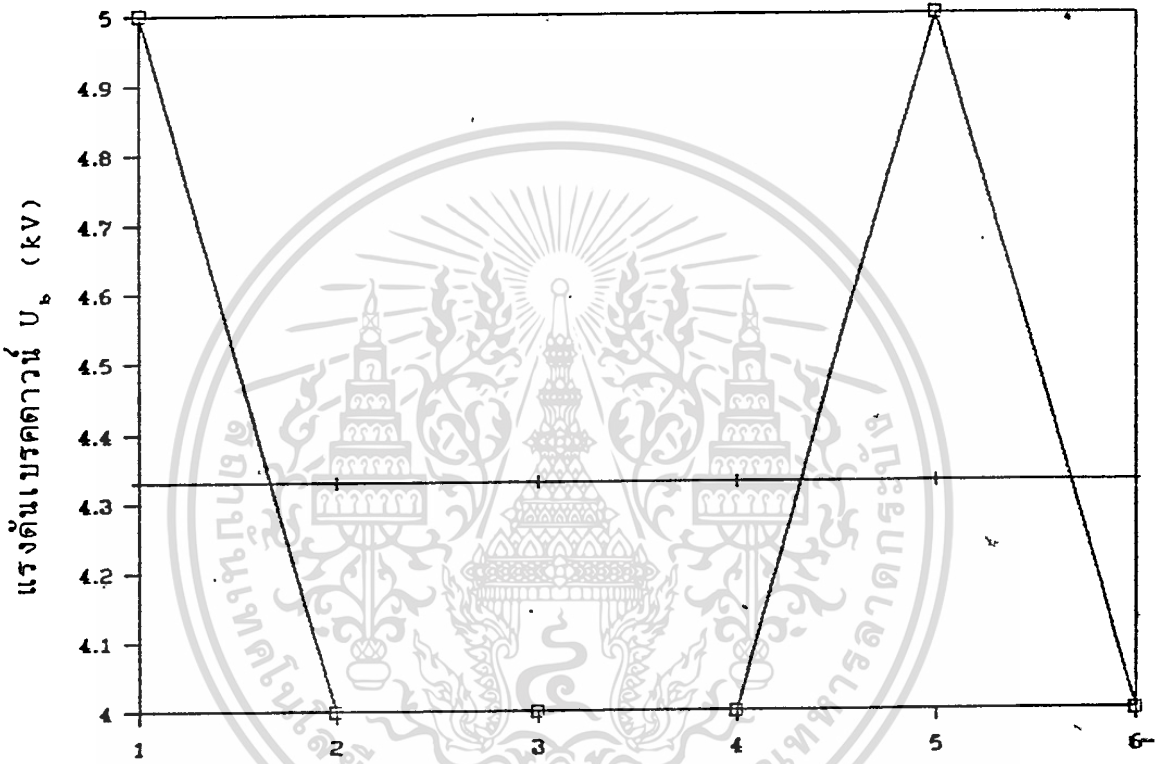
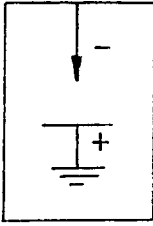
ลักษณะของอิเล็กโตรด	ระยะแกป (m.m.)	แรงดันเบรคดาวน์ 6 ครั้ง						ค่าเฉลี่ย
		(K.V.)						
ปลายแหลมขั้วลบ (Negative Needle)	1.0	5	4	4	4	5	4	4.33
	2.0	9	9	11	10	11	10	10.00
	3.0	10	12	16	16	17	15	14.33
	4.0	21	23	22	23	20	22	21.83
ปลายแหลมขั้วบวก (Positive Needle)	1.0	5	5	3	4	3	5	4.16
	2.0	9	10	9	8	9	10	9.16
	3.0	17	17	18	17	18	17	17.33
	4.0	22	24	25	25	24	23	23.83

ตารางที่ 4.4. แสดงแรงดันเบรคดาวน์ กับ ระยะแกปที่เปลี่ยนแปลงไป โดยใช้ อิเล็กโตรดแบบปลายแหลมที่ทำจากทองเหลือง และ พื้นระนาบที่ทำจากปรอท

ระยะแกป = 1 มม.

μ = 4.83 kV.

m = 0.47 kV.



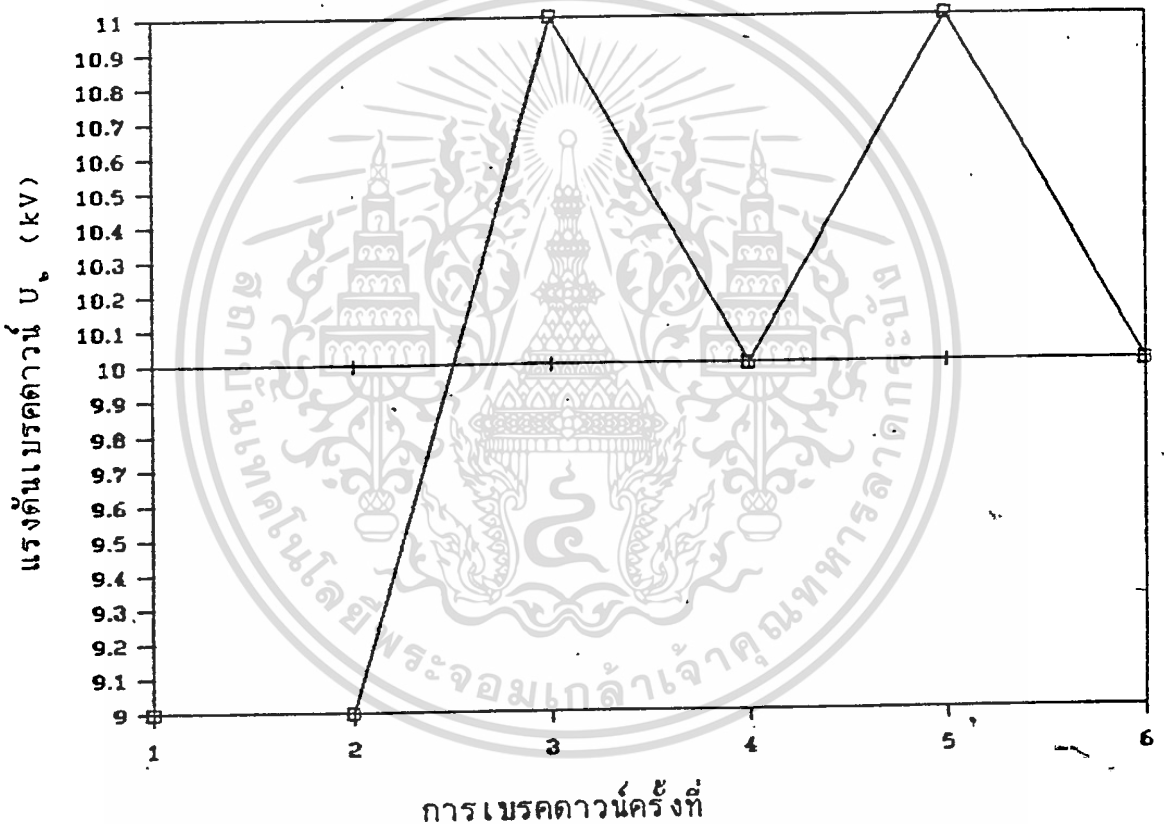
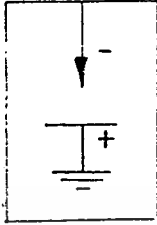
การเบรคดาว์ครั้งที่

กราฟที่ 4.4.1. แสดงแรงดันเบรคดาว์ของน้ำมันก๊วเหลือง トラงุ่น โดยอิเล็กทรอนิกส์แบบจุดทำจากทองเหลือง-พื้นระนาบเป็นปรอท

ระยะแก๊ป = 2 มม.

μ = 10.00 kV.

σ_n = 0.82 kV.

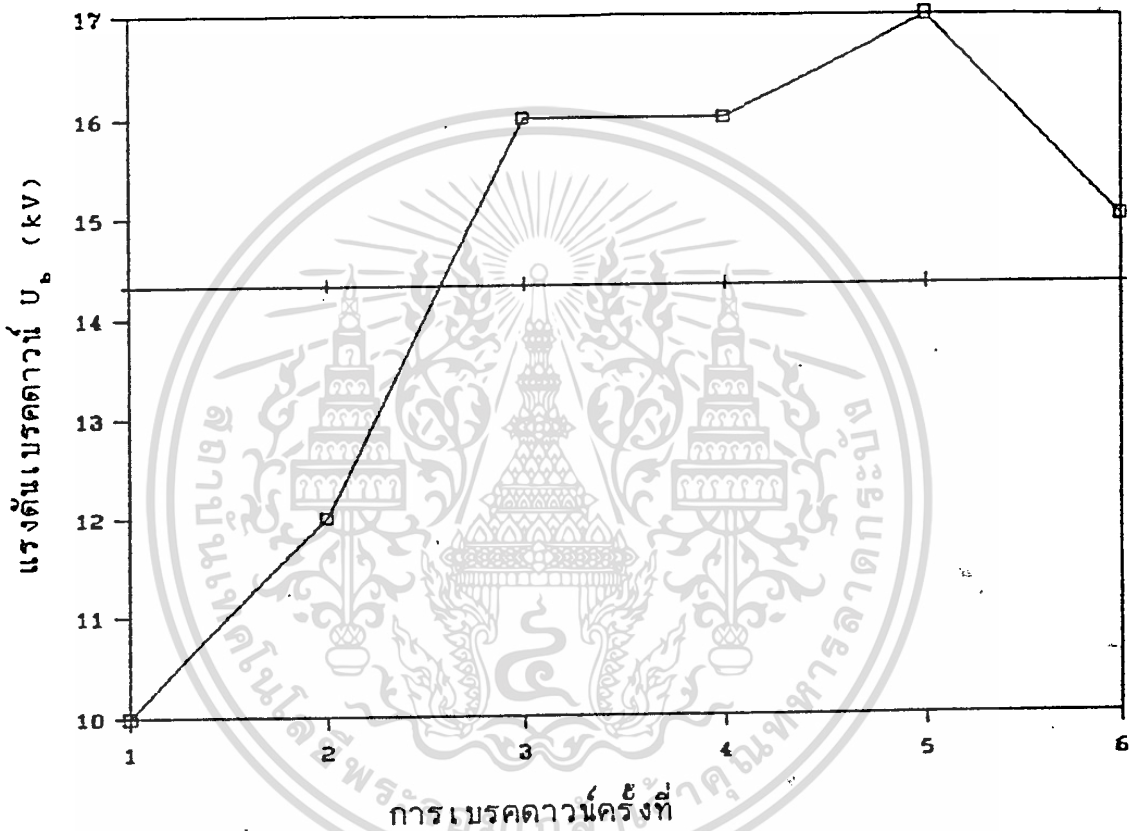
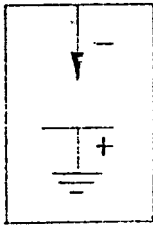


กราฟที่ 4.4.2. แสดงแรงดันเบรคตาวนของน้ำมันถั่วเหลือง ทรายอูน
โดยอิเล็กโตรดแบบจุดทำจากทองเหลือง-พื้นระนาบเป็นปรอท

ระยะแกป = 3 มม.

μ = 14.33 kV.

σ = 2.49 kV.

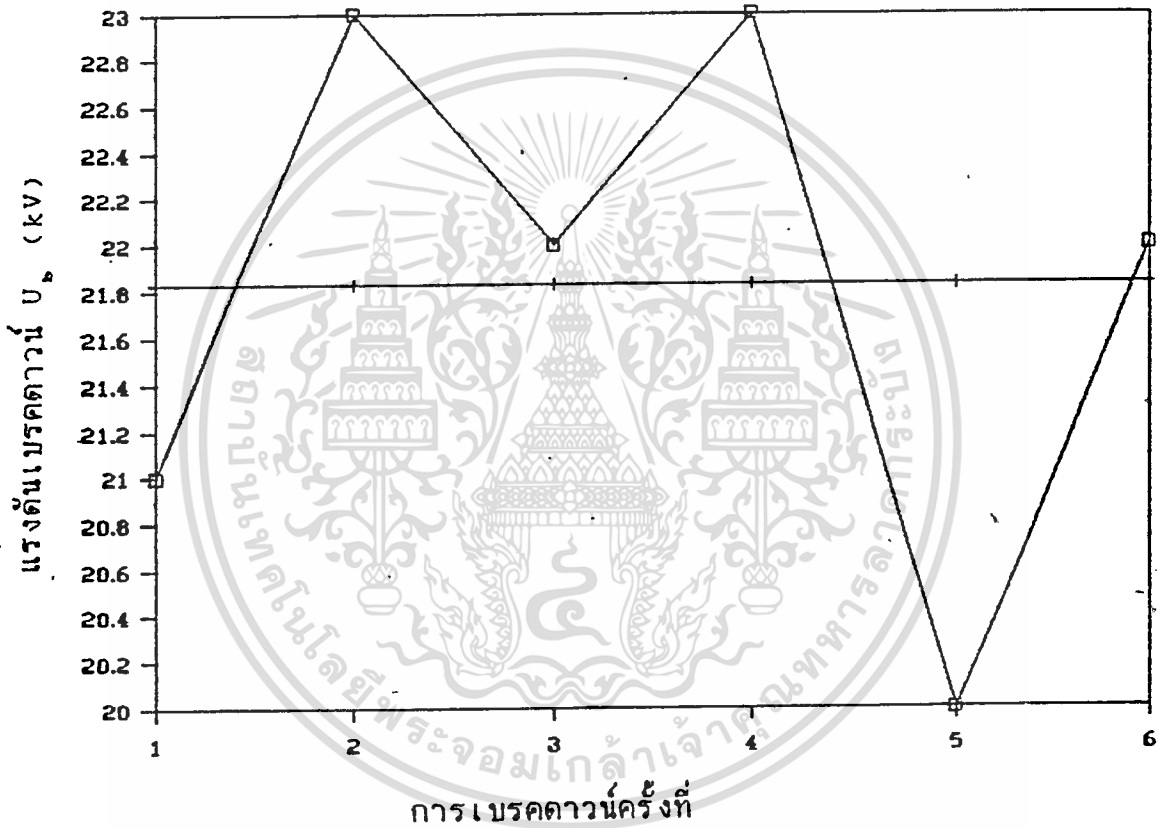
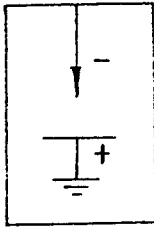


กราฟที่ 4.4.3. แสดงแรงดันเบรคดาวี่ของน้ำมันถั่วเหลือง ทรายงุ่น โดยอิเล็กโตรดแบบจุดทำจากทองเหลือง-พื้นระนาบเป็นปรอท

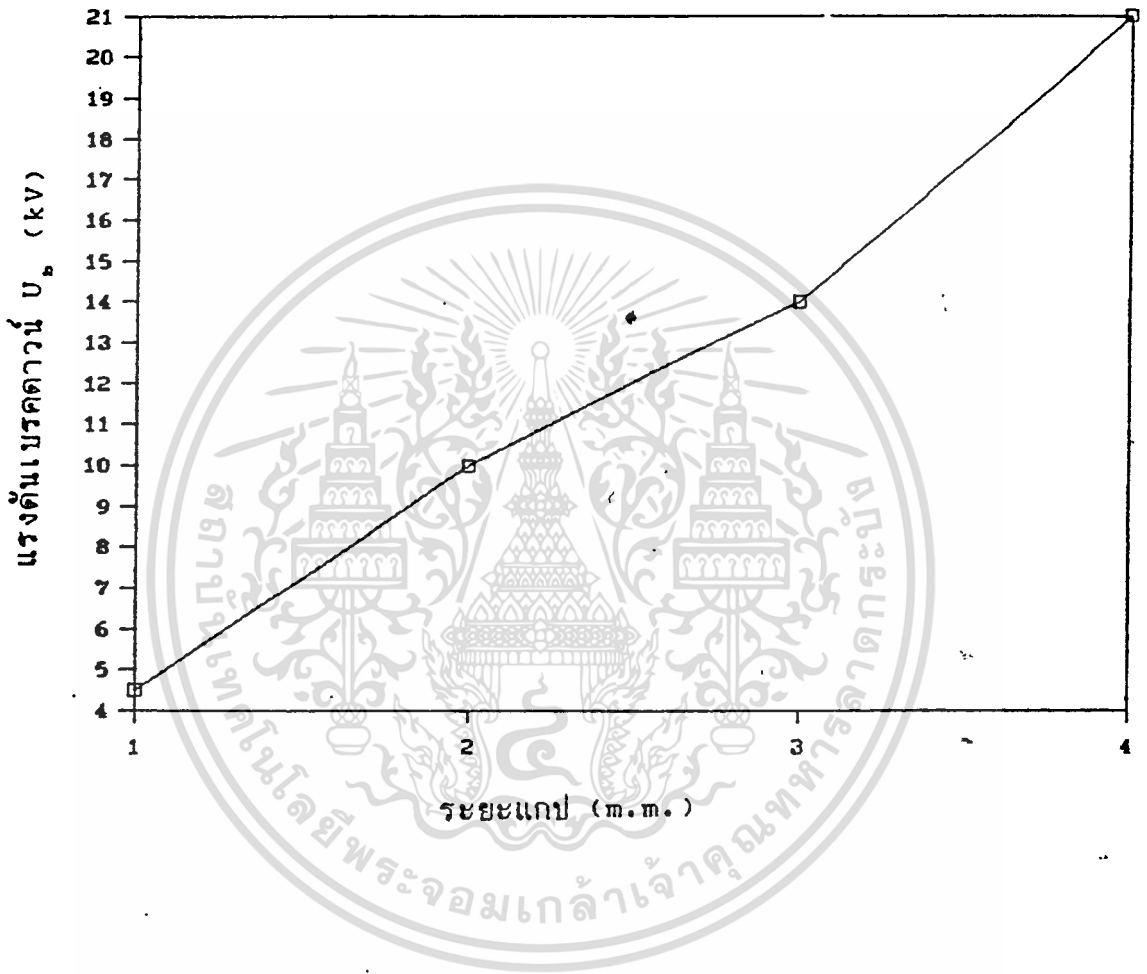
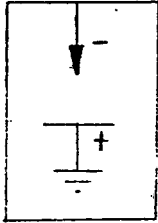
ระยะแกป = 4 มม.

μ = 21.83 kV.

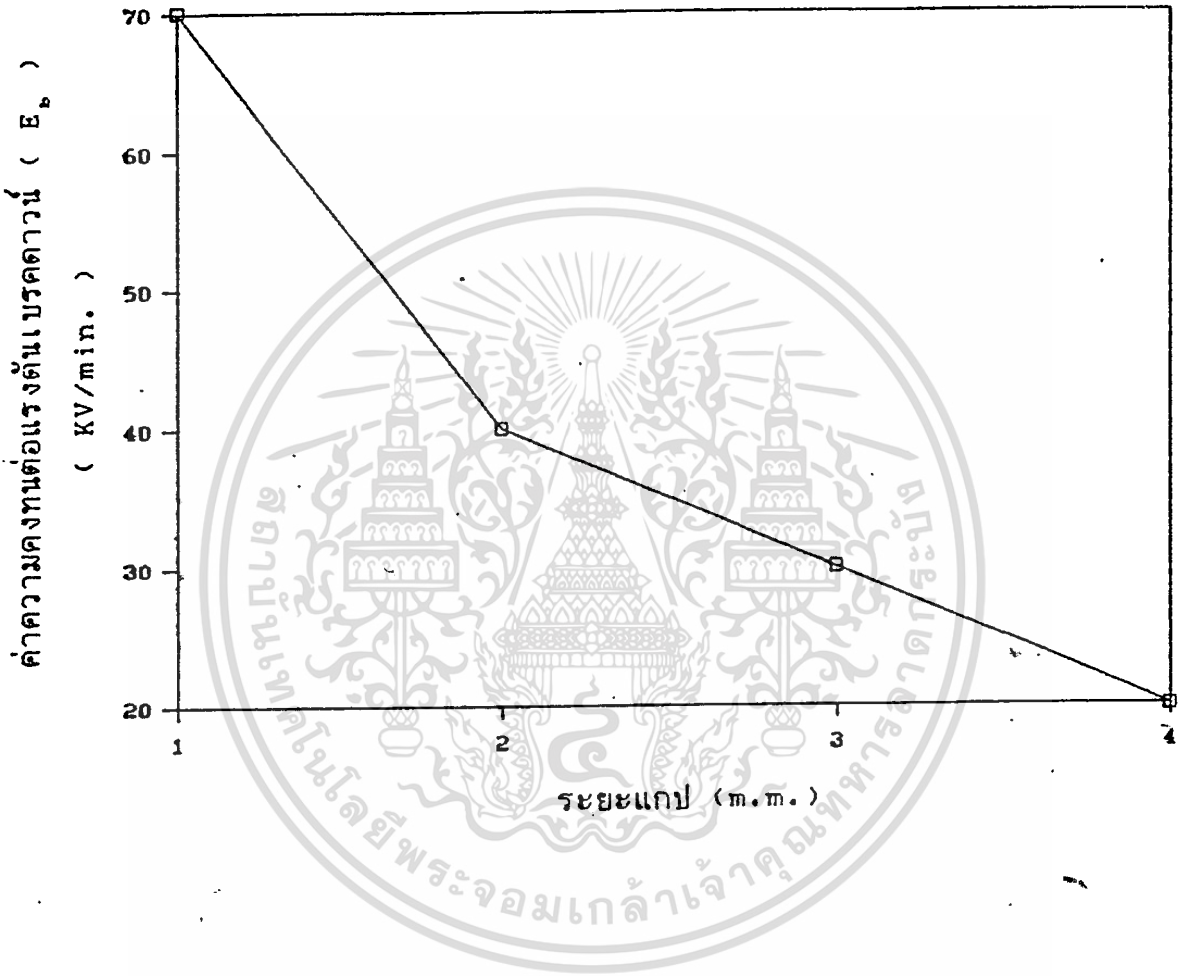
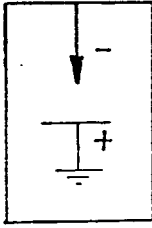
σ = 1.07 kV.



กราฟที่ 4.4.4. แสดงแรงดันเบรคตาวนของน้ำมันถั่วเหลือง ทรายอู่น โดยอิเล็กโตรดแบบจุดทำจากทองเหลือง-พื้นระนาบเป็นปรอท



กราฟที่ 4.4.5. แสดงค่าแรงดันเบรคตาวาน์เฉลี่ยกับระยะแกปต่างๆ

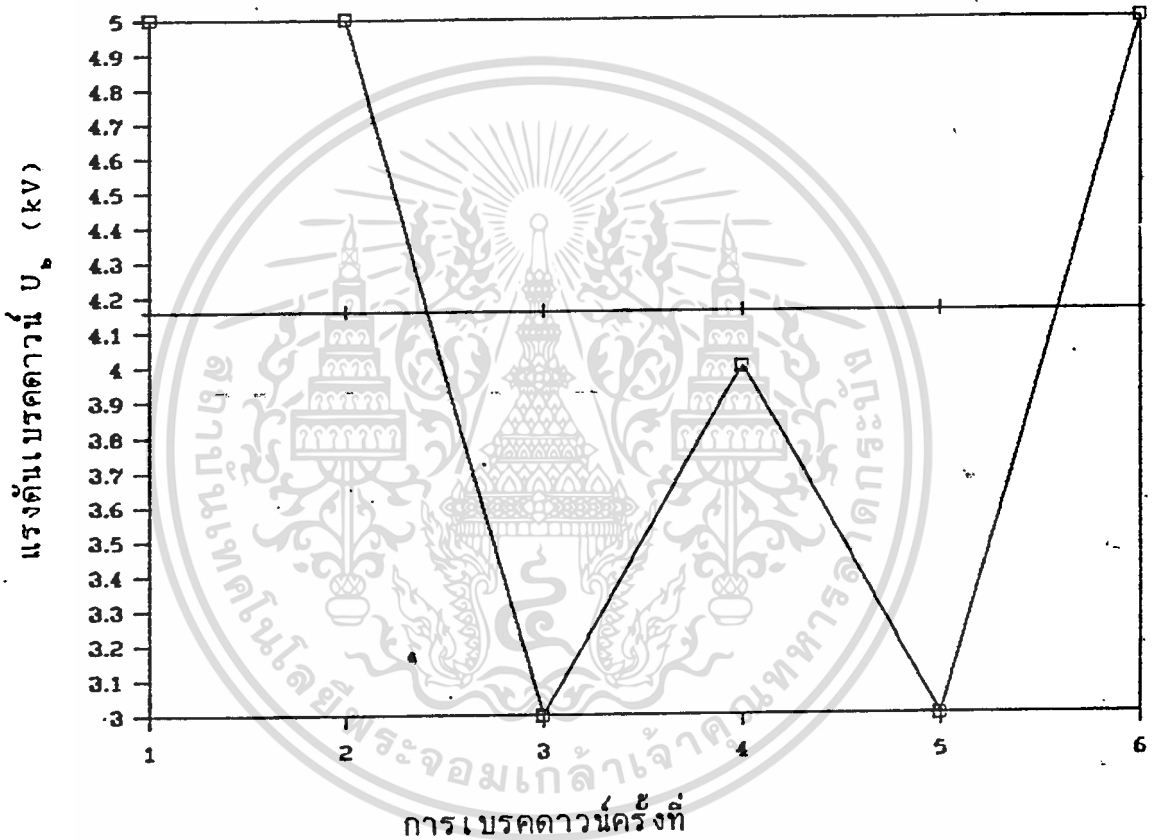
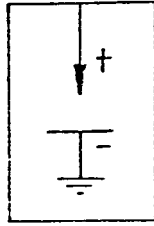


กราฟที่ 4.4.6. แสดงค่าความคงทนต่อแรงดันเบรคตาวน
กับระยะแกปต่างๆ

ระยะแกป = 1 มม.

μ = 4.16 kV.

σ = 0.58 kV.

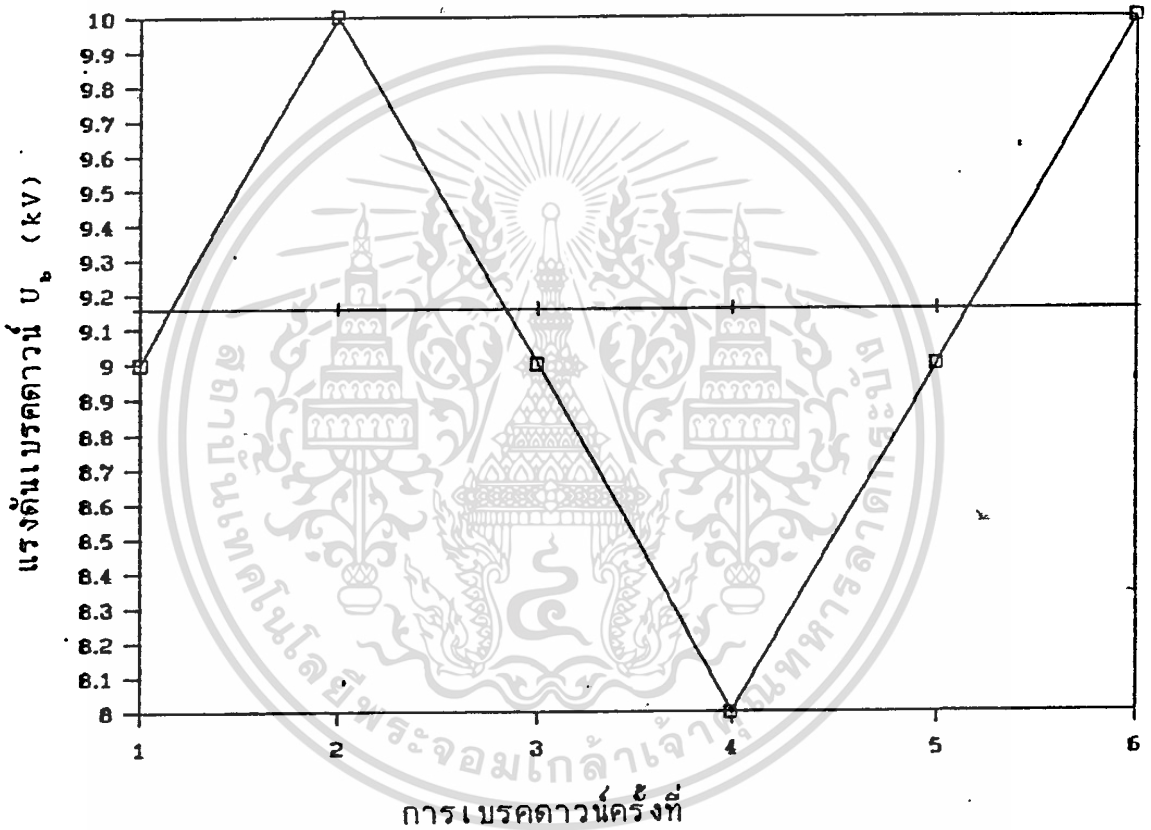
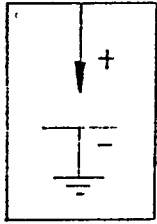


กราฟที่ 4.4.7. แสดงแรงดันเบรคตาวนของน้ำมันถั่วเหลือง ทรายงุ่น โดยอิเล็กโตรดแบบจุดทำจากทองเหลือง-พื้นระนาบเป็นปรอท

ระยะแกป = 2 มม.

μ = 9.16 kV.

σ = 0.69 kV.



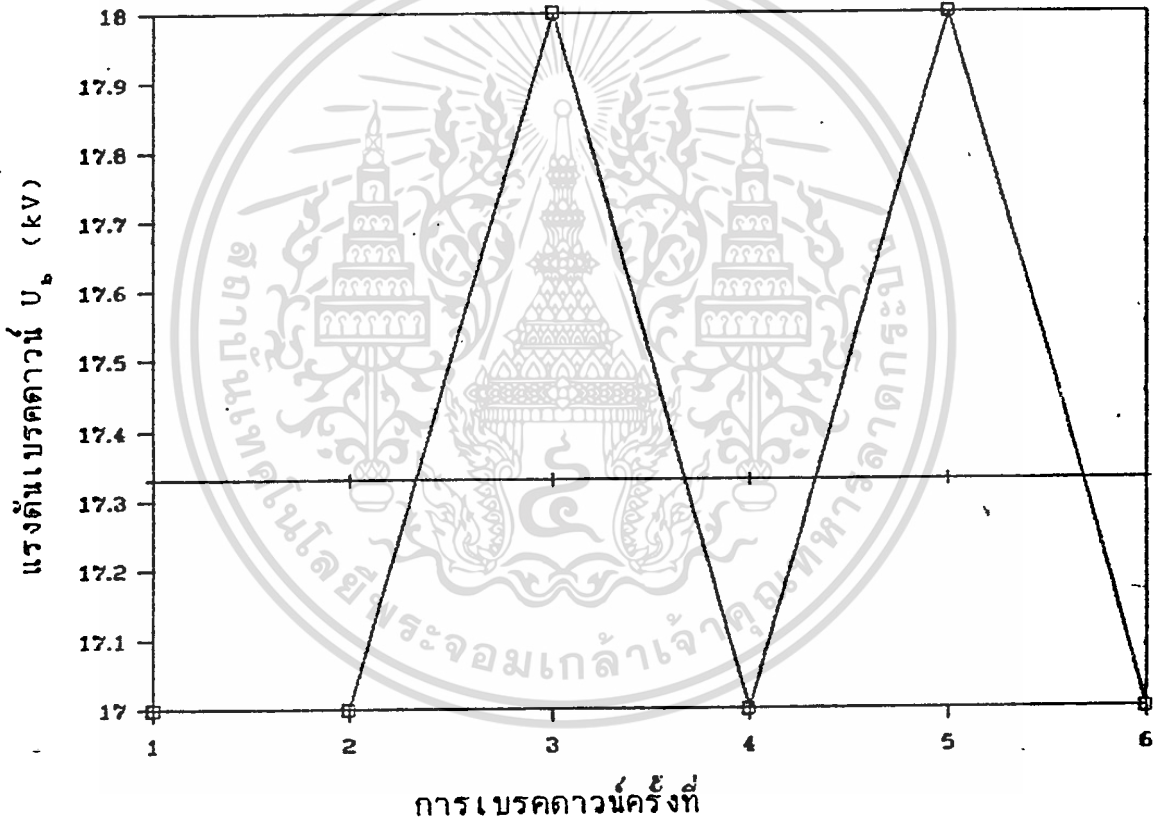
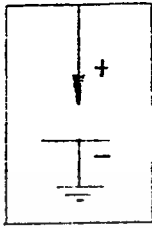
กราฟที่ 4.4.8. แสดงแรงดันเบรคดาวี่ของน้ำมันถั่วเหลือง ทรายอู่น

โดยอิเล็กโตรดแบบจุดทำจากทองเหลือง-พื้นระนาบเป็นปรอท

ระยะแก๊ป = 3 มม.

μ = 17.33 kV.

σ = 0.47 kV.



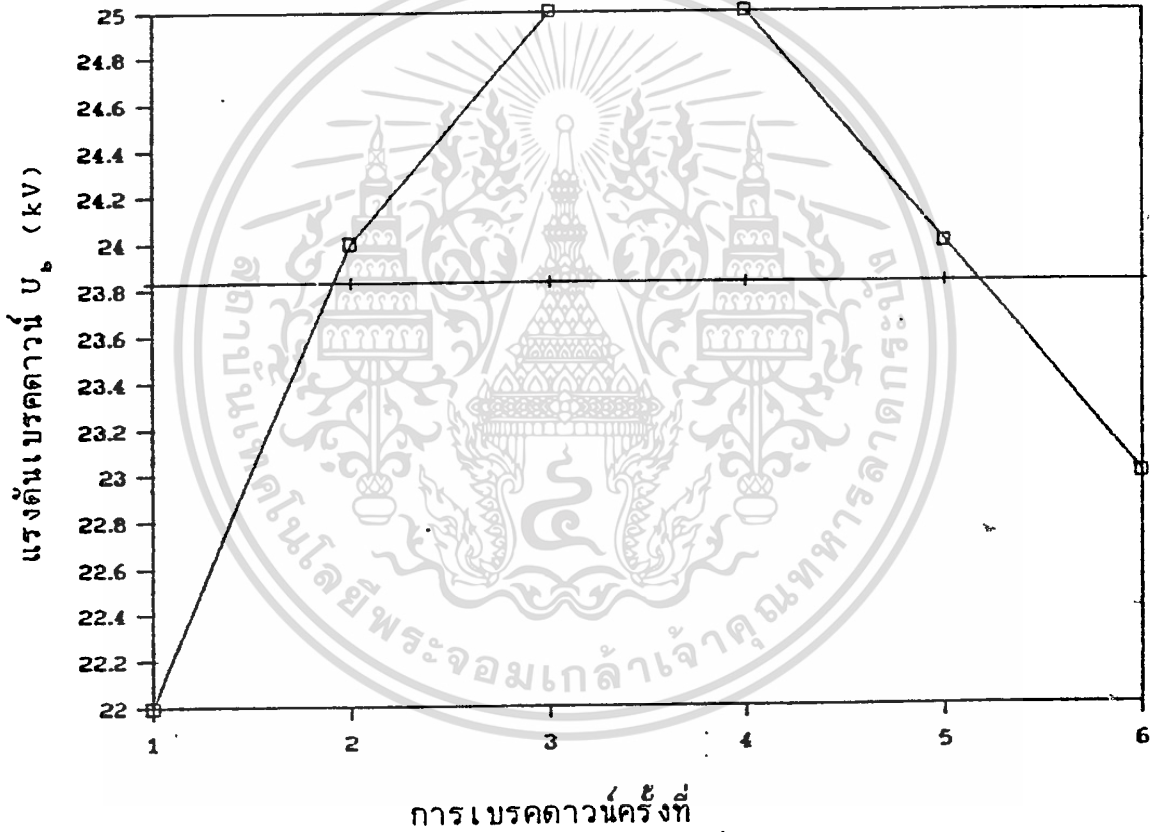
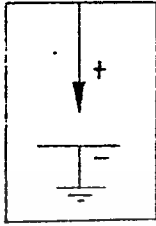
กราฟที่ 4.4.9. แสดงแรงดันเบรคความของน้ำมันตัวเหลือง トラอูงุ่น

โดยอิเล็กโตรดแบบจุดทำจากทองเหลือง-พื้นระนาบเป็นปรอท

ระยะแกป = 4 มม.

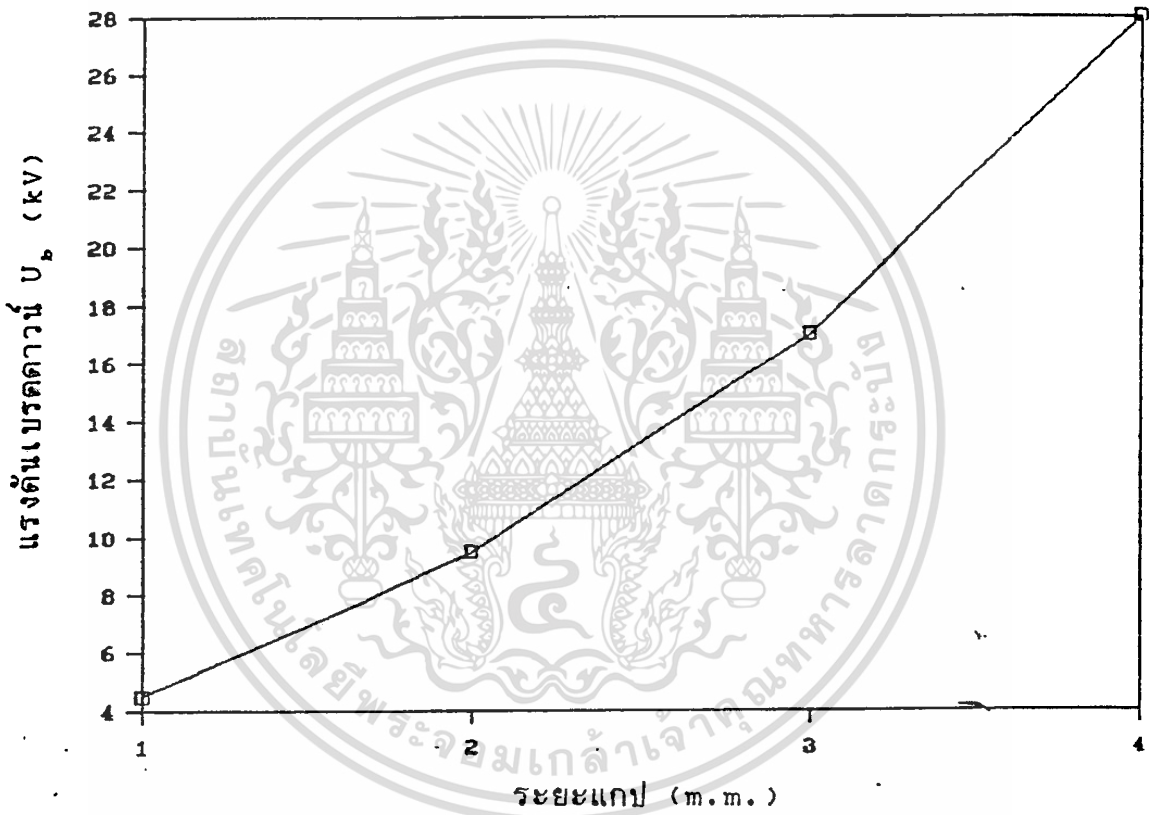
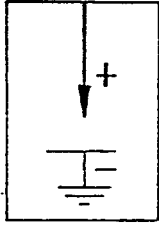
μ = 23.83 kV.

σ = 1.07 kV.

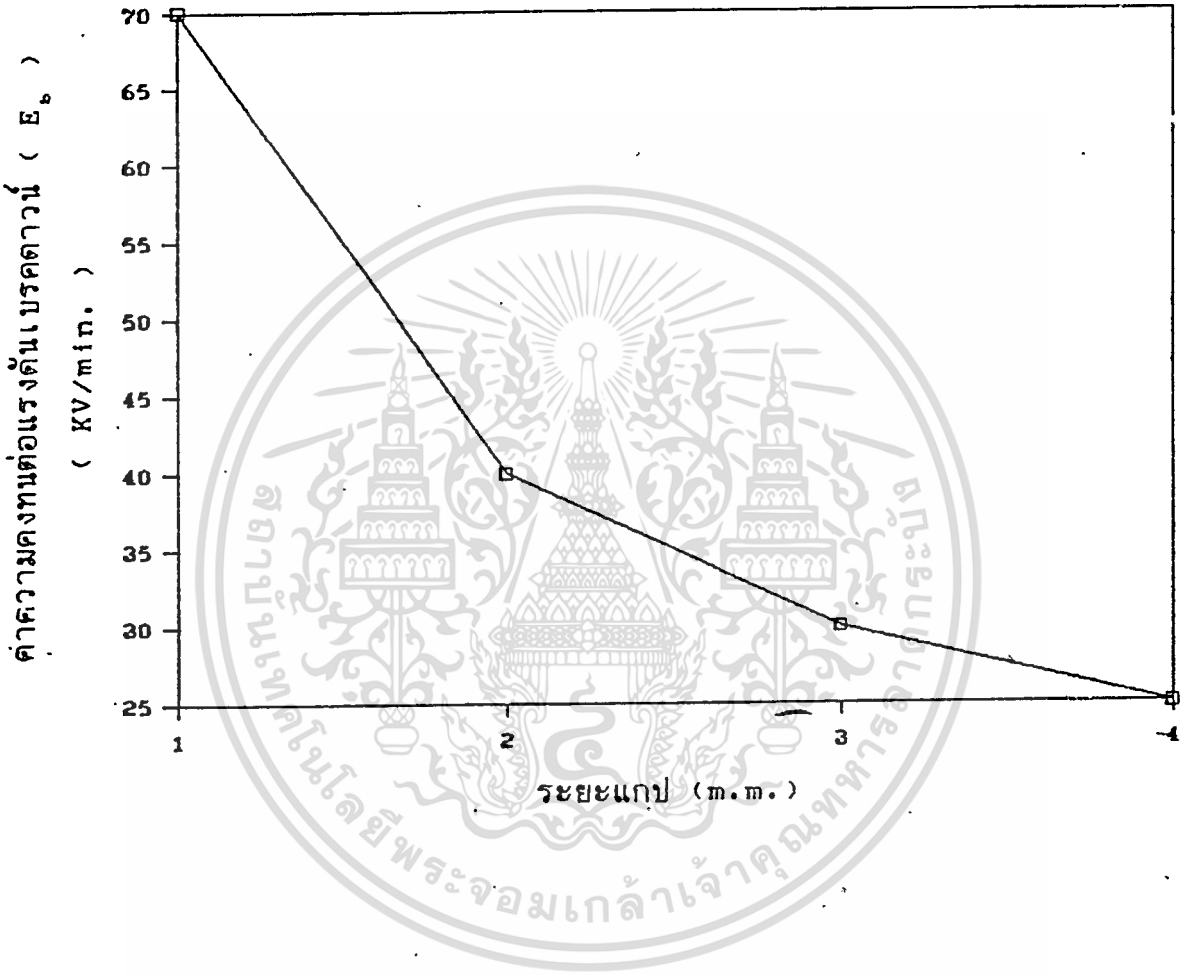
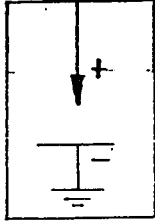


กราฟที่ 4.4.10. แสดงแรงดันเบรคดาวน้ของน้ำมันถั่วเหลือง ทรายงุ่น

โดยอิเล็กโตรดแบบจุดทำจากทองเหลือง-พื้นระนาบเป็นปรอท



กราฟที่ 4.4.11. แสดงค่าแรงดันเบรคตาวนเฉลี่ยกับระยะแกปต่างๆ



กราฟที่ 4.4.12. แสดงค่าความคงทนต่อแรงดันเบรคตาวไน
กับระยะแกปต่างๆ

4.2. วิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นในขณะทดสอบ

จากการทดสอบทั้งหมดที่ผ่านมาจะเกิดปรากฏการณ์ต่างๆ และอิทธิพลสิ่งแวดล้อมต่างๆที่ทำให้แรงดันเบรคดาวนมีค่าไม่แน่นอนซึ่งพอจะแยกได้เป็นดังนี้

ผลของปรากฏการณ์โคโรน่า

ในการทดสอบนี้จะเกิดปรากฏการณ์โคโรน่าบ่อย ซึ่งมีผลทำให้การวัดค่าแรงดันไฟฟ้าผิดไปจากความจริง เมื่อปรากฏการณ์โคโรน่าเกิดขึ้นมีผลทำให้กระแสเริ่มไหลในวงจร เป็นเหตุให้มีการก่อตัวของอะวาลานซ์เป็นไปก่อน ทำให้เกิดการสปาร์คข้ามแถบได้เร็วขึ้น ในการทดสอบนี้ได้เกิดปรากฏการณ์โคโรน่าเป็นผลอันเนื่องมาจากลักษณะของอิเล็กโตรดที่นำมาทดสอบมีแกนขนาดใหญ่พอ ทำให้ไม่สามารถวัดแรงดันเบรคดาวนที่ระยะแถบมากได้ เพราะเมื่อตั้งระยะแถบให้ห่างมากเกินไปแล้วบ่อนแรงดันเบรคดาวนเข้าไปเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้เกิดเสียงฮิสซีแล้วจนระยะเวลานึงฉนวนเหลวจะเริ่มเดือด ซึ่งมีผลทำให้ไม่เกิดการเบรคดาวน

ผลจากความชื้นสัมพัทธ์

ความชื้นในบรรยากาศมีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์โคโรน่าได้ ถ้าในบรรยากาศมีความชื้นอยู่มากจะมีผลทำให้ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของอากาศมีค่าลดลง ความน่าจะเป็นที่แรงดันวิกฤติบนผิวของตัวนำจะทำลายความเป็นฉนวนของอากาศจะมีมากขึ้น ในการทดลองจึงต้องจำกัดขอบเขตของความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศด้วย ในการทดสอบนี้จะให้ค่าแรงดันเบรคดาวนที่ไม่สูงมากก็เนื่องจากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเพราะในขณะทดสอบสภาพอากาศชื้นมีฝนตกซึ่งจะมีผล

4.3. วิเคราะห์ความผิดพลาดจากการทดลอง

ความผิดพลาดในการวัดแรงดันไฟฟ้า

สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงนี้ใช้วิธีอนุกรมระหว่างความต้านทานสูงกับไมโครแอมมิเตอร์ ซึ่งความต้านทานมีค่าสูงถึง 8,000 M มีค่าความผิดพลาดประมาณ 1% ส่วนค่าความผิดพลาดเนื่องจากโวลต์เตจที่เกิดเนื่องจากความต้านทานในไมโครแอมมิเตอร์น้อยมากเมื่อเทียบกับระดับโวลต์เตจที่วัดจึงสามารถตัดทิ้งไปได้ และ ความผิดพลาดที่ทำการทดลองในห้องทดลองที่มีอุณหภูมิไม่ตรงตามมาตรฐาน IEC PUBL 156 ซึ่งทดลอง ณ. อุณหภูมิ 20 ° C ซึ่งเมื่อรวมข้อผิดพลาดในการทดลองนี้สามารถยอมรับได้สำหรับการทดลองทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง

ความผิดพลาดในการตั้งระยะแกป

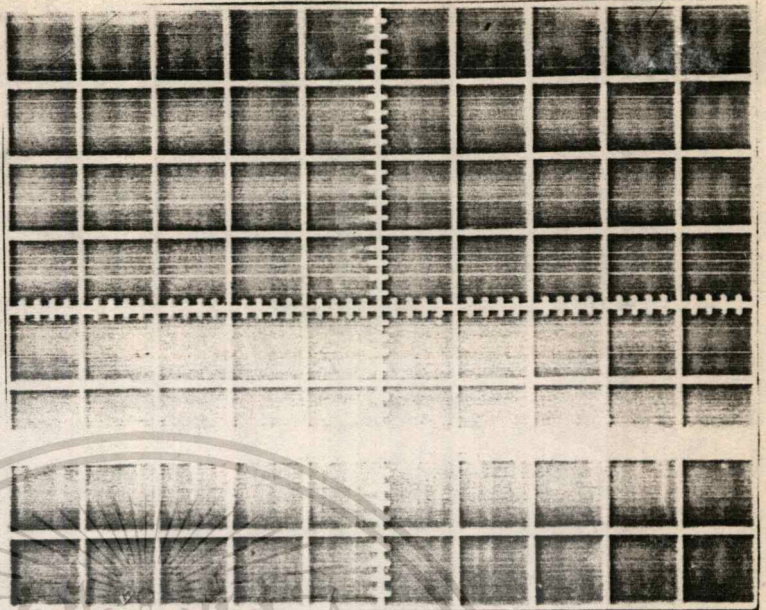
ระยะแกปสามารถตั้งให้ถูกต้องด้วยไดออลไมโครมิเตอร์ที่มีความแม่นยำ 0.01 มม. ดังนั้นความผิดพลาดในการตั้งระยะแกปเป็น 1% ซึ่งถ้ารวมความผิดพลาดทั้งหมดจะได้น้อยกว่า 3.45 %

$V_1 = 38 \text{ KV.}$

Scale

Volt = 0.1 V.

Time/Div. = 1 msec.



รูปที่ 4.1. การเกิดโคโรนาของน้ำมันหม้อแปลง ที่ระยะแกป 2 m.m.

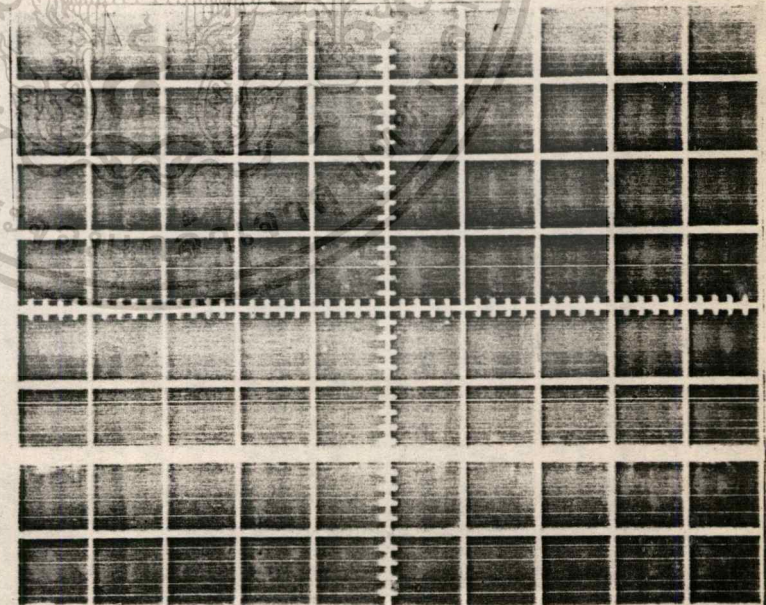
เมื่ออิเล็กโตรดปลายแหลมเป็นขั้วลบ (ทองเหลือง - ทองเหลือง)

$V_1 = 20 \text{ KV.}$

Scale

Volt = 0.2 V.

Time/Div. = 1 msec.



รูปที่ 4.2. การเกิดโคโรนาของน้ำมันหม้อแปลง ที่ระยะแกป 2 m.m.

เมื่ออิเล็กโตรดปลายแหลมเป็นขั้วบวก (ทองเหลือง - ทองเหลือง)

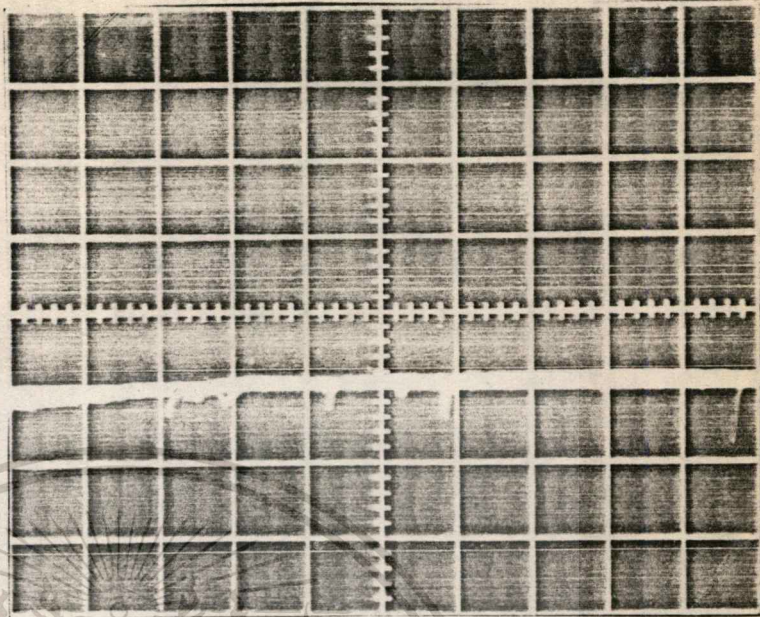
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$V_1 = 14 \text{ KV.}$

Scale

Volt = 10 mV.

Time/Div. = 0.5 msec.



รูปที่ 4.3. การเกิดโคโรนาของน้ำมันหม้อแปลง ที่ระยะแกป 2 m.m.

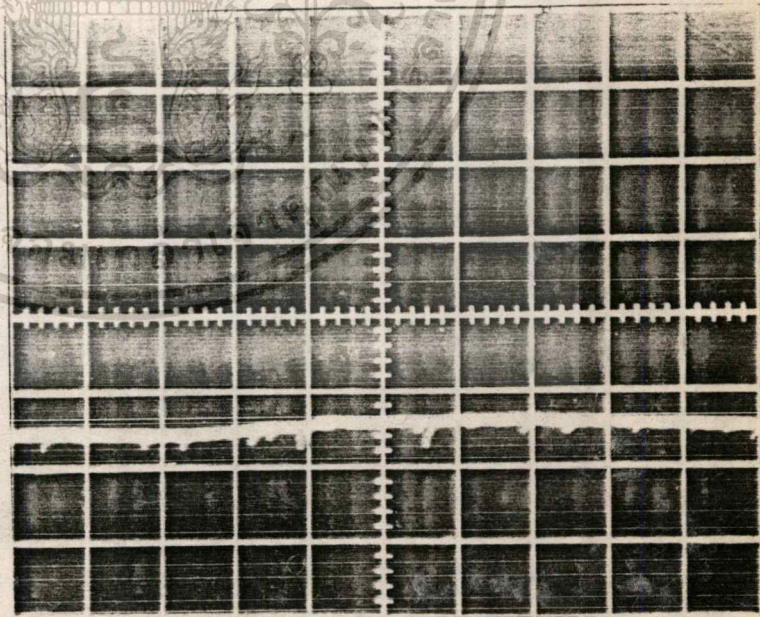
เมื่ออิเล็กโตรดปลายแหลมเป็นซี่ลวด (ทองเหลือง - ปรอท)

$V_1 = 14 \text{ KV.}$

Scale

Volt = 5 mV.

Time/Div. = 1 msec.



รูปที่ 4.4. การเกิดโคโรนาของน้ำมันหม้อแปลง ที่ระยะแกป 2 m.m.

เมื่ออิเล็กโตรดปลายแหลมเป็นซี่ลวด (ทองเหลือง - ปรอท)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปการทดลอง

จากการทดลองทั้งหมดที่ผ่านมาจะเห็นว่าได้ตั้งระยะแกปที่ค่าห่างกันไม่มากเพราะขนาดแกนอิเล็กโตรดเล็ก ถ้าตั้งระยะแกปมากจะเกิดปรากฏการณ์โคโรนามาก ทำให้ได้ค่าแรงดันเบรคดาวมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละระยะแกป และ ในช่วงการทดลองมีสภาวะอากาศไม่แน่นอน เกิดความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสูงทำให้ได้ผลแรงดันเบรคดาวมีค่าผิดพลาดมาก และ จากการทดลองจะได้ผลกระทบที่มีต่อแรงดันเบรคดาวนี้ได้ดังนี้

แรงดันเบรคดาวของน้ำมันพืชจะมีค่าสูงกว่าในน้ำมันหม้อแปลง เพราะ เป็นมาจากโครงสร้างของโมเลกุลของน้ำมันทั้งสองไม่เหมือนกัน การปรับตัวของน้ำมันพืชมีแนวโน้มสูงในช่วงกลางของการทดลอง และ ลดลงในช่วงท้ายของการทดลอง ซึ่งจะต่างจากน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีแนวโน้มการปรับตัวค่อนข้างคงที่ และ ลดลงในช่วงท้ายๆ

แรงดันเบรคดาวที่เกิดจากปลายแหลมขั้วลบ (Negative needle) จะมีค่าสูงกว่าแรงดันเบรคดาวเนื่องจากปลายแหลมขั้วบวก (Positive needle) เพราะผลของประจุค้างตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2.

ลักษณะรูปทรงของอิเล็กโตรดแบบจุด-พื้นระนาบจะให้ค่าสัมประสิทธิ์แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าสูง เกิดประจุค้างได้ง่ายมีผลทำให้แรงดันเบรคดาวสูงขึ้นกรณีป้อนแรงดันลบ และ ลดลงกรณีป้อนแรงดันบวก

ลักษณะของอิเล็กโตรดที่ใช้พื้นระนาบเตด้วยปรอทลงไปหนา 2 m.m. จะให้ค่าแรงดันเบรคดาวมีค่าเกือบเท่ากันทุกครั้งที่ทำการศึกษาทดลองที่ระยะแกปหนึ่งๆ เพราะผลเนื่องมาจากการเกิดเบรคดาวแต่ละครั้งปรอทจะคืนสู่สภาพเดิมตลอดทำให้พื้นที่ผิวปรอทจะราบเรียบอยู่เสมอ เป็นผลทำให้แรงดันเบรคดาวคง

ที่ แต่ถ้าใช้พื้นระนาบเป็นทองเหลืองเมื่อมีการเบรคดาวนแต่ละครั้งจะทำให้พื้นระนาบทองเหลืองมีการสึกกร่อนจึงทำให้พื้นไม่เรียบ และ การเบรคดาวนครั้งต่อไปจะไม่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งเดิมแต่จะเกิดที่ตำแหน่งใหม่บนผิวจึงทำให้ค่าแรงดันเบรคดาวนไม่คงที่เหมือนกับพื้นระนาบเทด้วยปรอท.



เอกสารอ้างอิง

1. S.Kim ,M. Terauchi,K. Yochino and Y. Isuishi,"
Conditioning Effect of Dielectric Breakdown in
Liquid Helium " , Japanese Journal of Appl.
Phys. Vol. 22 No. 6, June 1983
2. จงรักษ์ บุญเส็ง และ นิทัศน์ กฤษณจินดา : การศึกษาผลของ
ความชื้นที่มีต่อแรงดันเบรคดาวน์ในน้ำมันพีช , การประชุมวิชา
การวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 10 , 2530
3. จงรักษ์ บุญเส็ง และ นิทัศน์ กฤษณจินดา : แรงดันเบรคดาวน์
กระแสดตรงของน้ำมันพีช ภายใต้สนามไฟฟ้าสม่่าเสมอ , การประ
ชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 11 , 2531
4. ร.ศ.ต.ร. สำราญ สังข์สะอาด : วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง , ภาค
วิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณท่านอาจารย์ จงรักษ์ บุญเลี้ยง ที่ช่วยเหลือ และ
ให้คำแนะนำทางวิชาการ และ ปฏิบัติ รวมทั้งท่านอาจารย์ทุกคนที่ประสิทธิ์
ประสาทวิชาการให้

วิโรจน์ วรรณะพาหุณ

บริบูรณ์ ม่วงอยู่

20 / 08 / 33





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การทดสอบด้วยไฟฟ้าแรงสูงแบบกระแสตรงของ IEEE

(Tests with Direct Voltage)

2.1 ข้อกำหนดในการทดสอบด้วยไฟฟ้าแรงสูงแบบกระแสตรง

(Requirements of direct voltage tests)

ข้อกำหนดของแรงดันทดสอบ (Requirements of the test voltage) แรงดันทดสอบที่ป้อนให้แก่วัสดุทดสอบจะต้องเป็นแรงดันแบบกระแสตรงที่มีค่า ripple factor ไม่เกิน 5 % ยกเว้นจะมีการกำหนดตามมาตรฐานของอุปกรณ์ทดสอบต่างหากและจะต้องคำึงด้วยว่าเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบในวงจรทดสอบแล้ว จะมีผลต่อค่า ripple factor

2.2 ปริมาณที่ต้องทำการวัด, ความละเอียดในการวัด และข้อกำหนดของระบบการวัด

(Quantities to be measured, Accuracies required and Requirement of the measuring systems)

ปริมาณที่ต้องทำการวัดในการทดสอบด้วยไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงประกอบด้วย

- ค่าเฉลี่ยของแรงดันทดสอบ (mean value of the test voltage)

ซึ่งจะต้องผิดพลาดไม่เกิน 3 %

- ขนาด peak-to-peak voltage ซึ่งจะผิดพลาดไม่เกิน 10 % ของขนาด ripple จริง หรือไม่เกิน 1 % ของค่าเฉลี่ยของแรงดันทดสอบ

ส่วนรายละเอียดของการวัดจะขึ้นอยู่กับระบบที่ทดสอบ โดยในตอนติดตั้งระบบการวัดจะต้องแสดงถึงรายละเอียดต่อไปนี้ของระบบคือ

- 1) ค่าสเกลแฟคเตอร์และช่วงการใช้งานอย่างถูกต้องของค่าดังกล่าว ค่าสเกลแฟคเตอร์ (Scale factors) ของระบบคือ ค่าแฟคเตอร์ตัวคูณซึ่งใช้คูณกับค่าเอาท์พุทที่อ่านได้เพื่อแสดงให้ทราบถึงอินพุทที่ป้อนให้แก่ระบบ โดยค่าแฟคเตอร์นี้อาจเป็นค่าคงที่ค่า

2) คุณสมบัติการตอบสนองของระบบ (Response characteristics) ซึ่งจะขึ้นกับชนิดของแรงดันหรือกระแสที่จะทำการวัด

3) อิทธิพลของวัตถุข้างเคียงต่อสเกลแพคเตอร์และต่อระบบการตอบสนองไม่ว่าวัตถุข้างเคียงจะอยู่ในสภาพที่ถูกกราวด์ (grounded) หรือถูก energized หรือกำลังนำกระแสค่าสูงๆอยู่ที่ตาม ทั้งนี้ระบบการวัดยังต้องบ่งบอกถึงระยะปลอดภัยต่ำสุด (minimum clearance) ของวัตถุข้างเคียงด้วย

4) ผลของขนาดและช่วงการทำงานของแรงดันและกระแสที่ป้อนให้แก่ระบบรวมทั้งสภาวะแวดล้อมขณะทำการทดลองและความสกปรกของผิวหน้าวัสดุทดสอบ (surface contamination) ต่อคุณสมบัติที่วัดได้ของระบบ

5) ความสามารถของระบบการวัดในการทำงานที่ค่ากระแสและแรงดันพิกัดสูงสุด นอกจากนี้ในขณะที่ทำการทดลอง Performance tests ยังต้องบ่งบอกถึงข้อต่อไปนี้

ก) อัตราส่วนแรงดันของตัวแบ่งระดับแรงดัน (Voltage ratio of the voltage divider) หรือค่าอิมพีแดนซ์ที่ใช้กับแรงดันสูง (High-Voltage measuring impedance) ซึ่งต้องผิดพลาดไม่เกิน 1 %

ข) ค่ากระแสที่ถูกดึงโดยตัวแบ่งระดับแรงดันหรืออิมพีแดนซ์แรงดันสูงต้องไม่น้อยกว่า 0.05 มิลลิแอมป์

ค) คุณสมบัติการตอบสนองความถี่ของระบบที่ใช้วัดค่าแรงดัน ripple จะต้องถูกต้องแม่นยำเพียงพอในช่วง 10 % สำหรับการใช้งานที่ความถี่ตั้งแต่ความถี่มูลฐาน (fundamental frequency) ของแรงดัน ripple จนกระทั่งถึงความถี่ 5 เท่าของความถี่มูลฐาน

2.3 ขบวนการในการทดสอบ (Test procedures)

2.3.1 การทดสอบช่วงระยะสั้น (Rated withstand voltage tests)

กระทำได้โดยป้อนแรงดันแก่อุปกรณ์ทดสอบ โดยค่าแรงดันเริ่มแรกที่ป้อนจะต้องมีค่าต่ำเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดแรงดันเกิน (overvoltage) อันเนื่องมาจากการ

เอกสารนี้ **switching transients** หลังจากได้แจ้งคํอขยฯ เ้แจ้งแรงดันขึ้นอย่างช้าๆขนาดที่ก้ทำให้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถอ่านค่าที่วัดได้อย่างละเอียดตามต้องการ แต่การเพิ่มแรงดันอย่างช้าๆนี้ต้องไม่ทำให้ความเครียดของอุปกรณ์ทดสอบที่ระดับแรงดันทดสอบนานเกินความจำเป็น ซึ่งโดยปกติแล้วที่แรงดันเกิน 70 % ของแรงดันสุดท้ายที่ประมาณไว้จะนิยมเพิ่มแรงดันขึ้นด้วยอัตรา 2 % ของแรงดันทดสอบต่อวินาที และจะรักษาระดับแรงดันนั้นไว้ประมาณ 1 นาที ถ้าวัสดุทดสอบสามารถทนทานระดับแรงดันนั้นได้โดยไม่เกิดการดีสชาร์จแบบ disruptive ขึ้นก็แสดงว่าวัสดุทดสอบนั้นผ่านการทดสอบช่วงระยะสั้น

2.3.2 การทดสอบแรงดันดีสชาร์จแบบ disruptive ที่แน่นอน

(Assured disruptive discharge voltage tests)

เป็นการทดสอบค่าแรงดันดีสชาร์จแบบ disruptive ที่เกิดขึ้นจริง โดยชนวนการทดสอบก็เช่นเดียวกับการทดสอบช่วงระยะสั้น แต่ทำการเพิ่มแรงดันจนกระทั่งเกิดการดีสชาร์จแบบ disruptive ขึ้นที่วัสดุทดสอบ ก็จะได้แรงดันที่ทำให้เกิดการดีสชาร์จแบบ disruptive ที่แน่นอนตามต้องการ

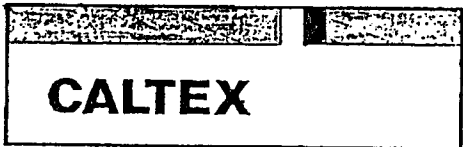
2.4 ข้อควรระวังและที่อาจทำให้เกิดความผิดพลาดในการทดสอบ

(Precautions and possible source of error)

1) เมื่อทำการทดสอบด้วยความต้านทานสูงๆโดยใช้แรงดันกระแสตรงควรระวังข้อผิดพลาดอันเนื่องมาจากกระแสโคโรน่า หรือกระแสลัดแกจ(leakage currents) ที่เกิดพร้อมผิวหน้าฉนวนที่สกปรกหรือขึ้นได้ ดังนั้นในการทดลองจึงควรใช้อิเล็กโตรดที่กลมมนที่สุด และผิวหน้าราบเรียบที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

2) ข้อผิดพลาดในการทดสอบอาจจะมีผลเนื่องมาจากคุณสมบัติของตัวต้านทาน ซึ่งมักจะมีค่าผิดพลาด ไปบ้างที่ระดับแรงดันหรืออุณหภูมิทดสอบสูงๆ หรือเนื่องมาจากเครื่องมือที่ใช้วัดเมื่อมีกระแสสูงๆไหลผ่าน

3) สำหรับ Generating voltmeter และ Electrostatic voltmeter นั้นอาจจะมีค่าผิดพลาดอันเนื่องมาจากการ distortion ของสนามไฟฟ้าไปในอากาศ หรือไปตามผิวหน้าของวัตถุฉนวน ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามประจุไฟฟ้าสถิตย์ที่เกิดขึ้น



TRANSFORMER OIL

ELECTRICAL INSULATING OILS

DESCRIPTION

Caltex Transformer Oil is a high quality electrical insulating oil that is specially refined and processed to meet the requirements of major US electrical equipment manufacturers. Careful processing and handling ensure that the oil is stable and free of water and other contaminants, and remains free of contaminants until it reaches the user.

Caltex Transformer Oil meets the Westinghouse specification for WEMCO Oil, the General Electric specification for GE 10 C Oil and ASTM D 3487, Type 1.

Caltex Transformer Oil does not contain polychlorinated biphenyls (PCBs)

APPLICATION

Caltex Transformer Oil is recommended for use as an electrical insulating oil in applications such as transformers and oil immersed switchgear where an oil meeting the GE, Westinghouse, ASTM or other comparable specification is required by the equipment manufacturer or user. It should not, of course, be used where safety considerations require the use of a nonflammable insulating oil.

PERFORMANCE QUALITIES

Good insulating properties, indicated by high dielectric strength and low power factor (dielectric loss), are the result of careful control in manufacture and handling. High dielectric strength ensures good insulation of electrical conductors and prevention of arcing between electrodes under the voltage stresses encountered in normal insulating oil service. Low loss tangent minimizes energy loss due to the changing polarity of the alternating current.

Good heat transfer and fluid flow characteristics as a result of low, controlled viscosity and low pour point. This assures effective cooling of transformer cores and windings, and freedom of movement of switches, circuit breakers, pumps, regulators, load tap changer mechanisms, etc.

Excellent oxidation stability minimizes development of sludge and acidity in storage and service. Sludge and acidity can have an adverse effect on the electrical properties and cooling ability of the oil, and shorten service life.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

The dielectric breakdown strength of an insulating material is a measure of its resistance to electrical breakdown when an electric potential is applied across it. The actual value obtained in a test is a function of both the insulating ability of the material under test, and the test conditions. Electrical insulating oils are tested by immersing two electrodes in a sample of the oil, then applying an AC voltage across the electrodes. The voltage is then increased in a specified manner until electrical breakdown occurs. The various tests used differ in electrode shape and spacing, and rate of increase of voltage, and thus give different breakdown values for the same oil. The important consideration, however, is that oils meeting the minimum dielectric breakdown strength specified in any of the current specifications, regardless of the test method specified, have adequate insulating ability for all normal applications for which they are recommended.

The dielectric strength of an insulating oil is reduced if there is water or solid particles in the oil. Oxidation products resulting from oil deterioration in service also lower the dielectric strength. As a result, periodic checks of the dielectric strength of an oil can be a useful method of determining if contamination or deterioration of the oil has occurred.

Any two adjacent conductors form a capacitor. In a theoretically perfect capacitor, the phase difference between an applied AC voltage and the current is 90° and the power dissipated is zero. If the dielectric between the conductors is less than perfect, the phase difference will be less than 90° and some power dissipation will occur. In order to keep this loss low, it is desirable to have the dielectric as near perfect as is practical. For insulating oils the value for this characteristic that is reported

This bulletin was prepared in good faith from the best information available at the time of issue. However, users should verify current characteristics and confirm that products are acceptable for intended applications. Printed in England

November 1983



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

is the power factor, or loss tangent, expressed either as a percent or as a decimal at a specified temperature. These values are determined experimentally and represent trigonometric functions of the angle of phase difference. With the particular functions used, a value of zero would represent a 90° phase difference and the ideal condition, so low values are desirable.

Oxidation and contamination of an oil can cause power factor or loss tangent of an oil to rise, so determination of this property may provide useful information about a used electrical insulating oil. Since these values vary with temperature, comparisons must always be made at the same temperature.

The resistivity of an electrical insulating oil is a measure of the resistance to DC current flow between opposite faces of a centimeter cube of the oil. The resistivity of mineral insulating oil is naturally high but, as with loss tangent, is very sensitive to the presence of even minute amounts of suspended water, free ions or ion-forming materials such as acidic oxidation products or polar contaminants. Again, measurement of the resistivity of a used insulating oil may provide useful information as to whether or not the oil is suitable for further service.

**LIMITING ELECTRICAL PROPERTIES
CALTEX TRANSFORMER OIL**

Dielectric Strength (Breakdown), kV	
Disk Electrodes (ASTM D877)	30 min
VDE Electrodes (ASTM D1816)	
1.02 mm gap	28 min*
2.04 mm gap	56 min*
Power Factor, %	
At 25°C	0.05 max
At 100°C	0.30 max

* These limits apply only to new oil which has been filtered, dehydrated and degassed.

SERVICE CONSIDERATIONS

The sensitivity of the electrical properties of electrical insulating oils to contaminants such as water and solid particles makes it extremely important to handle and store these products so that the risk of contamination is minimized. As a general rule, all

shipments of electrical insulating oils, should be tested for dielectric strength before being placed in service. If the dielectric breakdown strength is low, the oil should be reconditioned by filtration and/or dehydration.

Drums of electrical insulating oils should be stored indoors if at all possible. If drums must be stored outside, they should be placed on their sides on racks that will keep them clear of any ground water. The bungs should be horizontal so the weight of the oil in the drum will be against the bungs to prevent breathing of moisture. The drums should be covered with a waterproof cover to keep off rain, and to protect the drum markings from being obliterated.

Electrical insulating oils should be checked in service at periodic intervals to determine if they are suitable for continued service. Proper sampling and inspection of the equipment are important to obtain maximum benefits from this checking. Information on proper sampling techniques are contained in ASTM Standard D923, IP Standard 51, and Caltex Technical Bulletin 90.

OTHER SPECIFICATIONS

Although not routinely tested for compliance, experience has shown that most production batches of Caltex Transformer Oil will meet the requirements of the following specifications:

- Canadian Standard C50
- British Standard BS 148:1959 (non-current)
- British Standard BS 148:1972
- IEC 296, Class I
- Australian Standard 1767
- Japanese Industrial Standard C2320

Where confirmation of the foregoing is desired by a potential user, further information and test data can be furnished on request.

TYPICAL TESTS

The physical and chemical properties shown in the table are average values based on recent production. They are not limiting values. Minor variations which do not affect product performance are to be expected in normal manufacture.

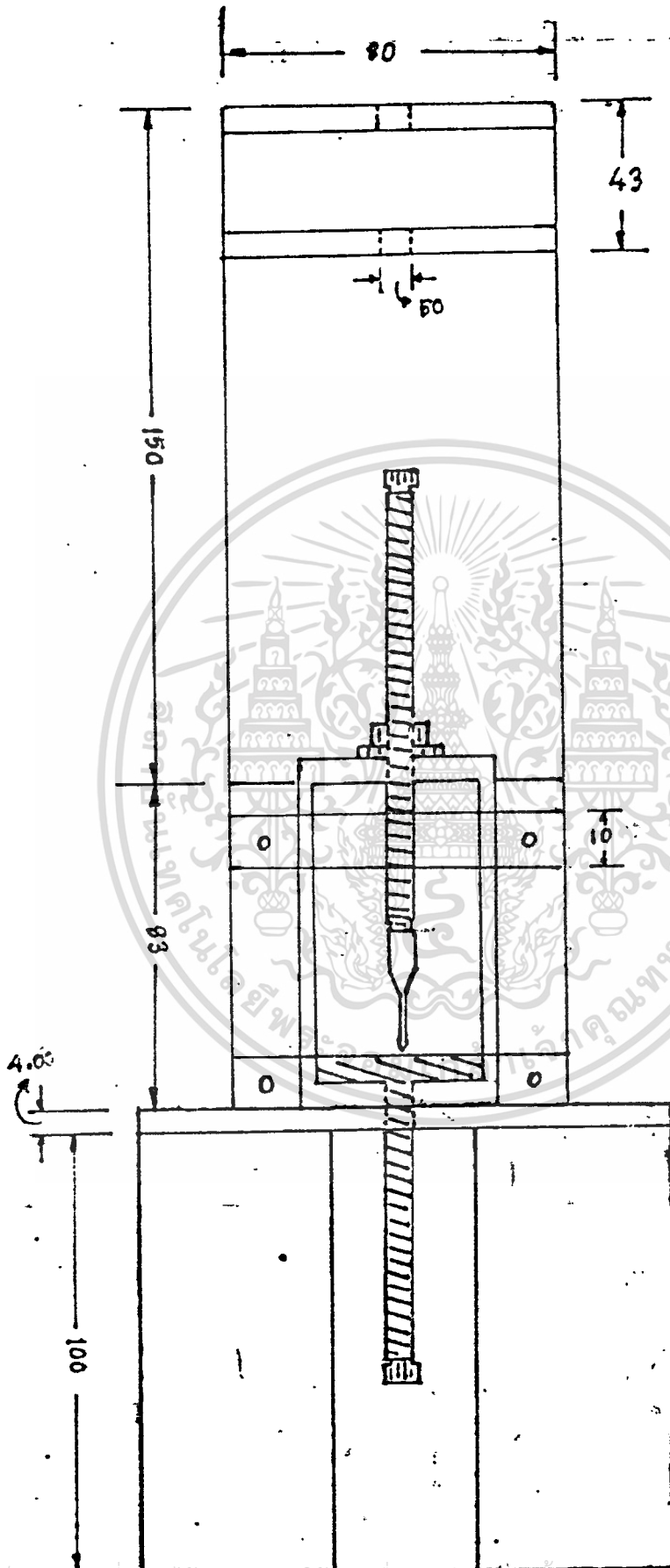
CALTEX TRANSFORMER OIL	
Corrosive Sulfur, ASTM D1275	Pass
Density, Kg/litre @ 15°C	0.884
Flash Point, COC, °C	147
Interfacial Tension Dynes/cm @ 25°C	40
Oxidation Stability ASTM D2440	
Total Acid Number, mg KOH/g	0.27
Sludge, Mass %	0.08
Westinghouse MTS-80171, Hours	200
Pour Point, °C	- 42
Total Acid Number, mg KOH/g	0.01
Viscosity, Kinematic cSt @ 0°C	58.6
cSt @ 40°C	8.68
Water Content, ASTM D 1533, mg/kg	25

INHIBITED TRANSFORMER OIL

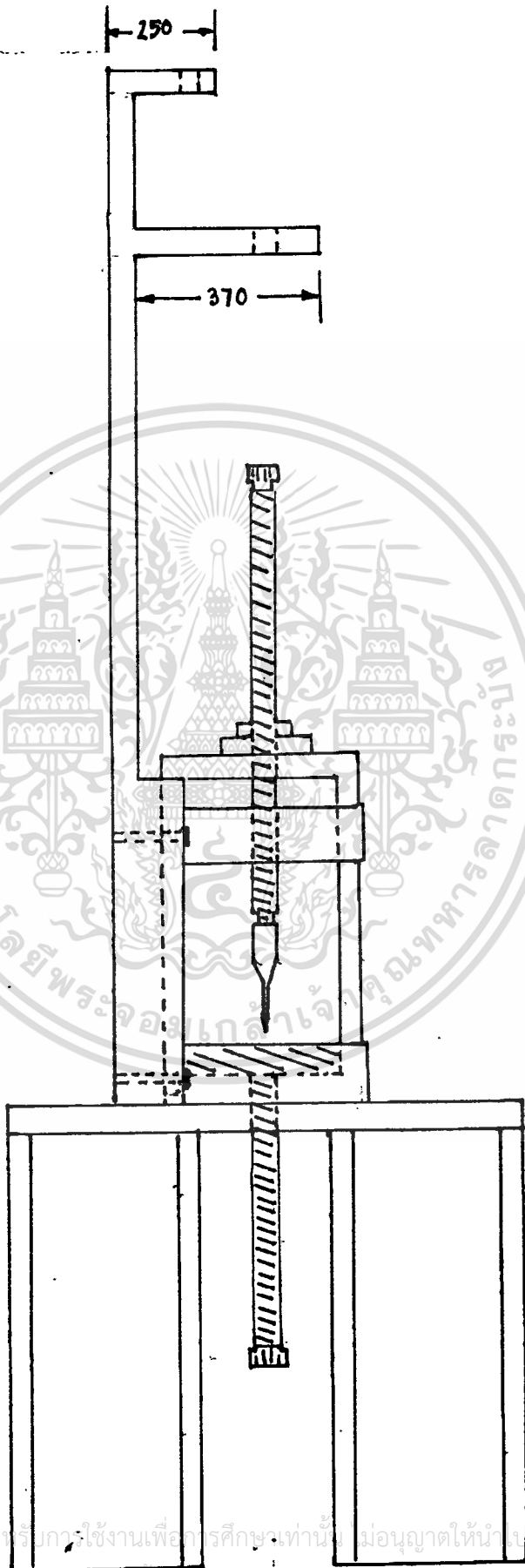
An oxidation inhibited product such as Caltex Transformer Oil (Inhibited) may be desired for transformers designed to operate at elevated temperature or in distribution transformers operated for long periods without maintenance. Caltex Transformer Oil (Inhibited) is an oxidation inhibited version of Caltex Transformer Oil which contains 0.15 to 0.30 percent by weight of the anti-oxidant. Additional information and data on Caltex Transformer Oil (Inhibited) is available on request.



ภาคผนวก ค

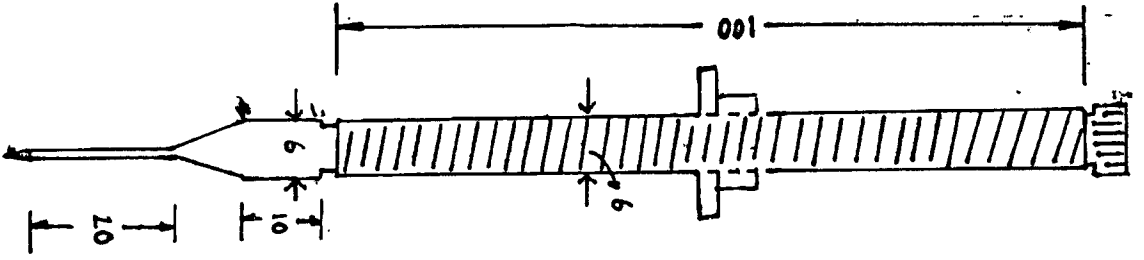


FRONT VIEW

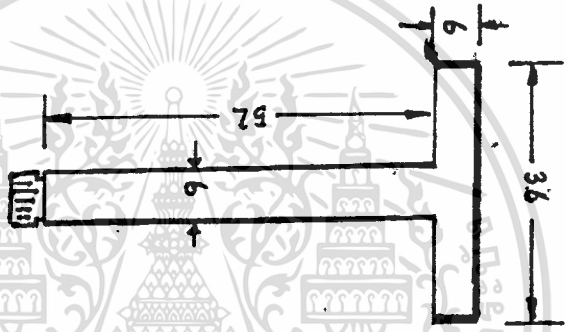


SIDE VIEW

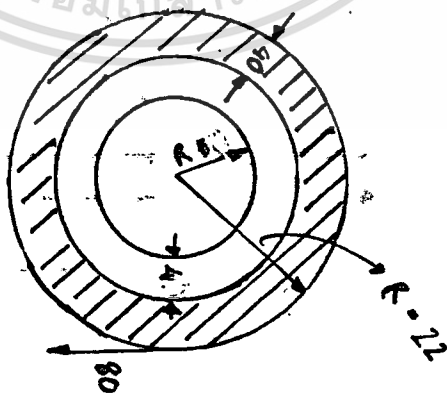
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ประกอบการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง **SCALE** ไป 1:1.5



FRONT VIEW
SCALE 1:1



หน้าตัด บรรทัดขนาด 1



TOP VIEW
SCALE 1:1