



การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อแรงดันเบรคดาวน์ในน้ำมันพืช

THE STUDY OF SOME FACTORS THAT AFFECT BREAKDOWN VOLTAGE OF VEGETABLE OILS



จงรักษ์ บุญเส็ง

Mr. CHONGRAG BOONSENG

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์นัทธัน กฤษณจินดา EE.(Ohio)

ADVISOR

Mr. NITHAD KRISNACHINDA EE.(Ohio)

เลขหมู่

เลขทะเบียน 13123

วัน, เดือน, ปี -4.ธ.ค.2532

วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา 2531 มอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
สารบัญรูปภาพ	ก
สารบัญตาราง	ข
สัญลักษณ์	ค
บทคัดย่อ	ง
Abstract	จ
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีการเบรคดาวน์ในฉนวนเหลว	4
2.1 บทนำ	4
2.2 ทฤษฎีการเบรคดาวน์แบบอิเล็กทรอนิกส์	4
2.3 สรุป	12
บทที่ 3 การคำนวณสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอในฉนวนเหลว	13
3.1 บทนำ	13
3.2 การเกิดอิเล็กทรอนิกส์คอลทรีอิง (Electrical Treeing Model)	13
3.3 สรุป	20
บทที่ 4 ปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการเบรคดาวน์ในฉนวนเหลว	23
4.1 บทนำ	23
4.2 วิธีการทดลอง	23
4.3 ระยะเวลา	24
4.4 รัศมีความโค้งของอิเล็กโตรด	24
4.5 รูปทรงทางเรขาคณิตของอิเล็กโตรด	24
4.6 สารโลหะที่ใช้ทำอิเล็กโตรด	25

สารบัญ(ต่อ)

	หน้าที่
4.8 อิเล็กโตรด โคตติง	28
4.9 อุกทุมิ	28
4.10 ความดัน	30
4.11 สนามแม่เหล็กไฟฟ้า	30
4.12 จำนวนอะตอมของคาร์บอน	30
4.13 ผลทางเวลา	32
4.14 ความชื้น	32
4.15 สิ่งเจือปนของแข็ง	34
4.16 ฟองอากาศ	34
4.17 สารละลายและออกซิเจน	34
4.18 แผ่นฉนวนบางกั้น	36
4.19 ประจุค้าง(space charge)	36
4.20 ขั้วโมเลกุล (polarity effect)	36
4.21 โครงสร้างโมเลกุล	38
4.22 สรุปร	42
บทที่ 5 โครงสร้างโมเลกุลของน้ำมันพืช	43
5.1 บทนำ	43
5.2 องค์ประกอบของน้ำมันพืช	44
5.3 การเปรียบเทียบโครงสร้างโมเลกุลฉนวนเหลวกับน้ำมันพืช	45
5.3.1 ไฮโดรคาร์บอนเหลวจำพวกแนพทาซีน	45
5.3.2 ไฮโดรคาร์บอนเหลวจำพวกพาราฟิน	45
5.3.3 สารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวกอะโรมาติก	46
5.3.4 น้ำมันซิลิโคน	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้าที่
5.3.5 สารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวกคลอรีเนต	48
5.3.6 น้ำมันคาสเตอร์	48
5.4 สรุป	48
บทที่ 6 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	49
6.1 บทนำ	49
6.2 ชุดอุปกรณ์การทดลอง	49
6.2.1 แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง	50
6.2.2 หน่วยควบคุมแรงดันไฟฟ้า	51
6.2.3 ชุดภาชนะทดสอบ	52
6.2.4 ชุดอุปกรณ์เครื่องมือวัด	52
6.2.5 การวัดระยะแกป	52
6.3 ระบบอิเล็กทรอนิกส์	53
6.3.1 อิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลม	53
6.3.2 อิเล็กทรอนิกส์แบบจุด	53
6.3.3 อิเล็กทรอนิกส์แบบจานกลม	53
6.3.4 อิเล็กทรอนิกส์แบบพื้นระนาบ	53
6.3.5 อิเล็กทรอนิกส์แบบใหม่	53
6.4 วิธีการทดลอง	54
6.4.1 การเตรียมชุดภาชนะทดสอบ	54
6.4.2 การเตรียมน้ำมัน	55
6.4.3 การวัดแรงดันเบรคควาน์ของฉนวนเหลว	55
6.5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	56

สารบัญ(ต่อ)

	หน้าที่
บทที่ 7 ผลการทดลองและวิจารณ์	57
7.1 บทนำ	57
7.2 การทดสอบเบื้องต้น	58
7.2.1 ผลของอุปกรณ์ตัดตอนวงจรไฟฟ้า	58
7.2.2 ผลของปรากฏการณ์โคโรน่า	58
7.2.3 การวัดแรงดันสูง	59
7.2.4 การวัดแรงดันสูงด้วยช่องว่างระหว่างทรงกลม	60
7.2.5 ผลของความชื้นสัมพัทธ์	60
7.2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเบรคดาวน์ ของ ไฟฟ้ากระแสลับและกระแสตรง	62
7.3 การวิเคราะห์ความผิดพลาดจากการทดลอง	63
7.3.1 ความผิดพลาดในการวัดแรงดันไฟฟ้า	63
7.3.2 ความผิดพลาดในการตั้งระยะแกป	63
7.4 การทดลองที่ 1 การปรับตัวของฉนวนเหลวและ ผลของสารที่ใช้ทำอิลีคโตรด	64
7.5 การทดลองที่ 2 ขนาดพื้นที่ผิวของอิลีคโตรด	78
7.6 การทดลองที่ 3 รูปทรงทางเรขาคณิตของอิลีคโตรด	87
7.7 การทดลองที่ 4 ระยะห่างระหว่างอิลีคโตรด	96
7.8 การทดลองที่ 5 แผ่นฉนวนกันระหว่างอิลีคโตรด	117
7.9 การทดลองที่ 6 ความหนืดและอุณหภูมิ	125
7.10 การทดลองที่ 7 โครงสร้างและหัวโมเลกุลกับอิลีคโตรดโคตติง	129
7.11 การทดลองที่ 8 ประจุค้างในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ	133
7.12 การปรับปรุงแรงดันเบรคดาวน์	139

สารบัญ(ต่อ)

	หน้าที่
บทที่ 8 สรุปผลการทดลอง	141
เอกสารอ้างอิง	146
กิตติกรรมประกาศ	151
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก	152
ภาคผนวก ข	155
ภาคผนวก ค	171



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

	หน้าที่
รูปที่ 3.2.1 แสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าในทอมของสนามไฟฟ้าในของเหลว [15]	14
รูปที่ 3.2.2 แสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าในทอมของสนามไฟฟ้าสูงๆ ในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า [9]	14
รูปที่ 3.2.3 แสดงความสัมพันธ์ของพิกัดการนำกระแสไฟฟ้าในทอมของสนามไฟฟ้าสูงๆ ในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า [9]	14
รูปที่ 3.2.4 แสดงลักษณะของชุดภาชนะทดสอบในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ	15
รูปที่ 3.2.5 แสดงรูปแบบจำลองของอิเล็กโตรดทรงกลมมีจุดศูนย์กลางร่วมกัน	15
รูปที่ 3.2.6 แสดงการจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง E_r ในทอมของ r	21
รูปที่ 3.2.7 แสดงการจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง E_r/E_0 ในทอมของ r	21
รูปที่ 3.2.8 แสดงการจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง E_r/E_0 ในทอมของ b	22
รูปที่ 4.7 แสดงผลของพื้นที่ผิวของอิเล็กโตรดต่อค่าแรงดันเบรคดาวน์ [16]	27
รูปที่ 4.8.1 แสดงผลของอิเล็กโตรดโคทิง โดยใช้โพลีทินโอเพนทีนหนา $1 \mu m$ ในอีเลียมเหลว ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรง [3]	27
รูปที่ 4.8.2 แสดงผลของอิเล็กโตรดโคทิง โดยใช้โพลีทินโอเพนทีนหนา $0.25 \mu m$ ในอีเลียมเหลว ภายใต้สนามไฟฟ้าแบบพัลส์ $6 \mu sec$ [3]	27
รูปที่ 4.8.3 แสดงผลของอิเล็กโตรดโคทิง โดยใช้โพลีทินโอเพนทีนหนา $1 \mu m$ ในอีเลียมเหลว ภายใต้สนามไฟฟ้าแบบพัลส์ $6 \mu sec$ [3]	27
รูปที่ 4.9 แสดงถึงความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในทอมของอุณหภูมิในเฮกเซน [16]	29
รูปที่ 4.10 แสดงความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในทอมของความดัน ในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า [2]	29
รูปที่ 4.13.1 แสดงความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในทอมของการป้องกันความยาวพัลส์ [16]	31
รูปที่ 4.13.2 แสดงความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในทอมของระยะเวลาป้องกันแรงดันของพัลส์ ในไฮโดรคาร์บอนเหลว [16]	31
รูปที่ 4.13.3 แสดงความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในทอมของระยะเวลาป้องกันแรงดันของพัลส์ ในไฮโดรคาร์บอนเหลว [16]	33
รูปที่ 4.14 แสดงความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในทอมปริมาณความชื้นเยน ของน้ำมันหม้อแปลง [2]	33
รูปที่ 4.17.1 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ในทอมระยะแกป โดยผสมสาร 1-methylnaphthalene อิเล็กโตรดทรงกลม ทำจากอลูมิเนียม ก) และเหล็กสแตนเลส ข) [12]	35

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้าที่
รูปที่ 4.17.2 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ในเทอมระยะแกป โดยผสมสาร 1-methylnaphthalene และออกซิเจน อิเล็กโตรดทรงกลม ทำจากอลูมิเนียม ก) และเหล็กแอสตนเลส ข)[12]	35
รูปที่ 4.20.1 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ในเทอมของระยะแกป ในไนโตรเจนเหลว[4]	37
รูปที่ 4.20.2 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ในเทอมของระยะแกป ในฮีเลียมเหลว[4]	37
รูปที่ 4.20.3 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ในเทอมของระยะแกป [10]	39
รูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างของโมเลกุลของสารอินทรีย์ [10]	40
รูปที่ 5.1 แสดงองค์ประกอบขั้นพื้นฐานในโมเลกุลของน้ำมันพืช	43
รูปที่ 5.3.1 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของฉนวนไฮโดรคาร์บอนเหลวจำพวกแนพทาลิน[2]	45
รูปที่ 5.3.2 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของฉนวนไฮโดรคาร์บอนเหลวจำพวกนารานีน[2]	45
รูปที่ 5.3.3 ก) แสดงโครงสร้างของโมเลกุลสารประกอบ ไฮโดรคาร์บอนจำพวกอะโรมาติก[21]	46
รูปที่ 5.3.3 ข) แสดงโครงสร้างของโมเลกุลสารประกอบ ไฮโดรคาร์บอนจำพวกอะโรมาติก[21]	47
รูปที่ 5.3.4 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของน้ำมันซิลิโคน[2, 21]	47
รูปที่ 5.3.6 แสดงโครงสร้างกรดไขมันที่ประกอบในโมเลกุลของน้ำมันคาสเตอร์[51]	48
รูปที่ 6.2.1 แสดงแผนภาพของแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงพิกัด -600 kV	50
รูปที่ 6.2.2 แสดงหน่วยควบคุมแรงดันไฟฟ้า	51
รูปที่ 6.3.5 แสดงแผนภาพของอิเล็กโตรดแบบใหม่	54
รูปที่ 6.4.2 แสดงวิธีการวัดความชื้นในน้ำมันทดสอบ	55
รูปที่ 7.2.3 แสดงวิธีการวัดแรงดันแบบอนุกรมระหว่างความต้านทาน และไมโครแอมมิเตอร์	59
รูปที่ 7.2.4 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรคดาวน์ ในช่องว่างระหว่าง ทรงกลม ขนาด 250 ม.ม. มาตรฐาน IEC Publ.52 กับแรงดันเบรคดาวน์ ทดสอบในห้องทดลอง ในเทอมของระยะแกป ที่อุณหภูมิ 27 °C	61
รูปที่ 7.4.1 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ต่อเนื่องในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์ โดยอิเล็กโตรด ทรงกลม-ทรงกลม ทำจากเหล็กแอสตนเลส เส้นผ่าศูนย์กลาง 13 ม.ม. ระยะแกป 2.5 ม.ม. อุณหภูมิ 29.7 °C	66

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หน้าที่

รูปที่ 7.4.2	แสดงแรงดันเบรคดาวต่อเนื่องในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์ โดยอิเล็กทรอนิกส์-ทรงกลม ทำจากอลูมิเนียมเส้นผ่าศูนย์กลาง 13 ม.ม. ระยะแกป 2.5 ม.ม. อุณหภูมิ 29 °C	67
รูปที่ 7.4.3	แสดงแรงดันเบรคดาวต่อเนื่องในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์ โดยอิเล็กทรอนิกส์-ทรงกลม ทำจากทองเหลืองเส้นผ่าศูนย์กลาง 13 ม.ม. ระยะแกป 2.5 ม.ม. อุณหภูมิ 29 °C	68
รูปที่ 7.4.4	แสดงแรงดันเบรคดาวต่อเนื่องในน้ำมันถั่วเหลือง โดยอิเล็กทรอนิกส์-ทรงกลม ทำจากเหล็กสแตนเลส เส้นผ่าศูนย์กลาง 13 ม.ม. ระยะแกป 2.5 ม.ม. อุณหภูมิ 30 °C	69
รูปที่ 7.4.5	แสดงแรงดันเบรคดาวต่อเนื่องในน้ำมันถั่วเหลือง โดยอิเล็กทรอนิกส์-ทรงกลม ทำจากอลูมิเนียม เส้นผ่าศูนย์กลาง 13 ม.ม. ระยะแกป 2.5 ม.ม. อุณหภูมิ 28 °C	70
รูปที่ 7.4.6	แสดงแรงดันเบรคดาวต่อเนื่องในน้ำมันถั่วเหลือง โดยอิเล็กทรอนิกส์-ทรงกลม ทำจากทองเหลือง เส้นผ่าศูนย์กลาง 13 ม.ม. ระยะแกป 25 ม.ม. อุณหภูมิ 30 °C	71
รูปที่ 7.4.7	แสดงแรงดันเบรคดาวต่อเนื่องในน้ำมันรำข้าว โดยอิเล็กทรอนิกส์-ทรงกลม ทำจากเหล็กสแตนเลส เส้นผ่าศูนย์กลาง 13 ม.ม. ระยะแกป 25 ม.ม. อุณหภูมิ 28 °C	72
รูปที่ 7.4.8	แสดงแรงดันเบรคดาวต่อเนื่องในน้ำมันรำข้าว โดยอิเล็กทรอนิกส์-ทรงกลม ทำจากอลูมิเนียม เส้นผ่าศูนย์กลาง 13 ม.ม. ระยะแกป 25 ม.ม. อุณหภูมิ 30 °C	73
รูปที่ 7.4.9	แสดงแรงดันเบรคดาวต่อเนื่องในน้ำมันรำข้าว โดยอิเล็กทรอนิกส์-ทรงกลม ทำจากทองเหลืองเส้นผ่าศูนย์กลาง 13 ม.ม. ระยะแกป 25 ม.ม. อุณหภูมิ 29 °C	74
รูปที่ 7.4.10	แสดงแรงดันเบรคดาวต่อเนื่องในน้ำมันปาล์ม โดยอิเล็กทรอนิกส์-ทรงกลม ทำจากเหล็กสแตนเลสเส้นผ่าศูนย์กลาง 13 ม.ม. ระยะแกป 25 ม.ม. อุณหภูมิ 29 °C	75
รูปที่ 7.4.11	แสดงแรงดันเบรคดาวต่อเนื่องในน้ำมันปาล์ม โดยอิเล็กทรอนิกส์-ทรงกลม ทำจากอลูมิเนียมเส้นผ่าศูนย์กลาง 13 ม.ม. ระยะแกป 25 ม.ม. อุณหภูมิ 30 °C	76

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หน้าที่

รูปที่ 7.4.12 แสดงแรงดันเบรคดาวต่อเนื่องในน้ำมันปาล์ม โดยอิเล็กทรอนิกส์ ไตรดทรงกลม-ทรงกลม ทำจากทองเหลืองเส้นผ่าศูนย์กลาง 13 ม.ม. ระยะแกป 25 ม.ม. อุณหภูมิ 27 °C	77
รูปที่ 7.5.1 แสดงแรงดันเบรคดาวและความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในน้ำมันหม้อแปลง ไฟฟ้าคาลเท็กซ์ ในเทอมระยะแกป(ก) และการปรับตัวของฉนวน(ข) โดยอิเล็กทรอนิกส์ ไตรดจานกลม-จานกลม ทำมาจากทองเหลือง มีรัศมี 12.5 ม.ม. อุณหภูมิ 29 °C	79
รูปที่ 7.5.2 แสดงแรงดันเบรคดาวและความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในน้ำมันหม้อแปลง ไฟฟ้าคาลเท็กซ์ ในเทอมระยะแกป(ก) และการปรับตัวของฉนวน(ข) โดยอิเล็กทรอนิกส์ ไตรดจานกลม-จานกลม ทำมาจากทองเหลือง มีรัศมี 6.25 ม.ม. อุณหภูมิ 29 °C	80
รูปที่ 7.5.3 แสดงแรงดันเบรคดาวและความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในน้ำมันหม้อแปลง ไฟฟ้าคาลเท็กซ์ ในเทอมระยะแกป(ก) และการปรับตัวของฉนวน(ข) โดยอิเล็กทรอนิกส์ ไตรดจานกลม-จานกลม ทำมาจากทองเหลือง มีรัศมี 3.125 ม.ม. อุณหภูมิ 28 °C	81
รูปที่ 7.5.4 แสดงแรงดันเบรคดาวและความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในน้ำมันหม้อแปลง ไฟฟ้าคาลเท็กซ์ ในเทอมระยะแกป(ก) และการปรับตัวของฉนวน(ข) โดยอิเล็กทรอนิกส์ ไตรดจานกลม-จานกลม ทำมาจากทองเหลือง มีรัศมี 1.563 ม.ม. อุณหภูมิ 30 °C	82
รูปที่ 7.5.5 แสดงแรงดันเบรคดาวและความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในน้ำมันฉนวนเหลือง ในเทอมระยะแกป(ก) และการปรับตัวของฉนวน(ข) โดยอิเล็กทรอนิกส์ ไตรดจานกลม-จานกลม ทำมาจากทองเหลืองมีรัศมี 12.5 ม.ม. อุณหภูมิ 29 °C	83
รูปที่ 7.5.6 แสดงแรงดันเบรคดาวและความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในน้ำมันฉนวนเหลือง ในเทอมระยะแกป(ก) และการปรับตัวของฉนวน(ข) โดยอิเล็กทรอนิกส์ ไตรดจานกลม-จานกลม ทำมาจากทองเหลืองมีรัศมี 6.25 ม.ม. อุณหภูมิ 28 °C	84
รูปที่ 7.5.7 แสดงแรงดันเบรคดาวและความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในน้ำมันฉนวนเหลือง ในเทอมระยะแกป(ก) และการปรับตัวของฉนวน(ข) โดยอิเล็กทรอนิกส์ ไตรดจานกลม-จานกลม ทำมาจากทองเหลืองมีรัศมี 3.125 ม.ม. อุณหภูมิ 29 °C	85

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หน้าที่

รูปที่ 7.5.8 แสดงแรงดันเบรคดาวน์และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในน้ำมันฉนวนเหลือง ในเทอมระยะแกบ(ก) และการปรับหัวของฉนวน(ข) โดยอิเล็กทรอนิกส์ จากกลม-จากกลม ทำมาจากทองเหลือง มีรัศมี 1.563 มม อุณหภูมิ 28 °C	86
รูปที่ 7.6.1 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์ โดยอิเล็กทรอนิกส์ แบบใหม่ ทำจากทองเหลือง อุณหภูมิ 29 °C	89
รูปที่ 7.6.2 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์ โดยอิเล็กทรอนิกส์ พื้นระนาบ(โรโกสกี) ทำจากทองเหลือง อุณหภูมิ 30 °C	89
รูปที่ 7.6.3 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์ โดยอิเล็กทรอนิกส์ จากกลม-จากกลม ทำจากทองเหลือง อุณหภูมิ 29 °C	90
รูปที่ 7.6.4 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์ โดยอิเล็กทรอนิกส์ ทรงกลม-พื้นระนาบ ทำจากทองเหลือง อุณหภูมิ 28 °C	90
รูปที่ 7.6.5 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์ โดยอิเล็กทรอนิกส์ ทรงกลม-ทรงกลม ทำจากทองเหลือง อุณหภูมิ 30 °C	91
รูปที่ 7.6.6 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์ โดยอิเล็กทรอนิกส์ ทรงกระบอก-พื้นระนาบ ทำจากทองเหลือง อุณหภูมิ 29 °C	91
รูปที่ 7.6.7 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์ โดยอิเล็กทรอนิกส์ แบบจุด-พื้นระนาบ ทำจากทองเหลือง อุณหภูมิ 28 °C	92
รูปที่ 7.6.8 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ของน้ำมันฉนวนเหลือง โดยอิเล็กทรอนิกส์แบบใหม่ ทำจากทองเหลือง อุณหภูมิ 27 °C	92
รูปที่ 7.6.9 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ของน้ำมันฉนวนเหลือง โดยอิเล็กทรอนิกส์ พื้นระนาบ(โรโกสกี) ทำจากทองเหลือง อุณหภูมิ 28 °C	93
รูปที่ 7.6.10 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ของน้ำมันฉนวนเหลือง โดยอิเล็กทรอนิกส์ จากกลม-จากกลม ทำจากทองเหลือง อุณหภูมิ 31 °C	93
รูปที่ 7.6.11 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ของน้ำมันฉนวนเหลือง โดยอิเล็กทรอนิกส์ ทรงกลม-พื้นระนาบ ทำจากทองเหลือง อุณหภูมิ 27 °C	94
รูปที่ 7.6.12 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ของน้ำมันฉนวนเหลือง โดยอิเล็กทรอนิกส์ ทรงกลม-ทรงกลม ทำจากทองเหลือง อุณหภูมิ 28 °C	94
รูปที่ 7.6.13 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ของน้ำมันฉนวนเหลือง โดยอิเล็กทรอนิกส์ ทรงกระบอก-พื้นระนาบ ทำจากทองเหลือง อุณหภูมิ 29 °C	95

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้าที่
รูปที่ 7.6.14 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ของน้ำมันถั่วเหลือง โดยอิเล็กทรอนิกส์ แบบจุด-พีระนาบ ทำจากทองเหลือง อุณหภูมิ 30 °C	95
รูปที่ 7.7.1 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ (ก) และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (ข) ในเทอมของระยะแกป ในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์โดยอิเล็กทรอนิกส์ ทรงกลม-ทรงกลม ทำจากเหล็กแอสแตนเลส อุณหภูมิ 27 °C	97
รูปที่ 7.7.2 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ (ก) และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (ข) ในเทอมของระยะแกป ในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์โดยอิเล็กทรอนิกส์ ทรงกลม-ทรงกลม ทำจากอลูมิเนียม อุณหภูมิ 28 °C	98
รูปที่ 7.7.3 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ (ก) และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (ข) ในเทอมของระยะแกป ในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์โดยอิเล็กทรอนิกส์ ทรงกลม-ทรงกลม ทำจากทองเหลือง อุณหภูมิ 28 °C	99
รูปที่ 7.7.4 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ (ก) และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (ข) ในเทอมของระยะแกป ในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์โดยอิเล็กทรอนิกส์ ทรงกลม(เหล็กแอสแตนเลส)-ทรงกลม(อลูมิเนียม) อุณหภูมิ 29 °C	100
รูปที่ 7.7.5 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ (ก) และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (ข) ในเทอมของระยะแกป ในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์โดยอิเล็กทรอนิกส์ ทรงกลม(อลูมิเนียม)-ทรงกลม(เหล็กแอสแตนเลส) อุณหภูมิ 29 °C	101
รูปที่ 7.7.6 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ (ก) และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (ข) ในเทอมของระยะแกป ในน้ำมันถั่วเหลือง โดยอิเล็กทรอนิกส์ ทรงกลม-ทรงกลม ทำจากเหล็กแอสแตนเลส อุณหภูมิ 28 °C	102
รูปที่ 7.7.7 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ (ก) และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (ข) ในเทอมของระยะแกป ในน้ำมันถั่วเหลือง โดยอิเล็กทรอนิกส์ ทรงกลม-ทรงกลม ทำจากอลูมิเนียม อุณหภูมิ 29 °C	103
รูปที่ 7.7.8 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ (ก) และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (ข) ในเทอมของระยะแกป ในน้ำมันถั่วเหลือง โดยอิเล็กทรอนิกส์ ทรงกลม-ทรงกลม ทำจากทองเหลือง อุณหภูมิ 28 °C	104
รูปที่ 7.7.9 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ (ก) และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (ข) ในเทอมของระยะแกป ในน้ำมันถั่วเหลือง โดยอิเล็กทรอนิกส์ ทรงกลม(เหล็กแอสแตนเลส)-ทรงกลม(อลูมิเนียม) อุณหภูมิ 31 °C	105

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้าที่
รูปที่ 7.7.10 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ (ก) และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (ข) ในเทอมของระยะแกป ในน้ำมันแก้วเหลือง โดยอิเล็กทรอนิกส์ทรูด ทรงกลม(อลูมิเนียม)-ทรงกลม(เหล็กแอสตนเลส) อุณหภูมิ 30 °C	106
รูปที่ 7.7.11 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ (ก) และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (ข) ในเทอมของระยะแกป ในน้ำมันรำข้าว โดยอิเล็กทรอนิกส์ทรูด ทรงกลม-ทรงกลม ทำจากเหล็กแอสตนเลส อุณหภูมิ 28 °C	107
รูปที่ 7.7.12 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ (ก) และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (ข) ในเทอมของระยะแกป ในน้ำมันรำข้าว โดยอิเล็กทรอนิกส์ทรูด ทรงกลม-ทรงกลม ทำจากอลูมิเนียม อุณหภูมิ 29 °C	108
รูปที่ 7.7.13 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ (ก) และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (ข) ในเทอมของระยะแกป ในน้ำมันรำข้าว โดยอิเล็กทรอนิกส์ทรูด ทรงกลม-ทรงกลม ทำจากทองเหลือง อุณหภูมิ 30 °C	109
รูปที่ 7.7.14 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ (ก) และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (ข) ในเทอมของระยะแกป ในน้ำมันรำข้าว โดยอิเล็กทรอนิกส์ทรูด ทรงกลม(เหล็กแอสตนเลส)-ทรงกลม(อลูมิเนียม) อุณหภูมิ 31 °C	110
รูปที่ 7.7.15 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ (ก) และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (ข) ในเทอมของระยะแกป ในน้ำมันรำข้าว โดยอิเล็กทรอนิกส์ทรูด ทรงกลม(อลูมิเนียม)-ทรงกลม(เหล็กแอสตนเลส) อุณหภูมิ 31 °C	111
รูปที่ 7.7.16 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ (ก) และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (ข) ในเทอมของระยะแกป ในน้ำมันปาล์ม โดยอิเล็กทรอนิกส์ทรูด ทรงกลม-ทรงกลม ทำจากเหล็กแอสตนเลส อุณหภูมิ 30 °C	112
รูปที่ 7.7.17 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ (ก) และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (ข) ในเทอมของระยะแกป ในน้ำมันปาล์ม โดยอิเล็กทรอนิกส์ทรูด ทรงกลม-ทรงกลม ทำจากอลูมิเนียม อุณหภูมิ 31 °C	113
รูปที่ 7.7.18 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ (ก) และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (ข) ในเทอมของระยะแกป ในน้ำมันปาล์ม โดยอิเล็กทรอนิกส์ทรูด ทรงกลม-ทรงกลม ทำจากทองเหลือง อุณหภูมิ 30 °C	114
รูปที่ 7.7.19 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ (ก) และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (ข) ในเทอมของระยะแกป ในน้ำมันปาล์ม โดยอิเล็กทรอนิกส์ทรูด ทรงกลม(เหล็กแอสตนเลส)-ทรงกลม(อลูมิเนียม) อุณหภูมิ 29 °C	115

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หน้าที่

รูปที่ 7.7.20	แสดงแรงดันเบรคดาว์น (ก) และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (ข) ในเทอมของระยะแกป ในน้ำมันปาล์ม โดยอิลีคโตรด ทรงกลม(อลูมิเนียม)-ทรงกลม(เหล็กเสตนเลส) อุณหภูมิ 29 °C	116
รูปที่ 7.8.1	แสดงผลของฉนวนกันต่อแรงดันเบรคดาว์นในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ขั้วลบในเทอมระยะระหว่างอาโนดและคาโทด โดยใช้กระดาษฉนวน และโพลีเอทิลีนเป็นฉนวนกัน ในน้ำมันถั่วเหลือง อุณหภูมิ 30 °C	120
รูปที่ 7.8.2	แสดงผลของฉนวนกันต่อแรงดันเบรคดาว์นในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ขั้วบวกในเทอมระยะระหว่างอาโนดและคาโทด โดยใช้กระดาษฉนวน และโพลีเอทิลีนเป็นฉนวนกัน ในน้ำมันถั่วเหลือง อุณหภูมิ 30 °C	120
รูปที่ 7.8.3	แสดงผลของแผ่นฉนวนกันต่อแรงดันเบรคดาว์นในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ขั้วลบในเทอมของแผ่นกระดาษฉนวน ในน้ำมันคาเลเท็กซ์ อุณหภูมิ 29 °C	121
รูปที่ 7.8.4	แสดงผลของแผ่นฉนวนกันต่อแรงดันเบรคดาว์นในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ขั้วบวกในเทอมของแผ่นกระดาษฉนวน ในน้ำมันคาเลเท็กซ์ อุณหภูมิ 30 °C	121
รูปที่ 7.8.5	แสดงผลของแผ่นฉนวนกันต่อแรงดันเบรคดาว์นในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ขั้วลบและขั้วบวกในเทอมของแผ่นกระดาษฉนวน ในน้ำมันคาเลเท็กซ์	122
รูปที่ 7.8.6	แสดงผลของแผ่นฉนวนกันต่อแรงดันเบรคดาว์น ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ขั้วลบในเทอมของแผ่นกระดาษฉนวน ในน้ำมันถั่วเหลือง อุณหภูมิ 28 °C	122
รูปที่ 7.8.7	แสดงผลของแผ่นฉนวนกันต่อแรงดันเบรคดาว์น ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ขั้วบวกในเทอมของแผ่นกระดาษฉนวน ในน้ำมันถั่วเหลือง อุณหภูมิ 30 °C	123
รูปที่ 7.8.8	แสดงผลของแผ่นฉนวนกันต่อแรงดันเบรคดาว์น ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ขั้วลบและขั้วบวกในเทอมของแผ่นกระดาษฉนวน ในน้ำมันถั่วเหลือง	123
รูปที่ 7.8.9	แสดงการเบรคดาว์นผ่านกระดาษฉนวน 3 แผ่นด้านหน้าติดกับปลายแหลม ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอขั้วลบ ในน้ำมันถั่วเหลือง ระยะแกป 2.5 ม.ม. อุณหภูมิ 31 °C	124
รูปที่ 7.8.10	แสดงการเบรคดาว์นผ่านกระดาษฉนวน 3 แผ่นด้านหลังติดกับปลายแหลม ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอขั้วลบ ในน้ำมันถั่วเหลือง ระยะแกป 2.5 ม.ม. อุณหภูมิ 31 °C	124
รูปที่ 7.9.1	แสดงผลของความเหน็ดในเทอมของอุณหภูมิ ในน้ำมันถั่วเหลือง	126
รูปที่ 7.9.2	แรงดันเบรคดาว์นในเทอมของอุณหภูมิ โดยใช้อิลีคโตรดทรงกลม-ทรงกลม ในน้ำมันถั่วเหลือง ระยะแกป 2.5 ม.ม.	126

รูปที่ 7.9.3 แสดงผลของความเหน็ดในเทอมของอุณหภูมิ ในน้ำมันรำข้าว ให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้าที่
รูปที่ 7.9.4 แรงดันเบรคความถี่ในเทอมของอุณหภูมิ โดยใช้อิเล็กโตรดทรงกลม-ทรงกลม ในน้ำมันรำข้าว ระยะแกป 2.5 ม.ม.	127
รูปที่ 7.9.5 แสดงผลของความถี่ในเทอมของอุณหภูมิ ในน้ำมันปาล์ม	128
รูปที่ 7.9.6 แรงดันเบรคความถี่ในเทอมของอุณหภูมิ โดยใช้อิเล็กโตรดทรงกลม-ทรงกลม ในน้ำมันปาล์ม ระยะแกป 2.5 ม.ม.	128
รูปที่ 7.10.1 แสดงการเปรียบเทียบแรงดันเบรคความถี่ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอและ ไม่สม่ำเสมอทั้งชั่วบวกและลบ ในน้ำมันถั่วเหลือง อุณหภูมิห้อง	132
รูปที่ 7.10.2 แสดงผลโครงสร้างและชั่วโมเลกุล โดยใช้อิเล็กโตรดทรงกลม-พื้นระนาบ โดยทำการโคตติงทางด้านพื้นระนาบด้วยโพลีเอทิลีน หนา 0.05 ม.ม. ในน้ำมันถั่วเหลือง อุณหภูมิห้อง	132
รูปที่ 7.11.1 แสดงลักษณะเริ่มต้นก่อนเกิดฟองอากาศ ในน้ำมันถั่วเหลือง สเกล 20 mV/div , 5 mSec/div ความต้านทาน 30 K-ohm กระแสในช่องว่าง 0.02 mA แรงดันไฟฟ้า 26 kV ระยะแกป 2.5 ม.ม.	135
รูปที่ 7.11.2 แสดงลักษณะของระยะการเกิดฟองอากาศ ในน้ำมันถั่วเหลือง สเกล 20 mV/div , 5 mSec/div ความต้านทาน 30 K-ohm กระแสในช่องว่าง 0.02 mA แรงดันไฟฟ้า 26 kV ระยะแกป 2.5 ม.ม.	135
รูปที่ 7.11.3 แสดงลักษณะของระยะการเกิดสตรีมเมอร์เริ่มต้น ในน้ำมันถั่วเหลือง สเกล 20 mV/div , 5 mSec/div ความต้านทาน 30 K-ohm กระแสในช่องว่าง 0.03 mA แรงดันไฟฟ้า 28.4 kV ระยะแกป 2.5 ม.ม.	136
รูปที่ 7.11.4 แสดงลักษณะการเติบโตของสตรีมเมอร์ ในน้ำมันถั่วเหลือง สเกล 20 mV/div , 5 mSec/div ความต้านทาน 30 K-ohm กระแสในช่องว่าง 0.033 mA แรงดันไฟฟ้า 29 kV ระยะแกป 2.5 ม.ม.	136
รูปที่ 7.11.5 แสดงลักษณะการเริ่มต้นของโคโรนา ในน้ำมันถั่วเหลือง สเกล 20 mV/div , 5 mSec/div ความต้านทาน 30 K-ohm กระแสในช่องว่าง 0.04 mA แรงดันไฟฟ้า 31 kV ระยะแกป 2.5 ม.ม.	137

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หน้าที่

รูปที่ 7.11.6 แสดงลักษณะการเกิดโคโรนอสม่าเสมอ ในน้ำมันฉนวน

สเกล 20 mV/div , 5 mSec/div ความต้านทาน 30 K-ohm
กระแสในช่องว่าง 0.042 mA แรงดันไฟฟ้า 31 kV
ระยะแกป 2.5 ม.ม.

137

รูปที่ 7.11.7 แสดงลักษณะการเกิดโคโรนาก่อนเกิดเบรคดาวน์ ในน้ำมันฉนวน

สเกล 20 mV/div , 5 mSec/div ความต้านทาน 30 K-ohm
กระแสในช่องว่าง 0.053 mA แรงดันไฟฟ้า 32 kV
ระยะแกป 2.5 ม.ม.

138



สารบัญตาราง

	หน้าที่
ตารางที่ 4.5 แสดงรูปทรงทางเรขาคณิตของอิเล็กโตรดมีส.ป.ส.แพ็คเกจอร์ สนามไฟฟ้าที่แตกต่างกัน[17, 35]	25
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อแรงดันเบรกดาวน์[15]	26
ตารางที่ 4.21 แสดงแรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์ในของเหลวไฮโดรคาร์บอน[10]	41
ตารางที่ 5.2.1 แสดงปริมาณกรดไขมันในน้ำมันพืช	44
ตารางที่ 5.2.2 แสดงสูตรโครงสร้างของกรดไขมันในน้ำมันพืช	44
ตารางที่ 7.2.4 แสดงความผิดพลาดของอุปกรณ์ในการทดลอง	61
ตารางที่ 7.2.5 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวน์ภายใต้สนามไฟฟ้า กระแสสลับและกระแสตรงของน้ำมันทดสอบ	62
ตารางที่ 7.4 แสดงแรงดันเบรกดาวน์ของน้ำมันทดสอบทั้ง 4 ชนิด โดยใช้อิเล็กโตรด ทรงกลม-ทรงกลม ระยะแกป 2.5 ม.ม.	64
ตารางที่ 7.5 แสดงผลของพื้นที่อิเล็กโตรดที่มีต่อแรงดันเบรกดาวน์ในน้ำมันทดสอบ	78
ตารางที่ 7.6 แสดงแรงดันเบรกดาวน์ของน้ำมันทดสอบ โดยใช้อิเล็กโตรดแบบต่างๆ ระยะแกป 2.5 ม.ม. อุณหภูมิห้อง	88
ตารางที่ 7.8.1 แสดงผลของกระดาษฉนวนกันหนา 0.1 ม.ม.ต่อแรงดันเบรกดาวน์ใน สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ อิเล็กโตรดทรงกลม-ทรงกลม ทำจากทองเหลือง ระยะแกป 2.5 ม.ม.	117
ตารางที่ 7.12 แสดงสารประกอบไฮโดรคาร์บอนต่อแรงดันเบรกดาวน์ในน้ำมันถั่วเหลือง โดยใช้อิเล็กโตรดทรงกลม-ทรงกลม ทำจากทองเหลือง ระยะแกป 2.5 ม.ม.	139

สัญลักษณ์

- A : ค่าคงที่สมการของชอตกี มีค่า $120 \times 10^4 \text{ Amps.m}^{-2}.\text{T}^{-2}$
- b : ส.ป.ส. นิกัดการนำกระแสไฟฟ้าของฉนวนเหลว
- B : ค่าคงที่ของอนุกรมฉนวนเหลว
- B_1 : ค่าคงที่ในสารประกอบอะโรมาติก
- $^{\circ}\text{C}$: องศาเซลเซียส
- d : ระยะแถบ
- d_x : ระยะห่างระหว่างอาโนดกับแคโทด
- e : อิเล็กตรอน มีขนาดประจุ 1.602×10^{-19} คุลมบ์
- E : สนามไฟฟ้า
- E_{avg} : สนามไฟฟ้าเฉลี่ย
- E_b : สนามไฟฟ้าเบรคดาวน์หรือค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า
- E_{cr} : สนามไฟฟ้าวิกฤติ
- E_m : สนามไฟฟ้าสูงสุดที่ปลายอิเล็กโตรด
- E_0 : สนามไฟฟ้าเริ่มต้น
- E_x : สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอตามทิศทางรัศมี
- eV : หน่วยของพลังงาน $1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}$ จูล
- f : ส.ป.ส. แพลเตอร์สนามไฟฟ้า
- F : แรงที่กระทำต่ออนุภาคในสนามไฟฟ้า
- h : ค่าคงที่ของพลังค์ = 6.63×10^{-34} Joule.sec
- h_0 : ความยาวของพันธะ C-C
- i : กระแสไฟฟ้าที่ถูกปลดปล่อยแบบสนามไฟฟ้า
- I : กระแสไฟฟ้า
- I_0 : กระแสไฟฟ้าเริ่มต้น
- J : ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า
- k : ค่าคงที่ของโบสแมนส์
- L : พลังงานเนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่มีระยะเฉลี่ย μ
- M : น้ำหนักโมเลกุล
- n : จำนวนอะตอมคาร์บอนในไฮโดรคาร์บอนเหลว
- N : จำนวนโมเลกุลต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
- Na : ค่าคงที่ของอะโวกาโดร = $6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
- N : จำนวนกลุ่มของไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลที่หน้าตัด Q_1

สัญลักษณ์(ต่อ)

- P : ค่าคงที่เป็นส่วนกลับของระยะทางเฉลี่ย ρ
 Q : แอวกที่พื้นที่หน้าตัดของอิลีคตรอน
 Q_1 : พื้นที่หน้าตัดของอิลีคตรอน
 Q_o : เป็นค่าคงที่ของอนุกรมโซเทินเชในโครงสร้าง
 r : ระยะทางที่ต้องการหาสนามไฟฟ้า
 r_o : เส้นผ่าศูนย์กลางของอิลีคโตรดปลายแหลม
 R : รัศมีของอิลีคโตรด
 S : แอวกที่พื้นที่หน้าตัดต่อลูกบาศก์ เซ็นติเมตร
 t : เวลาที่ใช้ในการป้อนแรงดันไฟฟ้า
 t_c : ระยะเวลาวิกฤติ
 T : อุณหภูมิ มีหน่วยเป็นองศาเคลวิน
 U_b : แรงดันเบรคดาวน์
 U_o : แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น
 v : ความถี่ของโพตรอน
 v_d : ความเร็วของอิลีคตรอน
 V : แรงดันไฟฟ้าขณะปลดปล่อยอิลีคตรอน
 V_{VAC} : แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นในการปลดปล่อยอิลีคตรอน
 α : มุมที่ปลดปล่อยอิลีคตรอน
 β : ส.ป.ส. ความเครียดของสนามไฟฟ้าบริเวณที่มีการปลดปล่อยอิลีคตรอน
 ϵ : เพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์
 ϵ_o : เพอร์มิตติวิตีสุญญากาศ
 ϵ_1 : เพอร์มิตติวิตีของน้ำมัน
 ϵ_2 : เพอร์มิตติวิตีของแข็งหรือกระดาษฉนวน
 λ : ระยะทางเฉลี่ยของอิลีคตรอน
 μ : ค่าเฉลี่ยเลขคณิต
 μ_1 : แรงดันเบรคดาวน์ครั้งที่ i
 π : อัตราส่วนระหว่างเส้นรอบวงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของวงกลม
 ρ : ความหนาแน่น
 σ : พิกัดการนำกระแสไฟฟ้า
 θ : นลิ่งงานหยิดเห็นภายในโลหะ
 θ' : นลิ่งงานหยิดเห็นภายในโลหะหลังจากมีการเพิ่มความต่างศักย์

หัวข้อวิทยานิพนธ์	: การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อแรงดันเบรคดาวน์ในน้ำมันพืช
โดย	: นายจรงค์ บุญเส็ง
อาจารย์ที่ปรึกษา	: อ. นิกิตน์ กฤษณจินดา
ระดับการศึกษา	: วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตทางวิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	: วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา	: 2531

บทคัดย่อ

การศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลกระทบต่อแรงดันไฟฟ้าเบรคดาวน์ในน้ำมันพืช มีความสำคัญมากในการพัฒนาฉนวนเหลวที่นำมาใช้เป็นฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ในวิทยานิพนธ์นี้รายงานถึงคุณลักษณะของแรงดันไฟฟ้าเบรคดาวน์ที่แปรตามปัจจัยต่างๆ เช่นขนาดของพื้นที่ผิวอิเล็กโตรด สารที่ใช้ทำอิเล็กโตรด รูปทรงทางเรขาคณิตของอิเล็กโตรด อิเล็กโตรด โคตติง ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด จำนวนครั้งของการเบรคดาวน์ ผลของแผ่นกระดาษฉนวนกันในน้ำมันพืช ความหนืด ผลของประจุค้าง โครงสร้างโมเลกุลและขั้วโมเลกุลของน้ำมันพืชที่มีผลต่อแรงดันเบรคดาวน์ในน้ำมันพืช (ซึ่งประกอบด้วยน้ำมันรำข้าว ถั่วเหลือง และปาล์ม) โดยใช้อิเล็กโตรดทองเหลือง เหล็กสนแตนเลสและอลูมิเนียม ภายใต้แรงดันไฟฟ้าแรงสูง อุปกรณ์ชุดการทดลองและวิธีการทดลองได้อ้างอิงมาตรฐาน IEC , IEEE และ ASTM โดยเปรียบเทียบผลกับน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในเชิงพาณิชย์กับชุดการทดลองและนำข้อมูลมาเป็นมาตรฐานในการเปรียบเทียบ ผลของการทดลองแสดงให้เห็นว่าน้ำมันพืช (ถั่วเหลือง) สามารถเทียบเคียงกับน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าได้ดี

Thesis Title : The Study of Some Factors that Affect
Breakdown Voltage of Vegetable oils

Name : Mr. CHONGRAG BOONSENG

Thesis Advisor : Mr. NITHAD KRISNACHINDA

Level of Study : Master of Engineering in Electical
Engineering.

Department : Electrical Engineering.

Academic Year : 1988

Abstract.

The study of some factors that affect electrical breakdown voltage of vegetable oils is quite important in the development of electrical insulating oil for high voltage devices. This thesis concerns the characteristics of electrical breakdown voltage versus various factors. And we have seen that the effects of electrode area , electrode geometry , electrode material , electrode coating , gap length , number of breakdown , space charge , viscosity , insulating barrier and the structure and polarity of their molecules pay some significant roles on the electrical breakdown voltage of vegetable oils , which produced from soya-bean ,rice bean and palm. The metallic electrodes for the research work are made of brass , stainless steel and aluminum. The test procedures followed the specification of IEC ,IEEE and ASTM standards. We can conclude that vegetable oil (soya-bean) is comparable with transformer oils on the high voltage applications.

บทที่ 1

บทนำ

การศึกษาค่าความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันพืชด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ [1-3] และคุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันคาสเตอร์ (castor oil) [2,51] เป็นน้ำมันที่ผลิตจากพืชแสดงให้เห็นว่าน้ำมันพืชมีคุณสมบัติเป็นฉนวนเหลวไฟฟ้า (insulating liquids) ได้ดีทั้งทางด้านคุณสมบัติทางด้านไฟฟ้าและทางกายภาพ สามารถนำน้ำมันพืชที่ผลิตได้ในประเทศมาพัฒนาเพื่อใช้ทดแทนฉนวนไฟฟ้าประเภทน้ำมันแร่ (mineral oil) ที่นิยมใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงและมีราคาสูง ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ดังนั้นการพัฒนาค่าคุณสมบัติทางด้านไฟฟ้าของน้ำมันพืช ซึ่งเป็นคุณลักษณะพื้นฐานที่แสดงความเป็นฉนวนไฟฟ้าของฉนวนเหลวจึงถูกกระทำโดยการตรวจสอบและปรับปรุงค่าแรงดันเบรคดาวน์ (breakdown voltage) หรือค่าความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า (dielectric strength) เพื่อให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งานในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ในการตรวจสอบและการปรับปรุงค่าแรงดันเบรคดาวน์ของฉนวนเหลวถูกกระทำครั้งแรกเมื่อประมาณ 68 ปีมาแล้ว มีนักวิจัยหลายท่านพยายามอธิบายกลไกของการเบรคดาวน์ (mechanism of breakdown) มีการวิจารณ์และสรุปผลการทดลองที่ได้แตกต่างกันออกไปและในปัจจุบันนี้ไม่สามารถหาข้อสรุปได้ ทั้งนี้เนื่องมาจากการเบรคดาวน์ในฉนวนเหลวขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง [4-11] ผู้เขียนแบ่งปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงดันเบรคดาวน์ออกเป็น 2 ประเภทดังนี้

1 ปัจจัยเนื่องมาจากการทดลอง (experimental factor affecting breakdown) เป็นปัจจัยที่เราสามารถควบคุมได้แบ่งออกเป็นหัวข้อดังนี้

1.1 วิธีการทดสอบ (test procedure)

1.2 วัสดุและความเรียบของพื้นผิวอิเล็กโตรด (material and surface state of each electrode)

1.3 พื้นที่ผิวและระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด (area and separation of the electrode)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 1.4 สิ่งเจือปนทางกายภาพ (physical purity of the liquid)

- 1.5 สิ่งเจือปนทางเคมี (chemical purity of the liquid)
- 1.6 อุณหภูมิและความดันของบรรยากาศ (temperature and pressure)
- 1.7 รูปแบบของสนามไฟฟ้า (field-configuration)
- 1.8 ระยะเวลาที่ใช้ในการป้อนแรงดันไฟฟ้า (duration of applied voltage)

2 ปัจจัยเนื่องมาจากตัวของฉนวนเหลว (body of liquids factor affecting breakdown) เป็นปัจจัยที่เกิดตามธรรมชาติของฉนวนเหลว ไม่สามารถควบคุมได้ แบ่งออกเป็นหัวข้อดังนี้

- 2.1 ส่วนประกอบของฉนวนเหลว (components of insulating liquids)
- 2.2 โครงสร้างโมเลกุล (structure of molecules)
- 2.3 ขั้วโมเลกุล (polarity of molecules)
- 2.4 จำนวนของคาร์บอนในฉนวนเหลว (number of carbon in insulating liquids)
- 2.5 ปฏิกริยาออกซิเดชันของฉนวนเหลว (oxidation Stability)

วิทยานิพนธ์นี้ทำการตรวจสอบค่าแรงดันเบรคดาวน์อื่นเนื่องมาจากปัจจัยต่างๆ (ดังได้กล่าวมาแล้ว) ของน้ำมันพืชผ่านกรรมวิธี (refined vegetable oils) ที่ผลิตได้ในประเทศ ซึ่งมีราคาโดยเฉลี่ยถูกกว่าน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคุณภาพดีประมาณ 43 % และ 24 % สำหรับน้ำมันที่มีคุณภาพต่ำ โดยใช้วิธีการทดสอบอ้างอิงมาตรฐานสากล (IEC Recommendation) ฉบับ IEC Publ. 156 กำหนดให้ฉนวนเหลวต้องมีค่าความหนืดไม่เกิน 50 cSt. ที่อุณหภูมิ 20 °C กับระบบอิเล็กทรอนิกส์และชุดภาชนะทดสอบ มาตรฐานแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา (ASTM Standard) ในการออกแบบระบบอิเล็กทรอนิกส์และการหาค่าเฉลี่ยที่ได้จากการเบรคดาวน์ และมาตรฐานการวัดค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของสถาบันวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (IEEE Standard

Technique for High-Voltage Testing) โดยพิจารณาตามข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับวัดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จากข้อกำหนดดังกล่าวมานี้ เราได้ทำการตรวจสอบค่าแรงดันไฟฟ้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เบรคดาวนั้โดยค้ำนึ่งถึงปัจจัยต้ำงๆที่มีผลต่อค้ำแรงดันไฟฟ้าเบรคดาวนั้ในน้ำมันพีชเป็นล้ำดับชั้นดั่งนี้

- 1 การปรับตัวของฉนวนเหลวและผลของส้ำรที่ใช้ทำอิเล็คโตรด
- 2 ขนาดของพื้นที่ผิวของอิเล็คโตรด
- 3 รูปทรงท้ำงเรขาคณิตของอิเล็คโตรด
- 4 ระยะห้ำงระหว่างอิเล็คโตรด
- 5 ผลของแผ่นฉนวนกั้นระหว่างอิเล็คโตรด

6 ความหนืดและอุณหภูมิ

7 โครงสร้างโมเลกุลและชีวโมเลกุลกับอิเล็คโตรดโคทิง

8 ผลของประจุค้ำงในสนามไฟฟ้าไม่สม้ำเสมอ

9 การปรับปรุงแรงดันเบรคดาวนั้

สำหรับเนื้อหำวิทยำนิพนธ์ฉบับนี้แบ่งออกเป็น 8 บท ซึ่งในแต่ละบทประกอบไปด้วยเนื้อหาสาระดั่งต่อไปนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีของการเบรคดาวนั้ในฉนวนเหลวท้ำวไป

บทที่ 3 กล่าวถึงการค้ำนวนหำสนามไฟฟ้าแบบไม่สม้ำเสมอในฉนวนเหลว

บทที่ 4 กล่าวถึงปัจจัยต้ำงๆที่มีผลต่อแรงดันเบรคดาวนั้ในฉนวนเหลว

บทที่ 5 กล่าวถึงโครงสร้างโมเลกุลของน้ำมันพีช

บทที่ 6 กล่าวถึงอุปกรณ์การทดลองและวิธีการทดลอง

บทที่ 7 กล่าวถึงผลการทดลองและการวิจำรณั้

บทที่ 8 กล่าวถึงการสรุปลงการทดลอง

ภาคผนวก ก มาตรฐานทดสอบแรงดันกระแสดตรงของ IEEE

ภาคผนวก ข มาตรฐานการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวของ ASTM , IEC

ภาคผนวก ค คุณสมบัติของฉนวนไฟฟ้าที่นำมาทดสอบ

ในการทดลองครั้งนี้ ได้นำน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์มาใช้ทดลองและนำข้อมูลมา

เปรียบเทียบผลกับน้ำมันพีช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่วำกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ำมมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้ำของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีการเบรคดาวน์ในฉนวนเหลว

2.1 บทนำ

การเบรคดาวน์ในฉนวนเหลว เป็นขบวนการที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากสาเหตุหลายประการ ลักษณะปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น ได้มีการศึกษาอย่างกว้างขวางแต่ยังไม่มีข้อสรุปที่แน่นอนเหมือนการเบรคดาวน์ในก๊าซและของแข็ง [10, 15, 16] และแนวความคิดในการสร้างทฤษฎีอธิบายกลไกการเกิดเบรคดาวน์ได้แบ่งอย่างกว้างๆ ออกเป็น 2 ทฤษฎี คือทฤษฎีกลไกแบบอะวาลานซ์สตรีมเมอร์ (avalanche streamer mechanism) เริ่มต้นจากการเกิดอิเล็กตรอนถูกปลดปล่อยออกมาจากคาโธดด้วยวิธีการแบบสนามไฟฟ้า (field emission) หรือแบบช็อตกี้ (Schottky emission) มีการเกิดอะวาลานซ์จากการไอออนไนเซชันของอะตอมในโมเลกุลของฉนวนเหลว อิเล็กตรอนทั้งหมดจะเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้าเหมือนปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในก๊าซ และอีกทฤษฎีหนึ่งมีกลไกแบบฟองอากาศ (bubbles mechanism) ซึ่งให้เห็นว่าฟองอากาศ (bubbles) และสิ่งเจือปนอื่น ๆ มีส่วนทำให้เกิดเบรคดาวน์ ซึ่งทั้งสองทฤษฎีนี้มีผลการทดลองสนับสนุนความเป็นไปได้ สำหรับการศึกษสาเหตุของการเบรคดาวน์ ในช่วงระยะหลังนี้ [13-15] ส่วนมากจะใช้ทฤษฎีการเบรคดาวน์แบบอิเล็กตรอนนิคส์อธิบายการนำไฟฟ้าในฉนวนเหลว และเมื่อกระแสไหลมากจะเป็นสาเหตุของการเบรคดาวน์ในที่สุด

2.2 ทฤษฎีการเบรคดาวน์แบบอิเล็กตรอนนิคส์

การศึกษากลไกการเบรคดาวน์ในฉนวนเหลวแบบอิเล็กตรอนนิคส์ เริ่มต้นจากการเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอน (emission) อาจจะเป็นแบบความร้อน (thermionic emission) หรือเป็นแบบสนามไฟฟ้า อิเล็กตรอนจะถูกปลดปล่อยจากพื้นผิวของโลหะที่ใช้เป็นอิเล็กโตรดในขณะนั้นความต่างศักย์ระหว่างขั้วคาโธดและแอโนดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยการไหลของกระแสมากขึ้นเป็นไปตามกฎของชอยด์ (child's law) และถ้าเพิ่มความต่างศักย์ให้มากขึ้นกระแสจะไหลคงที่เป็นไปตามสมการการปลดปล่อยแบบความร้อนคือ $J = AT^2 \exp(-e\phi/kT)$ ซึ่งกระแสที่

ไหลจะแปรตามอุณหภูมิที่คาโธดเมื่อถึงจุดจุดหนึ่งถ้ามีการเพิ่มความต่างศักย์มากกว่าเดิม พบว่าจะมีกระแสไหลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมาก ถูกค้นพบโดยช็อตกี้ เราเรียกว่า ปรากฏการณ์ช็อตกี้

(Schottky effect)

ภายใต้สนามไฟฟ้าที่มีความเครียดสูง อิเล็กตรอนที่ปลดปล่อยจากพื้นผิวคาโทดมีพลังงานสามารถเคลื่อนที่ไปได้ระยะทาง X จะได้

$$e \phi = \int_0^{\infty} eEi(X) dx \tag{2.1}$$

$Ei(X)$ = สนามไฟฟ้าจำลองเนื่องมาจากอิเล็กตรอนบริเวณรอบนอกห่างจากผิวคาโทดเป็นระยะทาง X

จากความสัมพันธ์ตามสมการ inverse square ; $Ei(X) = e/16\pi\epsilon_0 X^2$ เมื่ออิเล็กตรอนอยู่ใต้สนามไฟฟ้า มีความเร่งเนื่องมาจากสนามไฟฟ้า E จะต้องออกแรงมีค่าเท่ากับ eE ซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับ $e Ei(x)$ และที่ระยะห่างจากคาโทดเป็นระยะ X_0 แรงทั้งสองจะเท่ากัน

$$e Ei(x) = \frac{e^2}{16\pi\epsilon_0 X^2} = eE \tag{2.2}$$

$$X_0 = \left(\frac{e}{16\pi\epsilon_0 E} \right)^{1/2} \tag{2.3}$$

หลังจากป้อนสนามไฟฟ้าจะมีแรงผลักอิเล็กตรอนให้ปลดปล่อยจากผิวคาโทด การเพิ่มความต่างศักย์ในขณะนี้มีผลให้พลังงานหยุดเหนี่ยวนำบนผิวโลหะมีค่าเป็น ϕ' ภายใต้เงื่อนไขของพลังงาน สามารถอธิบายการปลดปล่อยของอิเล็กตรอนดังนี้

$$e\phi' = \int_0^{x_0} [eEi(X) - eE]dx \tag{2.4}$$

จากสมการ 2.4 สามารถจัดสมการได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$\phi' = \int_0^{x_0} Ei(X)dx - x_0 \int_{x_0}^{\infty} Ei(X)dx - \int_0^{x_0} Edx \tag{2.5}$$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ 2.1 และ 2.3 จะได้

$$\phi' = \phi - e \int_{x_0}^x \left(\frac{1}{16\pi\epsilon_0 X^2} \right) dx - \int_0^{x_0} E dx \quad [2.6]$$

$$\phi' = \phi - 0.5 \left(\frac{eE}{4\pi\epsilon_0} \right)^{1/2} - 0.5 \left(\frac{eE}{4\pi\epsilon_0} \right)^{1/2}$$

$$\phi' = \phi - \sqrt{\frac{eE}{4\pi\epsilon_0}} \quad [2.7]$$

แทนค่า ϕ' ในสมการปลดปล่อยอิเล็กตรอนแบบความร้อนจะได้

$$J = AT^2 \exp\left[\frac{-e}{kT} \left(\phi - \sqrt{eE/4\pi\epsilon_0} \right) \right] \quad [2.8]$$

เราเรียกสมการที่ 2.8 ว่า สมการของช็อดทกี (schottky's equation) สามารถอธิบายการเริ่มต้นเบรคดาวน์ในฉนวนเหลวได้ ในกรณีสนามไฟฟ้าที่มีความเครียดต่ำกว่าสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ช็อดทกี สามารถเกิดการปลดปล่อยแบบสนามไฟฟ้า Fowler และ Nordheim อธิบายว่าปรากฏการณ์นี้เป็นผลมาจากคุณสมบัติที่เป็นคลื่นของอิเล็กตรอน สามารถวิ่งทะลุกำแพงศักย์ออกมาตามสมการ

$$J = \frac{e}{2\pi h} \cdot \frac{\mu^{1/2}}{(\mu + \phi)\phi^{1/2}} \frac{E^2 \exp(-4k\phi^{3/2})}{3E} \quad [2.9]$$

$$\mu = (3n/\pi) \cdot (h^2/8m)$$

$$k = 8\pi^2 m/h^2$$

e = ประจุของอิเล็กตรอน

h = ค่าคงที่ของพลังค์

m = มวลของอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อผู้อื่น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

n = จำนวนอิเล็กตรอนอิสระต่อลูกบาศก์ ซม.

จากสมการที่ 2.9 สามารถเขียนได้ดังนี้

$$J = C E^2 e^{-D/E} \quad [2.10]$$

C และ D เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของอิลีคโตรอน

Halpern และ Gomer[26] ได้อธิบายพฤติกรรมของการเกิดการปลดปล่อยแบบสนามไฟฟ้าใน
ฉนวนเหลวภายใต้สนามไฟฟ้าสูงๆ สามารถอธิบายโดยสมการของ Fowler และ Nordheim จะ
ได้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ถูกปลดปล่อย i และแรงดันไฟฟ้า V ดังนี้

$$\ln \left(\frac{i}{V^2} \right) = \ln \left(\frac{A e^2 K}{\epsilon} \right) - B e^{3/2} \left(\frac{1}{\beta V} \right) \quad [2.11]$$

$F_e = \beta V =$ ความเครียดของสนามไฟฟ้าบริเวณที่มีการปลดปล่อยอิลีคโตรอน

$B, K =$ เป็นพารามิเตอร์ขึ้นอยู่กับค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิลีคโตรอน

$A =$ พื้นที่ที่มีการปลดปล่อยอิลีคโตรอน

ถ้าพล็อตกราฟระหว่าง $\ln(i/V^2)$ กับ $1/V$ จะได้กราฟเส้นตรง จะปรากฏช่วงของ
แรงดันที่เพิ่มอย่างรวดเร็ว และที่ระดับการปลดปล่อยของกระแสสูงๆ จะเปลี่ยนไปจากสมการที่
2.11 และสามารถอธิบายได้โดยใช้รูปแบบของการเกิดประจุค้าง(space charge) รอบๆจุด
ปลายของอิลีคโตรอน สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่กำหนดภายใต้การสมมุติรูปแบบของอิลีคโตรอนที่เป็น
รูปทรงกลมที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกันมีค่าดังนี้

$$V = V_{VAC} + 98 \left(\frac{R}{\epsilon \mu \alpha} \right)^{1/2} \cdot i^{1/2} \quad [2.12]$$

$$V_{VAC} = F_e \cdot r_o$$

$R, r_o =$ เป็นรัศมีของอิลีคโตรอนและรัศมีของบริเวณที่มีการปลดปล่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 $\alpha =$ มุมที่เกิดการปลดปล่อย
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้า v_d เป็นความเร็วของอิเล็กตรอนคงที่ รั้งใกล้บริเวณปลายสุดของอิเล็กโตรด และสามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$V = \left(\frac{4i}{\alpha e v_d} \right) \left[\ln \left(\frac{R}{r_0} \right) - 1 \right] + V_{VAC} \quad [2.13]$$

แต่มีข้อบกพร่องคือเป็นการยากที่จะแสดงให้เห็นขบวนการเกิดอิเล็กตรอนมิสซัน และไม่สามารถอธิบายการเบรคดาวน์ที่อุณหภูมิสูงๆและที่ต่ำๆ ดังตัวอย่างการวัดค่าแรงดันเบรคดาวน์ของ Baliss V.D. Booguart และ Erne [16] กับ Swan และ Lewis [29] ในไนโตรเจนเหลวที่อุณหภูมิ 65 K จะได้ช่วงค่าแรงดันเบรคดาวน์ประมาณ 1.6 - 2.0 MV/cm จะได้ผลเช่นเดียวกับที่วัดโดย Sharbaugh และ Watson [30] ณ อุณหภูมิห้อง ด้วยเหตุนี้จึงมีการวัดค่าแรงดันเบรคดาวน์ในทุกๆ อุณหภูมิ และมีบทสรุปออกมาเกี่ยวกับค่าพลังงานยึดเหนี่ยวภายในโลหะ การปลดปล่อยอิเล็กตรอนแบบความร้อนและแบบสนามไฟฟ้า ว่าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิซึ่งขัดแย้งกับผลการทดลอง การที่อิเล็กตรอนถูกปลดปล่อยจากคาโซด ผ่านฉนวนเหลวมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป ทฤษฎีนี้ สมมติให้มีสนามไฟฟ้าสูงเพียงพอทำให้พลังงานที่ปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากคาโซด มากกว่าพลังงานการสูญเสียในโมเลกุลที่มีการชนแบบไม่แตกตัว (non-ionization collision) อิเล็กตรอนจะถูกเร่งให้ปลดปล่อย จนกระทั่งถึงเกณฑ์ที่กำหนดของการแตกตัวของโมเลกุลของฉนวนเหลว มีการสร้างอะวาลานซ์ของอิเล็กตรอน เราสังเกตได้จากแสงที่เกิดจากปลดปล่อยในฉนวนเหลวอิเล็กตรอนมีพลังงานประมาณ 2.5 eV สามารถผ่านเข้าไปในฉนวนเหลว มีการขัดแย้งกันว่าความเร่งของอิเล็กตรอนนี้ เป็นตัวทำให้เกิดพลังงานที่ใช้ในการแตกตัวของฉนวนเหลว

ในเงื่อนไขการเกิดอะวาลานซ์ในฉนวนเหลวสามารถอธิบายได้ตามหลักของการสมมูลย์ของพลังงาน โดย Von Hippel

$$eE\lambda = Chv \quad [2.14]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 $\lambda =$ ระยะทางเฉลี่ยของอิเล็กตรอน
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$h\nu$ = พลังงานที่สูญเสียให้อิเล็กตรอนขึ้นไปอยู่ในสถานะถูกกระตุ้น (exciting state)

Lewis ได้นำหลักการนี้มาพัฒนาพบว่า ถ้าจำนวนครั้งในการชนกันของอิเล็กตรอนมีมาก จะทำให้มีการสูญเสียพลังงานมาก การสูญเสียนี้ประกอบไปด้วย ขบวนการยืดหด (elastic vibrational) และการกระตุ้น (excitational) ในการคำนวณการสูญเสียพลังงานในฉนวน เหลวซับซ้อนมาก และยังพบว่า การสั่นสะเทือนเนื่องมาจากการชน (vibrational collision) และการสั่นของพันธะ C—H ในไฮโดรคาร์บอนเหลวมีผลทำให้พลังงานที่ใช้ในการสลายโมเลกุล ลดลง ผลสรุปของเขา คือ โครงสร้างของโมเลกุลมีผลต่อค่าแรงดันไฟฟ้าเบรคดาวน์

เมื่อไฮโดรคาร์บอนเหลวมีพลังงานสูงขึ้น สามารถแปลงแสงอินฟราเรดออกมาด้วยความยาวคลื่นมากหรือน้อย ขึ้นกับกลุ่มของไฮโดรคาร์บอนว่าประกอบด้วย CH , CH_2 หรือ CH_3 และพฤติกรรม เมื่ออยู่ใต้สนามไฟฟ้าจะเป็นอิสระต่อกัน แม้จะมีการวิเคราะห์โมเลกุลในเชิงองค์ประกอบของกลุ่ม ของฉนวนเหลวซึ่งจะไม่ขึ้นอยู่กับจุดศูนย์กลางของการชน และสามารถหาค่าระยะทางเฉลี่ยของ อิเล็กตรอนได้

$$1/\lambda = \sum N_i Q_i \quad [2.15]$$

N = จำนวนของโมเลกุลต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

N_i = จำนวนกลุ่มของไฮโดรคาร์บอนที่มีพื้นที่หน้าตัด Q_i

จากสมการ 2.14 และ 2.15 สามารถอธิบายกลุ่มของ n-alkanes ที่มีโครงสร้างของโมเลกุลเป็น $C_N H_{2N+2}$

$$EN^{-1} = k(N_2 Q_2 + 2Q_3) \quad [2.16]$$

ส่วนท้ายในสมการ 2.16 ได้อ้างถึงกลุ่มของ CH_2 และ CH_3 ตามลำดับค่า k หมายถึง

ถึงค่า $h\nu$ และ C ถ้าเราพล็อตกราฟระหว่าง EN^{-1} กับ N_2 จะเป็นกราฟเส้นตรงมีส่วนที่ตัดแกน EN^{-1} คือ $2kQ_3$ มีความชัน kQ_2 การวัดค่าพื้นที่หน้าตัดของอิเล็กตรอนในอัลซิลเบเนซินโดยไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลที่สอดคล้องกัน และต้องอ้างอิงถึงเงินของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sharbaugh ,Crowe และ Cos[31] ถ้าใช้ทฤษฎีของ Lewis อธิบายจะให้ผลของ kQ_2 และ kQ_3 มีค่ามากกว่าที่คำนวณมากกว่า 100 % การวัด kQ_3 โดย T.J. Lewis ในเมทิลซิลิโคน ถ้าใช้ทฤษฎีนี้อธิบายก็ได้ผลเช่นเดียวกับผลที่ได้ในอัลเคน ในการคาดหวังค่าพื้นที่หน้าตัดของ Q_1 , Q_2 และ Q_3 จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนของพันธะ C—H ในโมเลกุลของฉนวนเหลว ซึ่ง Lewis ไม่ได้วิเคราะห์ถึงปัญหาเกี่ยวกับจำนวนพันธะที่เพิ่มขึ้นและการสูญเสียพลังงานของอิเล็กตรอนภายในพันธะเนื่องจากการสั่น(vibrations) ของโมเลกุล

Adamczewski[32] ได้พัฒนาทฤษฎีการเบรคดาวที่มีลักษณะเช่นเดียวกับ Lewis แต่แตกต่างกัน เขาเห็นว่า มีพลังงานมากที่สูญเสียไปเนื่องมาจากการสั่นสะเทือนของพันธะ C—C และมีการสมมติพื้นที่หน้าตัดของการชน(collision cross section) ให้มีค่าเท่ากับพื้นที่หน้าตัดรูปทรงเรขาคณิตตามแนวยาวของโมเลกุล ตัวอย่างโมเลกุลของอัลเคนจะประมาณโครงสร้างแบบทรงกระบอกที่มีรัศมี r มีความยาว $h_0(n - 1)$ โดยที่ $2r$ เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของโมเลกุล h_0 คือความยาวของพันธะ C—C อยู่ในแนวตั้งฉากกับโมเลกุล n คือจำนวนอะตอมคาร์บอน โดยทั่วไปรัศมีของไฮโดรคาร์บอนเหลวจัดอยู่ในช่วง $2.5 \pm 0.1 \text{ \AA}$ และความยาวของพันธะ C—C ประมาณ $1.54 \sin 55$ หรือ 1.23 \AA สามารถหาค่าเอกพื้นที่หน้าตัด(Q) ในโมเลกุลเดี่ยวโดยคำนวณจากสมการ

$$Q = 2rh_0(n - 1) = Q_0(n - 1) \quad [2.17]$$

$Q_0 = 2rh_0$ เป็นค่าคงที่ของอนุกรมใช้พันธะในโครงสร้างของไฮโดรคาร์บอน สามารถหาค่าเอกพื้นที่หน้าตัดต่อลูกบาศก์เซ็นติเมตร(S)

$$S = Q\rho = Q_0(n - 1)\rho Na/M = A(n - 1)\rho/M \quad [2.18]$$

$A = 2rh_0 Na$ เป็นค่าคงที่สำหรับอนุกรมของฉนวนเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีผลเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$Na = \text{Avogadro's number}$

$M =$ น้ำหนักโมเลกุล

ในการชนกันการสูญเสียพลังงานจะมีค่าเท่ากับ $E_0 = hv = 0.11 \text{ eV}$ โดย v คือความถี่ที่ทำให้ C—C แตกตัว และจุดวิกฤติในการเบรคดาวน์ สมมติจากระยะทางเฉลี่ยของอิเล็กตรอน เคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้าทำให้เกิดพลังงาน $L = eE\lambda$ เมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานที่เกิดจากการหน่วงของอิเล็กตรอนจะได้

$$eE\lambda = E_0 = hv \tag{2.19}$$

จากความสัมพันธ์

$$A(n - 1)\rho/M = 1/\lambda \tag{2.20}$$

จากสมการที่ 2.19 และ 2.20

$$eE = hvA(n - 1)\rho/M \tag{2.21}$$

สมการที่ 2.21 ให้ค่าถูกต้องเช่นเดียวกับค่าของ Lewis แต่รูปแบบของ λ

ในสมการที่ 2.20 สมมติโดย Adamczewski และสามารถอธิบายความเครียดของการเบรคดาวน์เป็นฟังก์ชันของ ρ M และ n

$$E = E_b = hvA(n - 1)\rho/eM = B(n - 1)\rho/M = BP \tag{2.22}$$

โดย $A = 2rh_0Na$, $B = A(hv/e)$ และ $P = (n - 1)\rho/M$

สมการที่ 2.22 สามารถบอกได้ว่าไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างแบบเส้นตรงจะมีความ

สัมพันธ์ระหว่าง E_b กับ $(n - 1)\rho/M$ เป็นเส้นตรงตั้งความสัมพันธ์ ในสมการที่ 2.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ
เป็นไฮโดรคาร์บอนที่อัดตัว เส้นกราฟผ่านจุดออริจินซึ่งสอดคล้องกับการทดลอง การนำสมการที่
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.22 มาอธิบายสารประกอบที่มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นโซ่ยาวเช่น อัลคิลเบนซิน(สารประกอบประเภทอะโรมาติก) ได้ไม่ตรงกับการทดลอง เขาจึงได้พยายามสมมุติความยาวในโมเลกุลจากการคำนวณจำนวนพันธะทั้งสองในวงของเบนซิน ส่วนพันธะอื่นๆจะเพิ่มขึ้นเท่ากับพื้นที่หน้าตัดของโมเลกุล จะให้ความยาวของพันธะในเบนซินเท่ากับ $(n - 4)$ และรูปแบบของความเครียดในการเบรคคาน์ของสารประกอบอะโรมาติก โดย B_1 เป็นค่าคงที่ สามารถอธิบายได้ดังสมการ

$$E_b = B_1(n - 4)\rho/M \quad [2.23]$$

จากสมการที่ 2.22 และ 2.23 สามารถคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรคคาน์ในสารประกอบไฮโดรคาร์บอนและอะโรมาติก

2.3 สรุป

ทฤษฎีอิเล็กตรอนิกส์ที่ใช้อธิบายการนำกระแสและเบรคคาน์ในฉนวนเหลวหรือของเหลว มีแนวการพัฒนามาจากทฤษฎีการเบรคคาน์ในก๊าซ เริ่มต้นด้วยการปลดปล่อยอิเล็กตรอนแบบความร้อนตามสมการของช็อคกีหรือแบบสนามไฟฟ้า อิเล็กตรอนเหล่านี้จะวิ่งไปชนกับโมเลกุลของฉนวนเหลว ซึ่งขณะนั้นโมเลกุลเริ่มสั่นสะเทือนและมีพลังงานสะสมอยู่ในพันธะระหว่าง C-H เนื่องจากสนามไฟฟ้า เมื่ออิเล็กตรอนชนทำให้เกิดการแตกตัวบริเวณพันธะ การแตกตัวของโมเลกุลนั้นขึ้นอยู่กับพลังงานของอิเล็กตรอนและพลังงานที่พันธะว่ามีมากพอหรือไม่ เมื่อมีการแตกตัวของโมเลกุลหลายๆ จะเกิดอะวาลานซ์และเป็นสาเหตุของการเบรคคาน์ในที่สุด

บทที่ 3

การคำนวณสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอในฉนวนเหลว

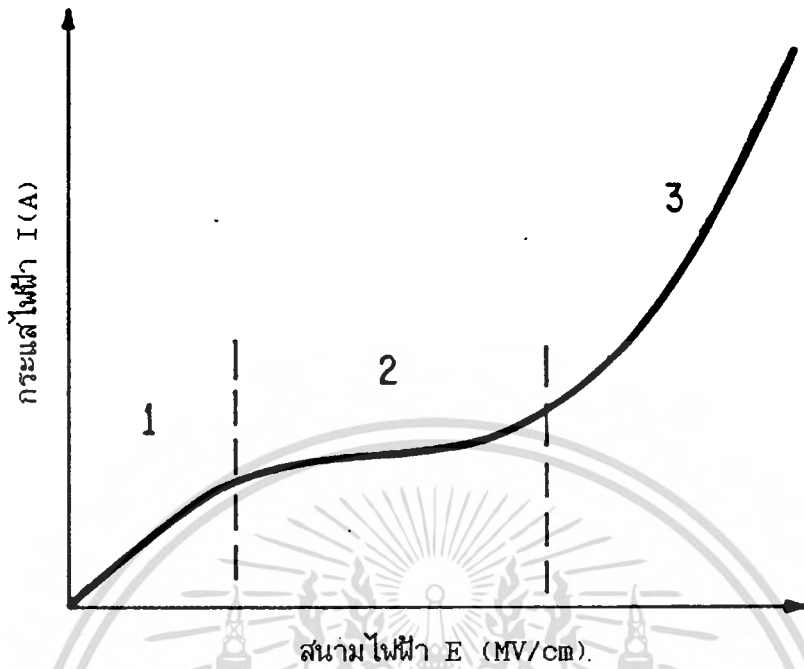
3.1 บทนำ

การคายประจุไฟฟ้าของฉนวนเหลวภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงส่วนมากเกิดขึ้นเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้า การคำนวณหาสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอในฉนวนเหลวสามารถจำลองรูปแบบของสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ โดยใช้รูปทรงทางเรขาคณิตของอิเล็กโตรดเป็นแบบจุด-พื้นระนาบ (point-plane) คุณลักษณะที่สำคัญของสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอคือมีการกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าระหว่างช่องอิเล็กโตรดไม่เท่ากัน ถ้าวงขอบรอบนอกของขั้วอิเล็กโตรดมีลักษณะเหมือนกัน ความเข้มของสนามไฟฟ้าจะมีมากบริเวณพื้นผิวของอิเล็กโตรดและมีความเข้มน้อยลงในบริเวณกลางช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรด ถ้าวงขอบรอบนอกของอิเล็กโตรดไม่เท่ากันหรือแตกต่างกันมาก ความเข้มของสนามไฟฟ้าจะมีมากบริเวณขั้วอิเล็กโตรดที่มีรัศมีของความโค้งน้อยกว่า ส่วนขั้วอิเล็กโตรดตรงข้ามจะมีความเข้มของสนามไฟฟ้าน้อยกว่า ในการวัดระดับความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้า กำหนดโดยค่าสัมประสิทธิ์แฟคเตอร์ของสนามไฟฟ้า (field coefficient factor) หรือ f เป็นอัตราส่วนระหว่างความเข้มของสนามไฟฟ้าที่มากที่สุด (E_m) กับค่าเฉลี่ยความเข้มของสนามไฟฟ้า (E_{avg}) และค่า f นี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางระหว่างอิเล็กโตรดมีมากและรัศมีของความโค้งลดลง ในการคำนวณหาสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอในฉนวนเหลวนั้นเป็นการทดสอบขั้นต้นว่าฉนวนเหลวสามารถทนต่อความเข้มของสนามไฟฟ้า หรือความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้มากน้อยเพียงใด เนื่องจากการกระจายของสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอทำให้เกิดเบรคดาวน์ได้ง่าย [4, 10] การคำนวณได้นำวิธีการเกิดอิเล็กตริกคอลลทรีอิง (electrical treeing)

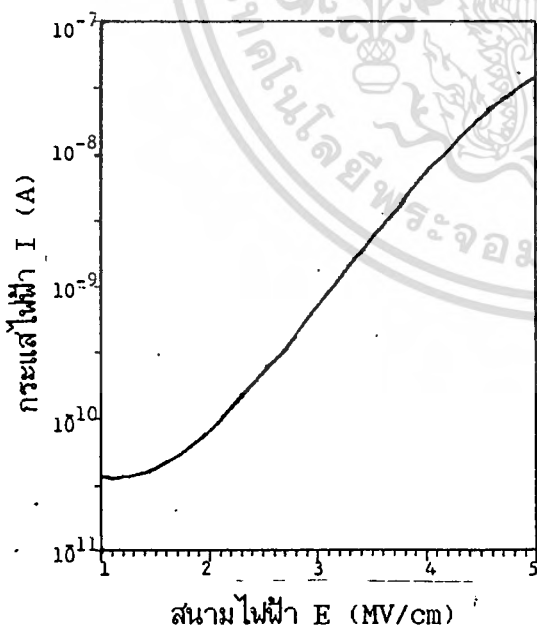
3.2 การเกิดอิเล็กตริกคอลลทรีอิง (Electrical Treeing Model)

จากการศึกษาตัวอย่างฉนวนเหลวภายใต้สนามไฟฟ้า [13] ข้อเท็จจริงที่ได้เป็นความ

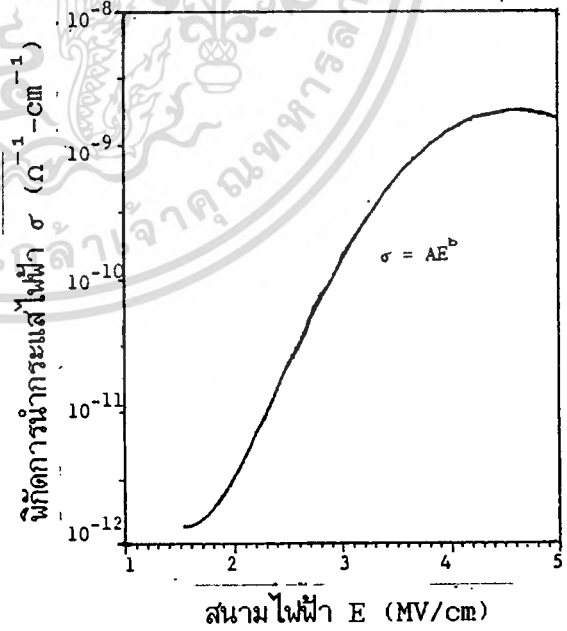
สัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (I) หรือพิกัดการนำกระแส (σ) กับสนามไฟฟ้า (E) ของฉนวนเหลวประเภทเอกสารเป็นเอกสารทงสวนวสําหรับการใ้ใช้งานเพื่อการศึษาแทนัน ไม่อนุญาตใ้หนาไปใ้ประโยชน์ดานการคําไม่วํโยโรครารบอนเหลว (น้ำมีกัหม้อแปลงไฟฟ้า) มีแนวโน้มและลักษณะของกราฟที่ได้ดังรูปที่ 3.2.1



รูปที่ 3.2.1 แสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าในเทอมของสนามไฟฟ้าในของเหลว[15]



ก)



ข)

รูปที่ 3.2.2 แสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้า ก) และนิกัดการนำกระแสไฟฟ้า ข)

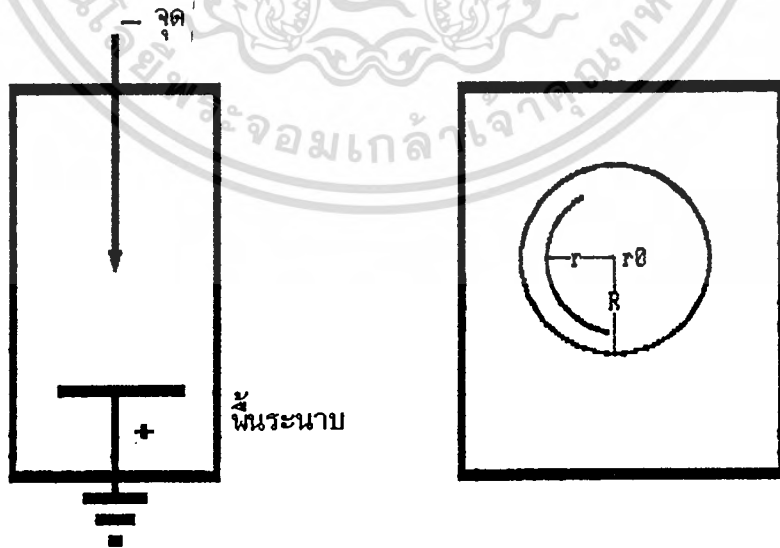
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ในเทอมของสนามไฟฟ้าสูงๆในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า[9]
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุที่เปลี่ยนแปลงเนื้อหาสาระอย่างจงใจของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถแบ่งกราฟออกเป็น 3 ช่วงคือ ช่วงแรกเป็นช่วงที่มีการไหลกระแสเล็กน้อยเนื่องมาจากอิทธิพลของค่ากระแสเริ่มต้นของชั่วคราว (I_0) เราเรียกช่วงนี้ว่า อีออนิก (ionic) ในช่วงที่ 2 เป็นช่วงกระแสอิ่มตัว (saturation) กระแสจะไหลคงที่แม้จะเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้น ช่วงนี้มีระยะสั้นมาก ในปลายของช่วงอิ่มตัวนี้กระแสเริ่มไหลมากขึ้น และถ้าเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นกว่าเดิมจะมีกระแสไหลเพิ่มสูงขึ้นกว่าเดิมมาก เราเรียกช่วงนี้ว่าฟิลด์เอ็ด (field-aided) การพิจารณาลักษณะของกราฟในช่วงที่ 2 และ 3 มีลักษณะคล้ายฟังก์ชันเอ็กซ์โปเนนเชียลสามารถสร้างสมมติฐานโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่าง $I = JS$; $I = \sigma ES$ ดังนั้น $\sigma = I/ES$ จากสมการนี้สามารถเปลี่ยนกราฟจากรูปที่ 3.2.2 เป็นรูปที่ 3.2.3 และสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดการนำกระแสไฟฟ้า กับสนามไฟฟ้า ในรูปที่ 3.2.3 เป็นดังนี้

$$\sigma = AE^b$$

[3.1]

โดยที่ A, b เป็นค่าคงที่



รูปที่ 3.2.4 แสดงลักษณะของชุดภาชนะทดสอบ รูปที่ 3.2.5 แบบจำลองอิล็คโตรดทรงกลม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า มีจุดศูนย์กลางร่วม ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสืบสวนการกระจายของสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอ โดยใช้ระบบอิลีคโตรดตั้งรูปที่

3.2.4 จากรูปความเข้มของสนามไฟฟ้าจะอยู่บริเวณปลายสุดของอิลีคโตรดแบบจุดมากที่สุดในการคำนวณการกระจายของสนามไฟฟ้าต้องใช้สมมติฐานของรูปแบบของอิลีคโตรดทรงกลมที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกันดังรูปที่ 3.2.5 โดยให้อิลีคโตรดแบบจุดเป็นศูนย์กลางของวงกลมข้างในมีรัศมี r_0 และให้จุดปลายสุดของอิลีคโตรดแบบจุดมีรัศมีเป็น r_0 เช่นกัน และวงกลมที่อยู่ข้างนอกมีรัศมีเป็น R ดังนั้นระยะห่างระหว่างจุดปลายสุดกับพื้นราบเท่ากับ $R - r_0 = R$, $R \gg r_0$ และสนามไฟฟ้า E ณ ทุกๆจุดที่มีรัศมี r ภายใต้เงื่อนไขการคงตัว (steady state) หาได้จากความสัมพันธ์จากสมการของแมกซ์เวลล์

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr}(r^2 \mathbf{J}) = 0$$

ความสัมพันธ์ของกระแสมีเฉพาะในแนว r จะได้

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr}(r^2 J_r) = 0 \tag{3.2}$$

$$2J_r + r \frac{d}{dr}(J_r) = 0 \tag{3.3}$$

และ $J_r = \sigma E_r$ [3.4]

จากความสัมพันธ์ของสมการที่ 3.3 และ 3.4 จะได้

$$2\sigma E_r + r \frac{d}{dr}(\sigma E_r) = 0$$

$$2\sigma E_r + r\sigma \frac{d}{dr}(E_r) + rE_r \frac{d\sigma}{dr} = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



นำ $(dr/r\sigma Er)$ ทารตลอดจะได้

$$\frac{2dr}{r} + \frac{dEr}{Er} + \frac{d\sigma}{\sigma} = 0 \tag{3.5}$$

อินทิเกรตสมการที่ 3.5 จะได้

$$\ln(r^2 Er \sigma) = C$$

$$Er = \frac{C}{r^2 \sigma} \tag{3.6}$$

C เป็นค่าคงที่ในการอินทิเกรต

จากสมการที่ 3.6 ถ้า σ ไม่ขึ้นกับ Er แล้ว Er จะแปรผกผันตาม r^2 นั่นคือสนามไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางกำลังสอง และถ้า σ ขึ้นอยู่กับ Er แล้วแทนสมการที่ 3.1 ในสมการที่ 3.6 จะได้

$$Er = \frac{C}{A Er^b \cdot r^2}$$

$$Er Er^b = \frac{C}{Ar^2}$$

$$Er^{b+1} = \frac{C}{Ar^2}$$

$$Er = \left(\frac{C}{A}\right)^{1/(b+1)} \cdot r^{-2/(b+1)} \tag{3.7}$$

ถ้า $b = 0$ $Er = \frac{C}{Ar^2}$ [3.8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในโรงเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด [3.9]

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ boundary condition

$$U_r = r_0 \int^R E_r dr$$

$$U_r = E_r(R-r_0)$$

$$U_r = E_r \cdot r$$

[3.10]

แทนค่าในสมการที่ 3.7

$$\frac{C}{A} = U_r \cdot r^{(1-b)/(1+b)}$$

เมื่อ $b = 0, r = r_0$

$$\frac{C}{A} = U_r \cdot r_0$$

แทนค่าในสมการที่ 3.7.1

$$E_r = E_0 \left(\frac{r_0}{r}\right)^2$$

[3.11]

$$E_0 = \frac{U_r}{r_0}$$

[3.12]

ในการทำงานเดียวกันที่

$b = 1$ จะได้

$$E_r = E_0 \left(\frac{r_0}{r}\right)$$

[3.13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ [3.14] การคำนวณค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และเผยแพร่ไปยังถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

b ≠ 1 จะได้

$$E_r = E_o \left(\frac{r_o}{r}\right)^{2/(b+1)} \quad [3.15]$$

$$E_o = \frac{(b - 1) \cdot U_r}{(b + 1) \cdot r_o^{2/(b+1)} \cdot [R^{(b-1)/(b+1)} - r_o^{(b-1)/(b+1)}]} \quad [3.16]$$

จากสมการที่ 3.11 - 3.15 จะเห็นได้ว่า E_r เป็นฟังก์ชันของ r/R และค่า E_r เป็นฟังก์ชันของ r_o จากกราฟแสดงให้เห็นว่าค่าสูงสุดของ b จะขึ้นอยู่กับพิกัดการนำกระแสไฟฟ้าของฉนวน และค่าต่ำสุดของ b ขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้าที่มีความเครียดสูงสุดคือบริเวณปลายสุดของอิเล็กโตรดแบบจุด นอกจากนี้ยังบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าขึ้นอยู่กับพิกัดการนำกระแสไฟฟ้าในฉนวนเหลว ซึ่งสามารถเพิ่มแรงดันไฟฟ้าตามต้องการเพื่อศึกษาการเกิดการเบรคดาวน์ในฉนวน สมมติให้แรงดันไฟฟ้าที่ปลายของอิเล็กโตรดในขณะใด ๆ U_o สามารถหาค่าของความเข้มของสนามไฟฟ้าเริ่มต้น E_o จากสมการที่ 3.12 , 3.14 และ 3.16 ดังนี้

b = 0

$$U_o = E_o r_o$$

b = 1

$$U_o = E_o r_o \ln(R/r_o)$$

b ≠ 1

$$U_o = E_o r_o \cdot \frac{(b+1)}{(b-1)} \cdot \left[\frac{R}{r_o}\right]^{(b-1)/(b+1)} - 1$$

จากรูปที่ 3.2.6 เป็นการจำลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง E_r ในเทอมของ r โดยสมมุติค่าของ $U_o = 20 \text{ kV}$, $r_o = 0.06 \text{ ม.ม.}$ และระยะแคป $R = 1.5 \text{ ม.ม.}$ ถ้า $b = 0$ ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าเริ่มต้นที่ปลายสุดหรือ $E_o = 330.34 \text{ kV/ม.ม.}$ ซึ่งมีค่าสูงมาก ถ้าค่า r มีค่า 0.1 ม.ม. ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้ามีค่า 120 kV/ม.ม. ลดลง 2.7 เท่า ถ้า $b = 1$ และ 2 ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าเริ่มต้น $E_o = 103.55$ และ 30.3 kV/ม.ม.

เอกสารฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายได้ หากต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

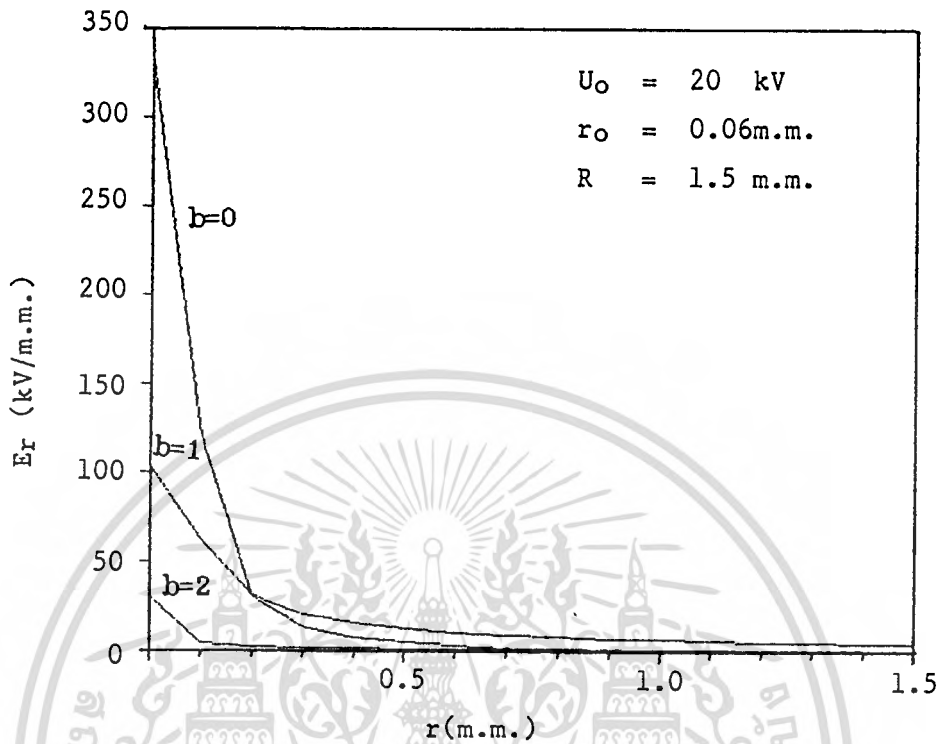
มากความเครียดของสนามไฟฟ้าจะมีค่าน้อยลง นั่นคือจนวนเฉลวนิดนั้นมึพิกัดการนำกระแสดีกว่
จนวนเหลวมึค่า b น้อย

จากรูปที่ 3.2.7 เป็นการจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง E_r/E_0 ในเทอมของ r โดยมี
 $r_0 = 0.06$ ม.ม. $R = 1.5$ ม.ม. ถ้าค่าของ b มาก E_r/E_0 จะมากตามไปด้วย นั้นแสดงให้
เห็นว่าถ้าอัตราส่วนระหว่าง E_r/E_0 มีค่ามากการกระจายของสนามไฟฟ้า ณ สองจุดที่อยู่ติดกัน
จะมีค่าใกล้เคียงกัน

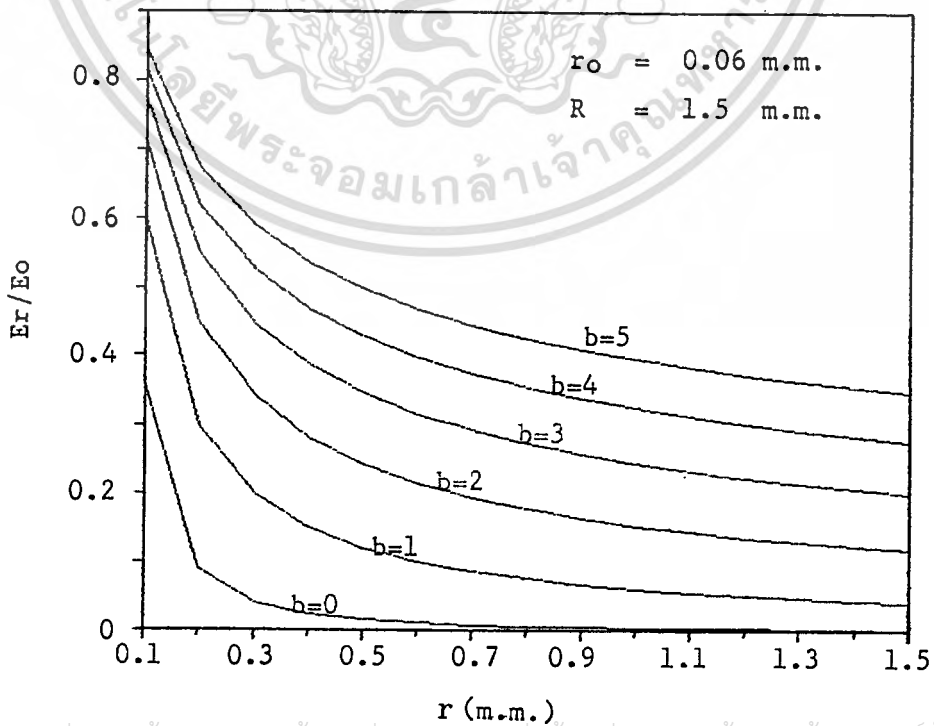
จากรูปที่ 3.2.8 เป็นการจำลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง E_r/E_0 ในเทอมของ b
เป็นแบบเส้นตรงที่ $b > 2$ โดยปกติอัตราการเพิ่มของ E_0 กับค่าของ b ไม่สามารถสังเกตได้
จากการทดลอง การลดลงของ E_r ด้วยการเพิ่มค่า b ทำให้อัตราการเพิ่มของ E_0 ลดน้อยลง
สำหรับค่า b สูงๆ

3.3 สรุป

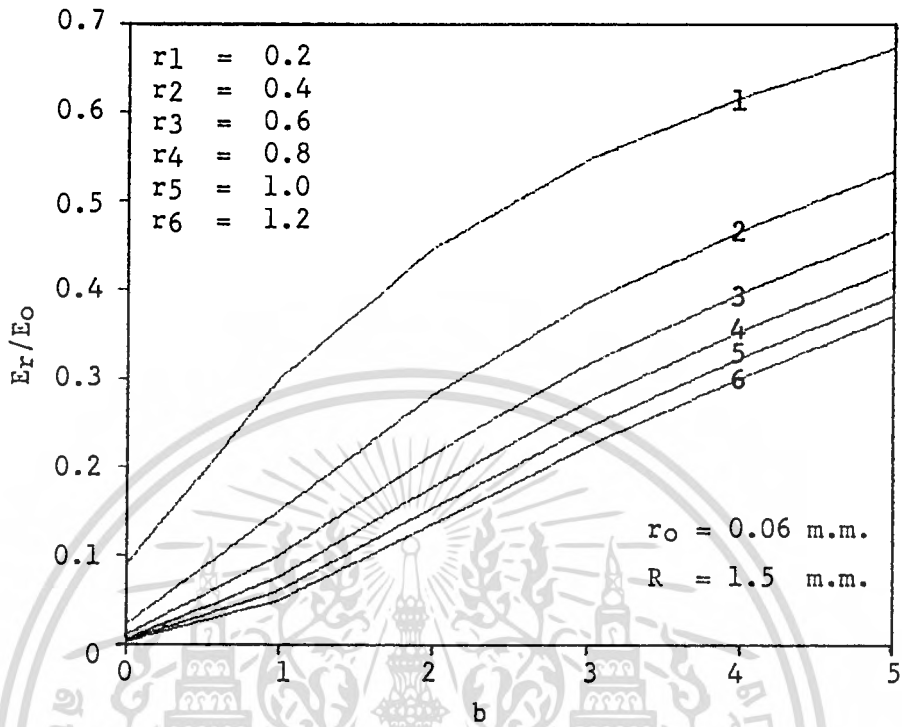
ในการคำนวณการกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอใน
จนวนเหลวมึการเกิดอเล็คตริกคอลทรีอิ่ง โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างการนำกระแสไฟฟ้า
หรือกระแสไฟฟ้กับสนามไฟฟ้า ซึ่งได้มาจากการทดลอง วิธีนี้สามารถให้ผลใกล้เคียงในช่วงการที่
2 และ 3 ของรูปที่ 3.2.1 สำหรับในช่วงแรกนั้นความสัมพันธ์เป็นแบบเส้นตรง ผลที่ออกมาคาด
เคลื่อนเล็กน้อย ดังนั้นการคำนวณสนามไฟฟ้าโดยวิธีนี้จึงจำลองรูปแบบของสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอ
ในช่วงแรงดันไฟฟ้าสูงๆ(ช่วงที่ 3) เท่านั้น



รูปที่ 3.2.6 แสดงการจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง E_r ในเทอมของ r



รูปที่ 3.2.7 แสดงการจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง E_r/E_o ในเทอมของ r



รูปที่ 3.2.8 แสดงการจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง E_r/E_o ในเทอมของ b

บทที่ 4

ปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการเบรคดาวนในฉนวนเหลว

4.1 บทนำ

การเบรคดาวนในฉนวนเหลวมีกลไกการเกิดที่ซับซ้อนมาก ในปัจจุบันยังไม่มีทฤษฎีหรือข้อสรุปที่แน่นอนอธิบายกลไกการเกิดนี้ นักวิจัยหลายท่านได้นำเอาพื้นฐานของการเบรคดาวนในก๊าซและของแข็งเป็นแนวทางในการอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น[9, 11, 16] เนื่องจากการเบรคดาวนในฉนวนเหลวมีปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องในการเบรคดาวนหลายตัว มีผลให้แรงดันเบรคดาวนในฉนวนเหลวลดลง ดังนั้นในการพัฒนาฉนวนเหลวตัวใหม่ขึ้นมาใช้งานในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงต้องศึกษาผลกระทบจากปัจจัยต่างๆ เพื่อจะได้ทำการป้องกันและปรับปรุงคุณภาพของฉนวนเหลวให้ดีขึ้นและมีความปลอดภัยในการใช้งานมากขึ้น สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อแรงดันเบรคดาวนในฉนวนเหลวขอสรุปได้ดังนี้

4.2 วิธีการทดลอง

การวางเงื่อนไขในการทดสอบหาค่าแรงดันเบรคดาวนในฉนวนเหลวมีความสำคัญมากต่อผลการทดลอง ดังนั้นต้องกำหนดมาตรฐานในการทดสอบที่แน่นอน มีเงื่อนไขในการทดลองอย่างไร และแต่ละขั้นตอนควรมีการกำหนดกระแสไหลผ่านฉนวนเหลวเท่าใดหรือมีการสปาร์คข้ามระยะแกปจึงเรียกว่าเกิดการเบรคดาวน และอุปกรณ์ในการทดลองต้องตรวจสอบว่าอยู่ในสถานที่ใช้งานได้ดีและต้องปฏิบัติตามอย่างเคร่งครัดเพื่อข้อมูลที่ได้อาจถูกต้องและแม่นยำ จากการตรวจสอบแรงดันเบรคดาวนในไฮโดรคาร์บอนเหลวประเภทเดียวกัน[32, 33] และ [31, 34] ซึ่งได้ผลไม่เท่ากัน แสดงว่าวิธีการทดลองและผู้ทดลองมีส่วนเกี่ยวข้องกับผลการทดลอง นอกจากนี้ต้องคำนึงถึงสภาพสิ่งแวดล้อมในบริเวณที่ทำการทดสอบด้วย

4.3 ระยะเวลา

ระยะเวลามีผลต่อแรงดันเบรคดาวนในฉนวนเหลวคือ แรงดันเบรคดาวนจะแปรตามระยะแกป สาเหตุที่ทำให้แรงดันเบรคดาวนสูงขึ้น เนื่องมาจากการเดินทางของไอออนที่เป็นประจุบวกเดินทางมากขึ้นจึงต้องใช้แรงดันสูงกว่าเดิม ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอถ้าระยะแกปมากขึ้นสนามไฟฟ้าจะมีค่าคงที่ นั่นคือสนามไฟฟ้าจะไม่แปรตามระยะแกป และภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสนามไฟฟ้าจะลดลงเมื่อระยะแกปมากขึ้น มีลักษณะเช่นเดียวกับสนามไฟฟ้าที่ทำได้ในบทที่ 3 การหาความสัมพันธ์ของระยะแกป(d) และแรงดันเบรคดาวน(U_b) ถูกเสนอโดย M.S.Nainu และ V.Kamaraju [35] สามารถเขียนได้ดังนี้ ; $U_b = k \cdot d^n$ โดยที่ k เป็นค่าคงที่ และ n เป็นค่าคงที่ที่น้อยกว่า 1 ในการประมาณโดยวิธีนี้มีข้อผิดพลาดมากเมื่อระยะแกปมากขึ้น

4.4 รัศมีความโค้งของอิเล็กโตรด

รัศมีความโค้งของอิเล็กโตรด มีผลต่อแรงดันเบรคดาวนมากในกรณีที่ฉนวนเหลวอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ผลของรัศมีความโค้งที่มีผลต่อแรงดันเบรคดาวนสังเกตจากสมการที่ 3.9 - 3.13 ถ้าลดค่า r_0 ให้น้อยลง สนามไฟฟ้า E_r จะเพิ่มมากขึ้น ความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าจะเพิ่มมากขึ้น ถ้าเพิ่มค่า r_0 ให้มากขึ้นสนามไฟฟ้า E_r ลดน้อยความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟาลดลงและมีผลให้แรงดันเบรคดาวนมีค่ามากขึ้น (ไม่คิดประจุค้าง)

4.5 รูปร่างทางเรขาคณิตของอิเล็กโตรด

ลักษณะรูปร่างทางเรขาคณิตของอิเล็กโตรดที่แตกต่างกันมีผลให้การกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าแตกต่างกัน เป็นแบบสม่ำเสมอ แบบสม่ำเสมอ น้อย แบบไม่สม่ำเสมอ และรูปร่างทางเรขาคณิตจะมีผลต่อแรงดันเบรคดาวนมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะของสนามไฟฟ้าว่าเป็นแบบสม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอ อธิบายได้โดยใช้ค่า ส.ป.ส.แฟคเตอร์สนามไฟฟ้า สามารถบอกการกระจายของสนามไฟฟ้าระหว่างแกป ถ้าสนามไฟฟ้าเป็นแบบไม่สม่ำเสมอมาก ๆ ค่าส.ป.ส.แฟคเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่าสูง แบบสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอค่านี้เท่ากับ 1 ความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้ามีผลทำให้มีความเครียดของสนามไฟฟ้าสูง เกิดประจุค้างง่าย มีผลให้แรงดันเบรคดาวนเปลี่ยนไป กรณีป้อนแรงดันลบและลดลงกรณีป้อนแรงดันบวก ดังนั้นรูปร่างทางเรขาคณิตของอิเล็กโตรดที่แตกต่างกันทำให้ค่า ส.ป.ส.แฟคเตอร์สนามไฟฟ้าต่างกัน มีผลให้แรงดันเบรคดาวนของฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อผู้อื่น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

เหลี่ยมมีค่าต่างกันด้วย ตารางที่ 4.5 แสดงรูปทรงทางเรขาคณิตของอิเล็กโตรด มีส.ป.ส. แพลเตอร์สนาม ไฟฟ้าที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.5 แสดงรูปทรงทางเรขาคณิตของอิเล็กโตรด มีส.ป.ส. แพลเตอร์สนาม ไฟฟ้าที่แตกต่างกัน [17, 35]

รูปทรงทางเรขาคณิต	ส.ป.ส. แพลเตอร์สนามไฟฟ้า
1. แบบใหม่	1
2. พื้นระนาบ (โรโกสกี)	1
3. จานกลม-จานกลม	1
4. ทรงกลม-พื้นระนาบ	$0.94(d/R) + 0.8$
5. ทรงกลม-ทรงกลม	$\frac{[(d/R) + 1] + \sqrt{[(d/R) + 1]^2 + 8}}{4}$
6. ทรงกระบอก-พื้นระนาบ	$0.25(d/R) + 1$
7. จุด-พื้นระนาบ	(d/r_0)

4.6 สารโลหะที่ใช้ทำอิเล็กโตรด

เนื่องจากอิเล็กโตรดมีส่วนสำคัญในขบวนการเบรคดาวน์ แรงดันเบรคดาวน์เป็นฟังก์ชันของสารโลหะที่ใช้ทำอิเล็กโตรด สาเหตุที่ทำให้แรงดันเบรคดาวน์ในฉนวนเหลี่ยมมีค่าต่างกันเนื่องมาจากอิเล็กโตรดจะปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมาชนกับโมเลกุลของฉนวนเหลี่ยม มีการแตกตัวของฉนวนเหลี่ยมและเป็นสาเหตุการเบรคดาวน์ในที่สุด การปลดปล่อยอิเล็กตรอนเริ่มต้นด้วยการที่คาโทดจะผลิตอิเล็กตรอนเนื่องจากการให้พลังงานเข้าไป เมื่ออิเล็กตรอนมีพลังงานมากพอที่จะเอาชนะแรงยึดเหนี่ยว (work function) ของผิวอิเล็กโตรด อิเล็กตรอนจะถูกปลดปล่อยออกมา และ

การเกิดอิเล็กตรอนโดยลักษณะนี้มีทฤษฎีอธิบาย 3 แบบคือการปลดปล่อยแบบความร้อนและสมการเอกสารณเป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าของชีวิตก็ การปลดปล่อยแบบโฟโตอิเล็กทริก ; $h\nu \geq \phi$ และการปลดปล่อยแบบสนามไฟฟ้า

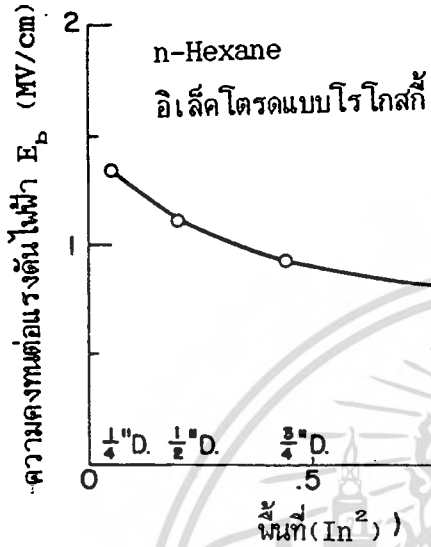
สมการที่ 2.9 จากสมการทั้ง 4 มีตัวแปรที่สำคัญคือค่าแรงยึดเหนี่ยวภายในโลหะ ในโลหะแต่ละชนิดมีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวแตกต่างกันออกไปและเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่าแรงดันเบรคดาวนมีค่าต่างกัน เมื่อใช้โลหะต่างชนิดทำอิเล็คโตรด ตารางที่ 4.6 แสดงค่าตัวแปรต่างๆมีผลต่อแรงดันเบรคดาวน ในฉนวนเหลวประเภทน้ำมันแร่(mineral oil)

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อแรงดันเบรคดาวน[15]

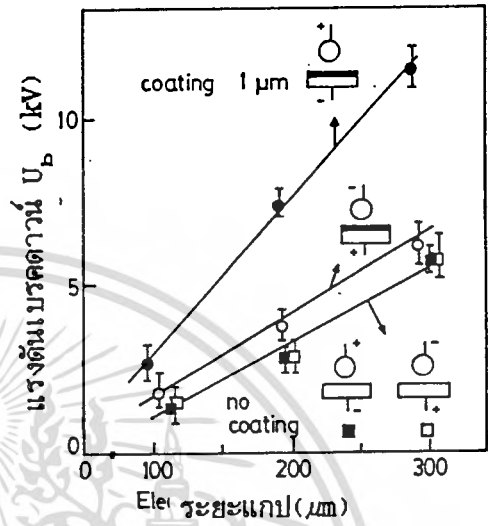
โลหะ	J ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	E_o (kV/cm)	ϕ (eV)
1 เหล็กแอสแตนเลส	0.5 - 1.0	32 ± 2	7.9
2 แฉ็ตตินัม	0.01 - 0.02	31 ± 4	9.0
3 อลูมิเนียม	0.8 - 1.5	28 ± 3	6.0

4.7 พื้นที่ผิวของอิเล็คโตรด

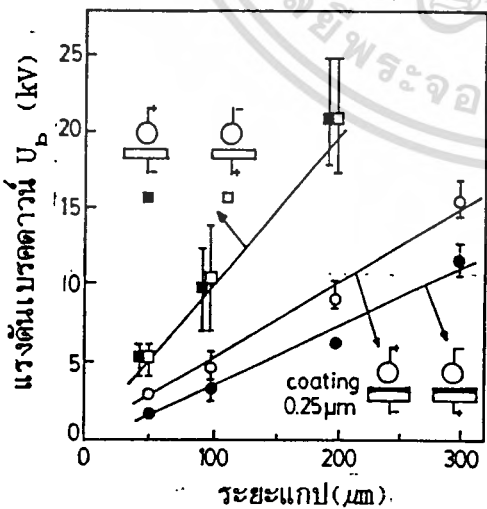
จากการสืบสวนผลของพื้นที่ผิวของอิเล็คโตรดต่อค่าแรงดันเบรคดาวนในของเหลว n-hexane โดย Sharbaugh[16] ได้รายงานไว้ว่า ถ้าพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าจะลดลง และเมื่อพื้นที่ผิวของอิเล็คโตรดเพิ่มขึ้นประมาณ 50 % ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าจะลดลงประมาณ 20 % ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ขณะเกิดการเบรคดาวนจะเกิดประกายไฟและเกิดการสีกกร่อนมีรูพรุนที่ผิวของอิเล็คโตรด การเบรคดาวนครั้งต่อไปจะไม่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งเดิมแต่จะเกิดที่ตำแหน่งใหม่บนพื้นผิว ถ้าอิเล็คโตรดมีพื้นที่ผิวมากโอกาสที่จะเกิดความไม่เรียบหรือมีรูพรุนจะมีมาก ในขณะที่เดียวกันจะมีพื้นที่ผิวส่วนที่เรียบมากเช่นกัน โอกาสที่จะเกิดเบรคดาวนครั้งต่อไปได้ง่ายกว่าอิเล็คโตรดที่มีพื้นที่ผิวน้อยดังในรูปที่ 4.7



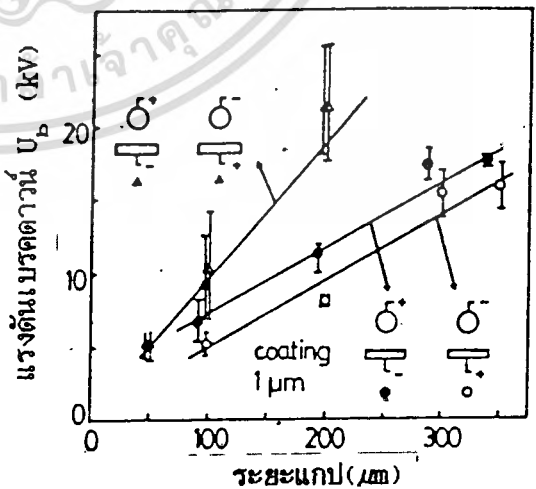
รูปที่ 4.7 แสดงผลของพื้นที่ขั้วอิเล็กโตรด ต่อค่าแรงดันเบรกดาวน์ [16]



รูปที่ 4.8.1 แสดงผลของอิเล็กโตรด โคทติง โดยใช้โพลีธินโอเพนทีงหนา 1 μm ในเฮกซะมีทิล เกลวภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรง [3]



รูปที่ 4.8.2 แสดงผลของอิเล็กโตรด โคทติง



รูปที่ 4.8.3 แสดงผลของอิเล็กโตรด โคทติง

โดยใช้โพลีธินโอเพนทีงหนา 0.25 μm ใน LHe

โดยใช้โพลีธินโอเพนทีงหนา 1 μm ใน LHe

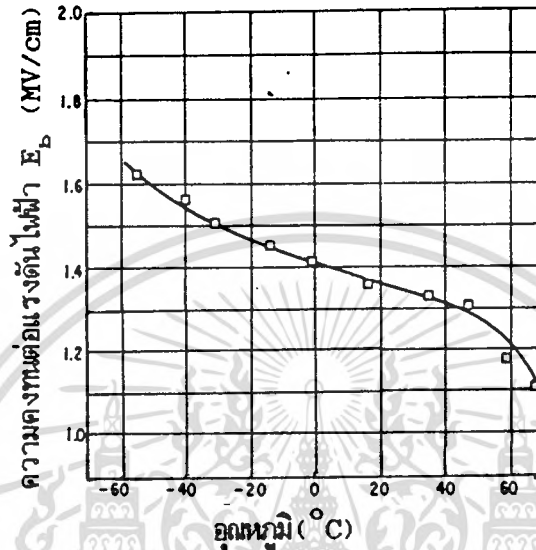
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ภายใต้สนามไฟฟ้าแบบพัลส์ 6 μsec [3]

4.8 อิเล็กโตรดโคตติง

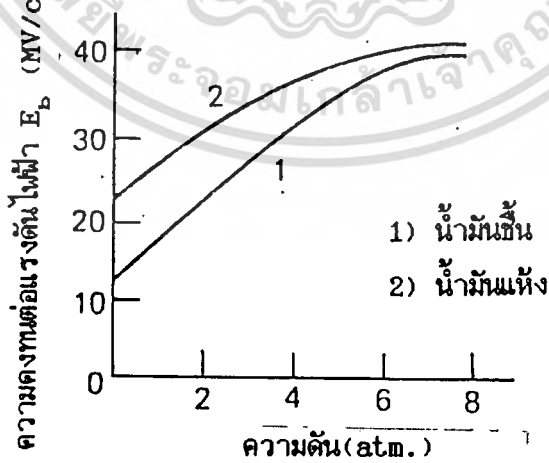
การนำสารบางอย่างเคลือบบนผิวของอิเล็กโตรดด้านคาโธด มีผลต่อกลไกการเบรคดาวน์ สารเคลือบบนพื้นผิวมีพฤติกรรมเหมือนกำแพงกั้นระหว่างช่องอิเล็กโตรด สำหรับผลของแรงดันกระแสตรงต่ออิเล็กโตรดโคตติง ค่าแรงดันเบรคดาวน์ที่โคตติงชั่วคราวจะสูงกว่าที่โคตติงด้านอโนดและที่ไม่มีโคตติง สำหรับผลของแรงดันแบบพัลส์ แรงดันเบรคดาวน์ที่โคตติงชั่วคราวจะสูงกว่าที่โคตติงชั่วคราวอย่างชัดเจน แต่จะน้อยกว่าที่ไม่มีโคตติง ดังแสดงในรูปที่ 4.8.1 และ 4.8.2 และ 4.8.3 จากการศึกษาของ C. Hosticka [17] การโคตติงจะทำให้แรงดันเบรคดาวน์สูงขึ้นในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ การโคตติงด้านอโนดหรือคาโธดด้านใดด้านหนึ่งหรือทั้งสองด้านมีแรงดันเบรคดาวน์ใกล้เคียงกัน และสามารถคำนวณหาแรงดันเบรคดาวน์ (U_p) ได้จากสมการดังต่อไปนี้ $E_p = U_p / (d_o + \epsilon_o d_p / \epsilon_p)$; E_p เป็นค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในน้ำมัน ϵ_o , ϵ_p เป็นค่าเปอร์มิตติวิตีของน้ำมันและฉนวนที่มาโคตติง d_o , d_p เป็นความหนาของน้ำมันและฉนวนที่มาโคตติง

4.9 อุกุณหภูมิ

ความเครียดทางไฟฟ้าของฉนวนเหลวประเภทไฮโดรคาร์บอนจะความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ทั้งที่อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรงและเป็นลูกคลื่น การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเบรคดาวน์รอบๆ อุณหภูมิห้องมีน้อยมากและอย่างช้าๆ และจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากเมื่ออุณหภูมิมีค่าต่ำหรือสูงมากๆ มีการดูดกลืนพลังงานจากคาโธด การเปลี่ยนแปลงอธิบายโดยใช้สมการของช็อดท์หรือสมการการปลดปล่อยแบบความร้อน จะเห็นได้ว่ากระแสเริ่มต้นจะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และถ้ากระแสเริ่มต้นไหลมีมาก การแตกตัวของอิเล็กตรอนในโมเลกุลเพิ่มขึ้น เป็นสาเหตุของการเบรคดาวน์ เนื่องจากการเบรคดาวน์แต่ละครั้งขึ้นอยู่กับจำนวนอิเล็กตรอนหรือไอออน จะมีค่าน้อยในการทำให้เกิดเบรคดาวน์ ดังนั้นที่อุณหภูมิใกล้เคียงกันกระแสเริ่มต้นไม่แตกต่างกันมาก เป็นผลให้ที่บริเวณอุณหภูมิใกล้เคียงกันมีแรงดันเบรคดาวน์แตกต่างกันเล็กน้อย นอกจากนี้อุณหภูมิยังทำให้ความหนาแน่นและความหนืดลดลง และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นยังทำให้เกิดการสั้นสะเก็ด มีพลังงานสะสมในโซ่พันธะของโมเลกุลในฉนวนเหลวตามหลังสมดุลพลังงานของ Von Hippel และมีผลสรุปว่าแรงดันเบรคดาวน์จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.9 แสดงถึงความคงทนต่อแรงดัน



รูปที่ 4.9 แสดงถึงความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในเทอมของอุณหภูมิในเฮกเซน [16]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 4.10 แสดงถึงความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในเทอมของความดันในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า [2]

ไฟฟ้ากับอุณหภูมิของ n-hexane โดย K.C. Kao และ Higham

4.10 ความดัน

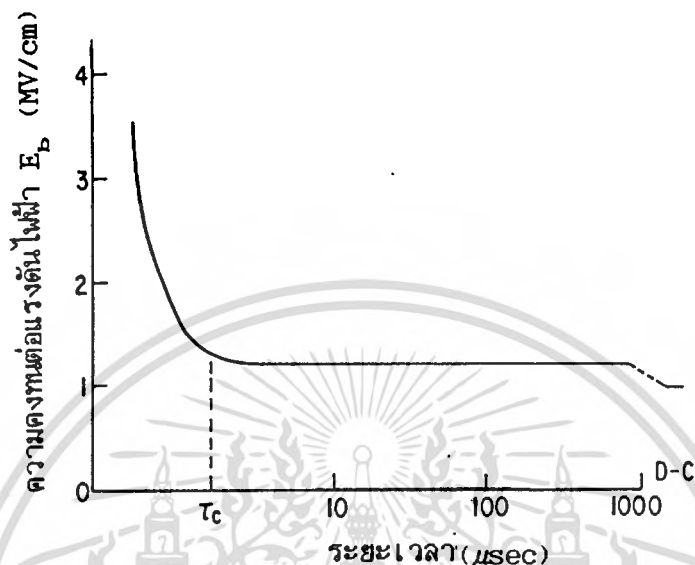
เมื่อเพิ่มความดันเข้าไปในภาชนะทดสอบทำให้ค่าความหนาแน่นของฉนวนเหลวเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเครียดของสนามไฟฟ้า แรงดันเบรคดาวน์จะเปลี่ยนแปลงมากหรือเล็กน้อย ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการทดลองและการเกิดฟองก๊าซในฉนวนเหลว จำนวนก๊าซที่ถูกอิเล็กโตรดดูดกลืนหรือสถานะความเสถียรภาพของฉนวนเหลวที่มีก๊าซผสมอยู่จะมีผลให้แรงดันเบรคดาวน์จากการทดสอบ [16] ความดันเพิ่มขึ้น 1 เท่า ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นประมาณ 6.14 % ถ้าความดันเพิ่มขึ้นมากกว่า 3 เท่า ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าคงที่ ในรูปที่ 4.10 แสดงค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในเทอมของความดันในน้ำมันหม้อแปลงทำมาจากน้ำมันปิโตรเลียม เมื่อเปรียบเทียบกับเอกสารอ้างอิงข้างต้น ผลจะไม่ตรงกันคือความดันในรูปที่ 4.10 เพิ่มขึ้น 3 เท่าค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าจะไม่คงที่ แต่เริ่มคงที่เมื่อความดันเพิ่มขึ้น 6 เท่า

4.11 สนามแม่เหล็กไฟฟ้า

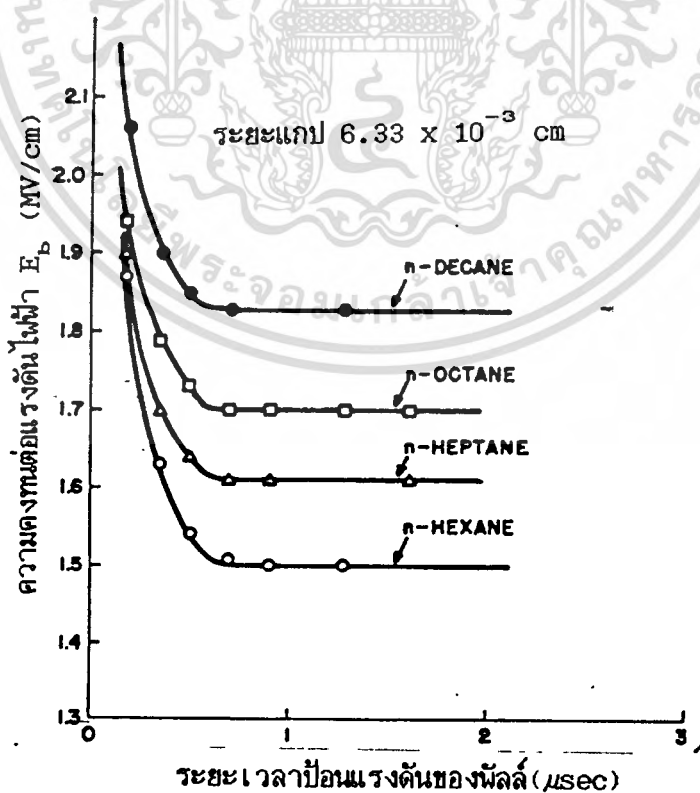
การเบรคดาวน์เกี่ยวข้องกับขบวนการแตกตัวของอิเล็กตรอนเนื่องมาจากการชนกันของอิเล็กตรอน ดังนั้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำให้ความถี่ของการชนกันของอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น และมีผลให้ความเครียดของสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ในการทดลองโดยใช้ n-hexane ของ Gallagher พบว่าความเครียดจะเพิ่มขึ้น 10 % ถ้าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.61 เทสลา ในขณะที่ Secker และ Hilton พบว่าเพิ่มขึ้น 2-4 % เมื่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 0.02 เทสลาและจะลดลง 7 % ในช่วงสนามแม่เหล็กไฟฟ้า 0.02 - 0.2 เทสลา ซึ่งรายงานเกี่ยวกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีผลต่อแรงดันเบรคดาวน์ในฉนวนเหลว ยังให้ผลไม่น่าพอใจ

4.12 จำนวนอะตอมของคาร์บอน

จากการศึกษาด้วยเรเซอร์สีกัม (Ruby Laser) [4] พบว่าโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนเหลว แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ฉนวนเกิดเบรคดาวน์โดยการเหนี่ยวนำของเรเซอร์สีกัมมีจะลดลงเมื่อจำนวนอะตอมของคาร์บอนเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก โมเลกุลมีคาร์บอนมากขึ้น การยึดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เหนี่ยวนำภายในโมเลกุลซึ่งแรงเหนี่ยวนำโมเลกุลที่มีคาร์บอนน้อยๆ



รูปที่ 4.13.1 แสดงความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าใน ทอมของการป้อนความยาวพัลส์ [16]



รูปที่ 4.13.2 แสดงความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าใน ทอมของระยะเวลาป้อนแรงดันของพัลส์ เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งในไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้ [16] อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

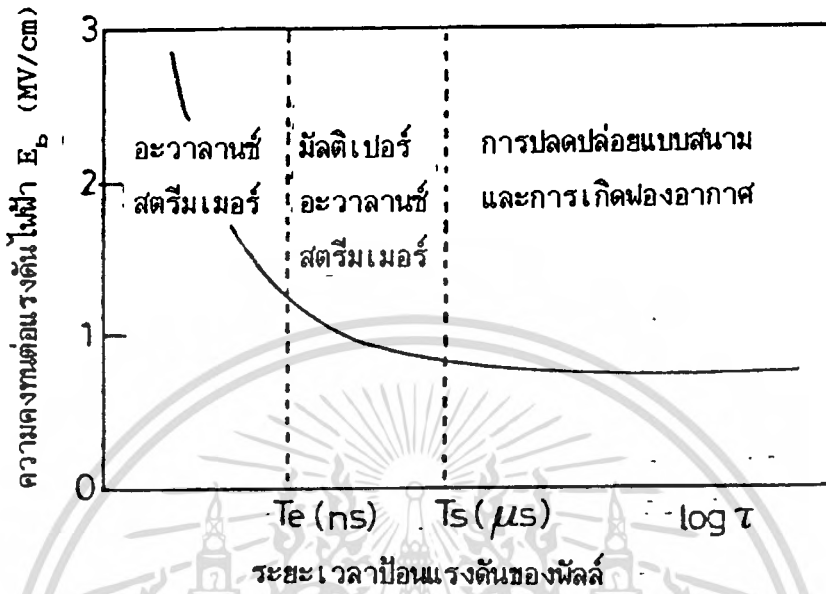
4.13 ผลทางเวลา

ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลว เป็นฟังก์ชันของความยาวของพัลส์ (pulse length) ที่ป้อนและระยะเวลาในการป้อน (pulse duration) ถ้าพัลส์เป็นรูปฉาก (rectangular pulse) มีความยาวของพัลส์น้อยกว่าระยะเวลาป้อนพัลส์วิกฤติ (critical time, t_c) แล้วค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวจะมีค่ามากขึ้นเมื่อความยาวของพัลส์ลดลง ถ้าความยาวของพัลส์มากกว่า t_c แล้วค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวมีค่าเท่าเดิมและจะลดลงเมื่อความยาวของพัลส์มากกว่า $1000 \mu\text{sec}$ ดังรูปที่ 4.13.1 และค่า t_c เพิ่มขึ้นเมื่อระยะแกปเพิ่มขึ้น เช่น $t_c = 1 \mu\text{sec}$ สำหรับที่ระยะแกป $50 \mu\text{m}$ และค่านี้ไม่ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของโมเลกุลดังรูปที่ 4.13.2 ผลของระยะเวลาในการป้อนต่อค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในรูปที่ 4.13.3 เราแบ่งกราฟออกเป็น 3 ช่วงคือ $0 - T_e$ เป็นช่วงเวลาที่สั้นมากในระดับ nsec มีการเกิดอะวาลานซ์สตรีมเมอร์ (avalanche streamer region) ช่วงนี้ความแตกต่างของ E_p มีมาก ถ้าระยะเวลาที่ใช้ป้อนลดลง ช่วง $T_e - T_s$ ช่วงนี้มากกว่าช่วงแรก มีการเกิดมัลติเปอิลอะวาลานซ์สตรีมเมอร์ (multiple avalanche streamer region) ในช่วงหลัง T_s ไปแล้วระยะเวลาในการป้อนจะไม่มีผลต่อค่า E_p เรียกช่วงนี้ว่าช่วงปลดปล่อยและการเกิดฟองอากาศ (field emission and bubble region)

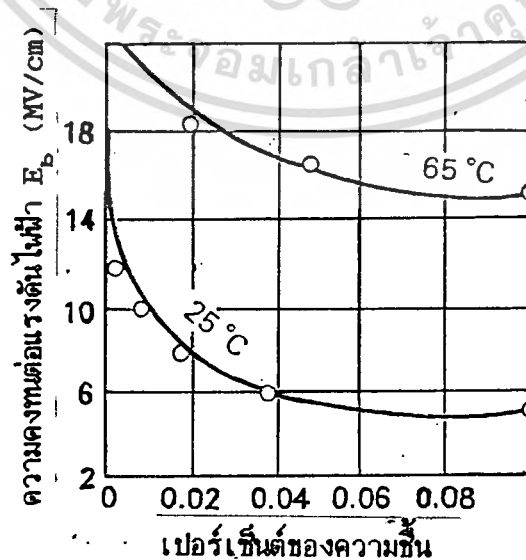
4.14 ความชื้น

ปริมาณความชื้นหรือละอองไอน้ำที่ปะปนอยู่ในฉนวนเหลว มีผลทำให้ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าลดลง [16] มาตรฐาน ASTM D:3487-82a กำหนดค่าความชื้นที่มีอยู่ในฉนวนเหลวได้ไม่เกิน 35 ppm จากการศึกษาลงของความชื้นที่มีต่อแรงดันเบรคดาวน์ในน้ำมันพืช [1] ปรากฏว่าที่ระดับความชื้น 35 ppm ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าลดลงประมาณ 12 % และ 22% ที่ 50 ppm ในน้ำมันถั่วเหลือง ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าระดับนี้อยู่ในขอบเขตที่ใช้งานได้ สำหรับค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีหยดน้ำปะปนอยู่ในฉนวนเหลวสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้ $E_{CR} = 487.7(S/R\epsilon_1)^{1/2}$ โดยที่ S คือความตึงผิวของหยดน้ำ ϵ_1 คือค่าเปอร์มิตติวิตีของฉนวน

เหลว ค่าของ E_{CR} ขึ้นอยู่กับรัศมีของหยดน้ำ ถ้ารัศมีมากหรือหยดน้ำมีขนาดใหญ่ ค่า E_{CR} จะลดลง จากรูปที่ 4.14 แสดงค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในท่อมปริมาณความชื้นปะปนของน้ำมัน



รูปที่ 4.13.3 แสดงความเค้นต่อแรงดันไฟฟ้าในทอมของระยะเวลาป้อนแรงดันของพัลส์ ในไฮโดรคาร์บอนเหลว [16]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 4.14 แสดงความเค้นต่อแรงดันไฟฟ้าในทอมปริมาณความชื้นปะปนของน้ำมันหม้อแปลง [2]

หม้อแปลงทำมาจากน้ำมันปิโตรเลียม

4.15 สิ่งเจือปนของแข็ง

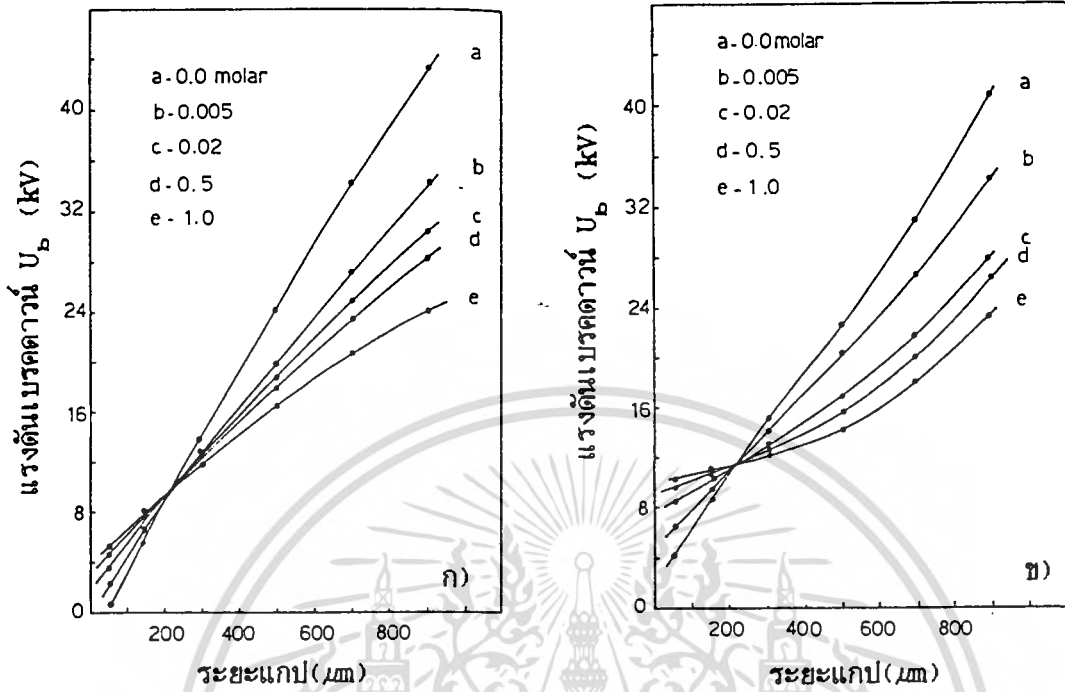
สาร ไมบริสัทท์ที่เป็นของแข็งมีปะปนในฉนวนเหลว เช่น ฝุ่นละอองและอนุภาคต่างๆที่มีขนาดเล็กมากกระจายในฉนวนเหลว จะมีผลทำให้ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าลดลงมากที่สุดเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ E_r ถ้าอนุภาคเป็นรูปทรงกลม มีรัศมี r และมีเปอร์มิตติวิตี ϵ_2 อยู่ในฉนวนเหลวที่มีค่าเปอร์มิตติวิตี ϵ_1 อนุภาคจะถูกโผลาไรซ์ ทำให้เกิดแรงกระทำต่ออนุภาคดังกล่าว $F = 0.5r^3 \frac{(\epsilon_2 - \epsilon_1)}{(2\epsilon_2 + \epsilon_1)} \cdot \text{grad } E_r$ จากสมการถ้า $\epsilon_2 > \epsilon_1$ แรงนี้จะทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปในบริเวณที่มีความเครียดของสนามไฟฟ้าสูง ถ้า $\epsilon_1 < \epsilon_2$ แรงจะให้อนุภาคเคลื่อนที่ในทิศตรงข้าม ผลของแรงจะทำให้อนุภาคเรียงกันเป็นลูกโซ่ เมื่อมีความเครียดของสนามไฟฟ้ามากๆ ทำให้เกิดการเบรคดาวน์ตามแนวลูกโซ่นั้น การเคลื่อนที่ของอนุภาคด้วยแรงทางไฟฟ้ามีแรงที่ต้านการเคลื่อนที่เนื่องจากความหนืด มีผลทำให้ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าขึ้นอยู่กับเวลา ความหนืด และขนาดของอนุภาค

4.16 ฟองอากาศ

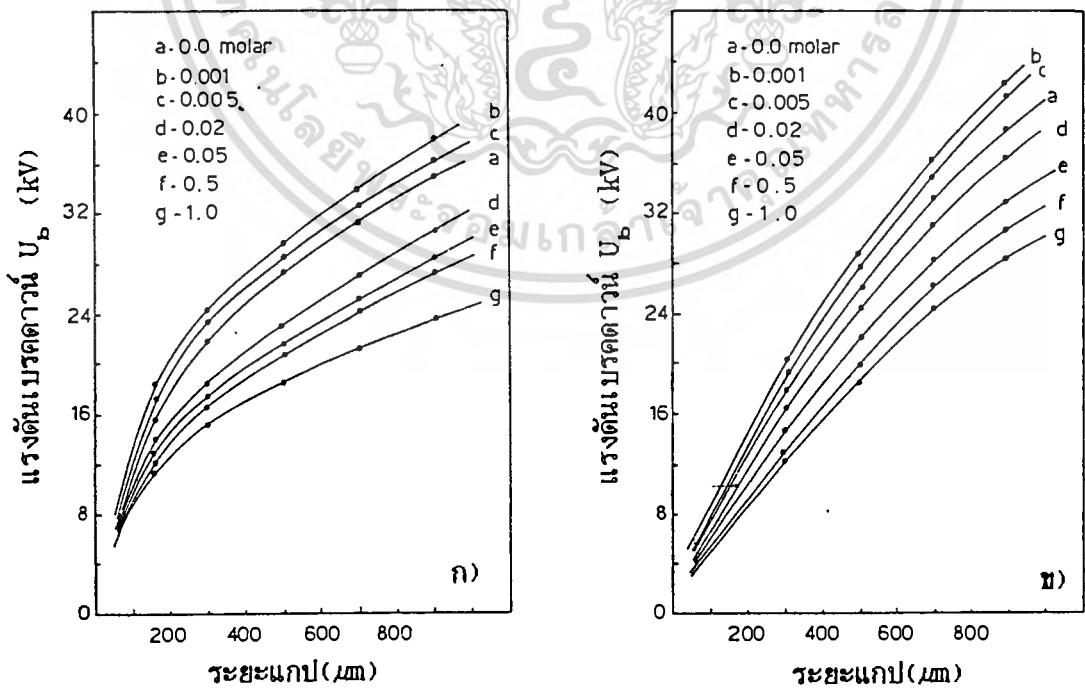
ฉนวนเหลวประกอบด้วยฟองอากาศจำนวนหนึ่งละลายอยู่ ซึ่งเกิดจากขบวนการที่ฉนวนเหลวมีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดของอุณหภูมิ ความดัน สาเหตุที่เกิดฟองอากาศมีดังนี้ จากขบวนการปรับตัวของพื้นผิวอิเล็กโตรด การผลึกตัวซึ่งกันและกันของประจุค้าง อาจจะมีมากพอที่จะเอาชนะแรงตึงผิวของฉนวนเหลว การชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับโมเลกุล การระเหยของฉนวนเหลวถ้าสนามไฟฟ้ามีความเครียดสูงหรือโคโรน่าที่สชาร์จที่อิเล็กโตรดในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ เมื่อมีฟองอากาศเกิดขึ้น และอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าที่มีความเครียดสูง มันจะถูกยัดออกตามทิศของสนามไฟฟ้า และเป็นสาเหตุให้เกิดการเบรคดาวน์ในที่สุด ซึ่งอธิบายด้วยกลไกการเบรคดาวน์แบบฟองอากาศ[14]

4.17 สารละลายและออกซิเจน

สารละลายถูกนำมาผสมกับฉนวนเหลวเพื่อปรับปรุงคุณภาพของฉนวนเหลวให้มีคุณสมบัติมากขึ้น สารละลายที่นำมาผสมนี้อาจจะทำให้ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าลดลงหรือเพิ่มขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอัตราส่วนที่ผสมโดยน้ำหนักและระยะแกป[12] ดังรูปที่ 4.17.1 และ 4.17.2



รูปที่ 4.17.1 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ในเทอมระยะแกป โดยผสมสาร 1-methylnaphthalene อิเล็กโตรดทรงกลม ทำจากอลูมินัม ก) และเหล็กเสตนเลส ข) [12]



รูปที่ 4.17.2 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ในเทอมระยะแกป โดยผสมสาร 1-methylnaphthalene

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ออกจำหน่าย และออกขีเงิน อิเล็กโตรดทรงกลมทำจากอลูมินัม ก) และเหล็กเสตนเลส ข) [12] ราคา
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.18 แผ่นฉนวนบางกั้น

การนำแผ่นฉนวนบางๆมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันตลอดกันระหว่างอิเล็กโตรด โดยให้ฉนวนวางตั้งฉากกับแนวพื้นระนาบ มีผลให้ค่าแรงดันเบรคดาวน์สูงขึ้น การนำแผ่นฉนวนกันไม่มีผลต่อค่าส.ป.ส. แฟลคเตอร์สนามไฟฟ้าหรือไม่มีผลต่อความเข้มของสนามไฟฟ้าเริ่มต้น U_0 ในสมการที่ 3.11 การศึกษาผลของแผ่นฉนวนกันระหว่างอิเล็กโตรดในฉนวนเหลว [3, 17] พบว่าแรงดันเบรคดาวน์จะมีค่าสูงขึ้นและลดลงนั้นขึ้นอยู่กับตำแหน่งการวางแผ่นฉนวน

4.19 ประจุค้ำ (space charge)

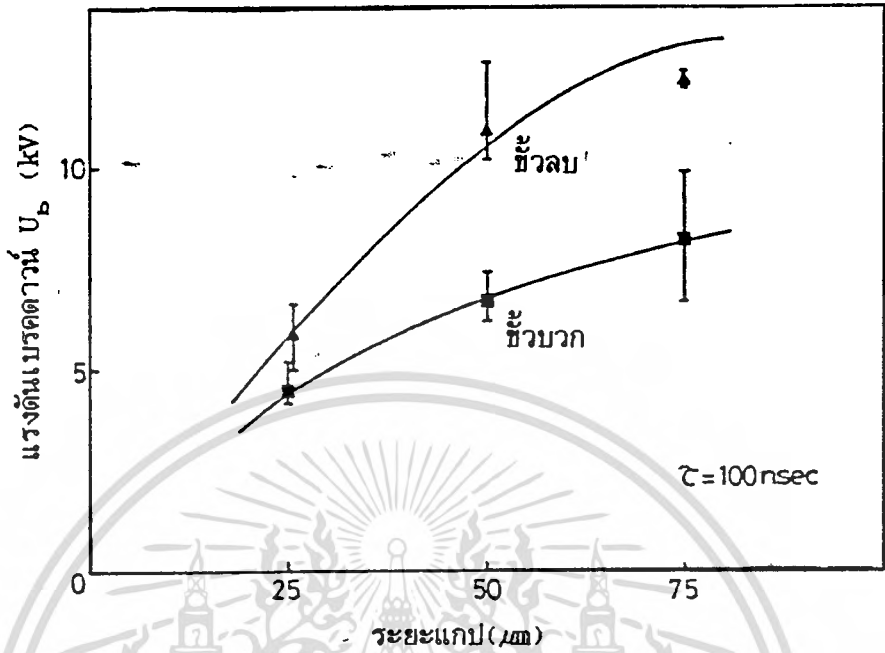
ประจุค้ำจะพบในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงๆ (อิเล็กโตรดแบบจุด-พื้นระนาบ) มีผลทำให้แรงดันเบรคดาวน์มีค่าสูงกว่าแรงดันโคโรนาในฉนวนเหลว และทำให้แรงดันเบรคดาวน์ช้าวกต่างกับขั้วลบ ในท้าย [4] แรงดันเบรคดาวน์ช้าวกมีค่าสูงกว่าช้าวก สำหรับการศึกษาค่าของประจุค้ำในฮีเลียมเหลว [3] ที่ระยะแก๊บน้อย (100 - 300 μm) จะไม่เกิดประจุค้ำมีผลให้เกิดการเบรคดาวน์โดยตรง (direct breakdown) และแรงดันเบรคดาวน์ช้าวกสูงกว่าขั้วลบ

4.20 ขั้วโมเลกุล (polarity effect)

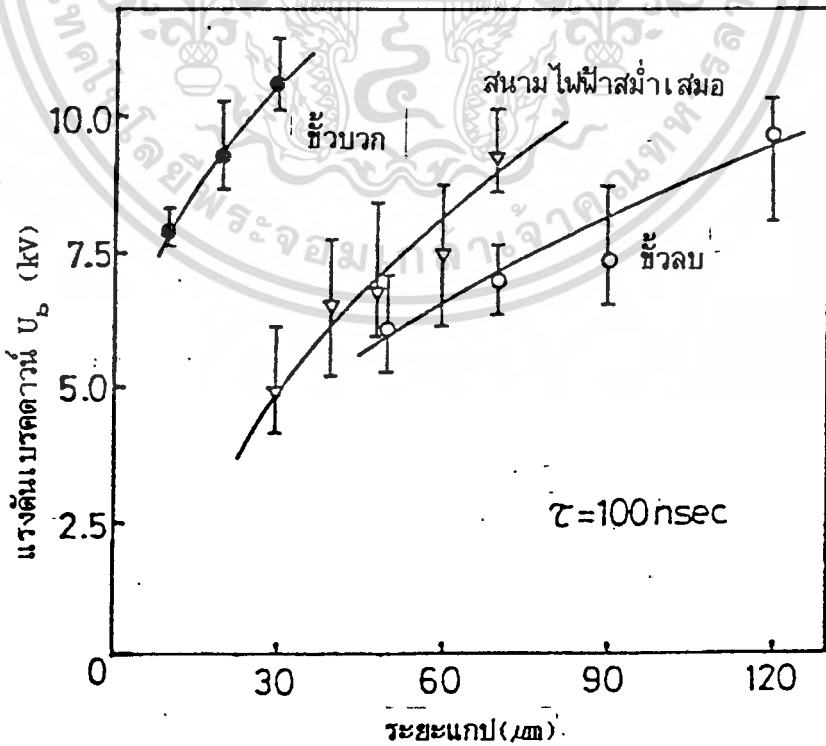
เนื่องจากฉนวนเหลวประเภทไฮโดรคาร์บอนประกอบด้วยโครงสร้างของโมเลกุลเป็นโซ่ยาว [10, 43, 45] ทำให้ภายในโมเลกุลมีขั้วไฟฟ้าปรากฏขึ้นขั้วไหนจะมีอำนาจเป็นขั้วบวกหรือขั้วลบขึ้นอยู่กับค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (electronegativity) ของอะตอมที่ประกอบในโมเลกุล การศึกษาของ Katsumi Yoshino [2, 4] บอกว่า " ขั้วโมเลกุลมีผลต่อแรงดันเบรคดาวน์ก็ต่อเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเท่านั้น " ในฉนวนเหลวประเภทไฮโดรคาร์บอนค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากปลายแหลมขั้วบวก (positive needle) จะมีค่าต่ำกว่าที่ได้จากปลายแหลมที่เป็นขั้วลบ (negative needle) ในรูปที่ 4.20.1 และ 4.20.2 แสดงขั้วโมเลกุลมีผลต่อแรงดันเบรคดาวน์ในไนโตรเจนเหลวและในฮีเลียมเหลว

เมื่อปลายแหลมถูกป้อนด้วยแรงดันลบ Katsumi Yoshino [4] อธิบายว่า " เมื่อความเครียดบริเวณปลายแหลมมีค่าสูงขึ้น ทำให้มีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนบริเวณนี้ มีผลให้สนามไฟฟ้าที่ปลายแหลมมีค่าลดลง ในขณะที่พฤติกรรมของสนามไฟฟ้าคล้ายกับสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

เอกส เนื่องจากมีการกระจายของไอออนลบและอิเล็กตรอนเท่านั้น ผลยับยั้งการเติบโตของกลุ่มประจุบวกไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20.1 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ในเทอมของระยะแกป ในไนโตรเจนเหลว[4]



รูปที่ 4.20.2 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ในเทอมของระยะแกป ในอีเลียมเหลว[4]

(positive streamer) ต้องเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้นเพื่อให้มีการสร้างกลุ่มของประจุบวกมากพอที่จะข้ามแก๊สและเกิดเบรคดาวน์ในที่สุด "

เมื่อปลายแหลมถูกป้อนด้วยแรงดันบวก เขาอธิบายว่า "เมื่อความเครียดของสนามไฟฟ้าบริเวณปลายแหลมสูงขึ้นมีการสร้างกลุ่มประจุบวกได้เร็วกว่าในกรณีของปลายแหลมที่ป้อนแรงดันลบ มีผลให้การเติบโตของกลุ่มประจุบวกรวดเร็วกว่า เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้พอเพียงสามารถเกิดเบรคดาวน์ได้ง่ายกว่า " ในกรณีของฮีเลียมเหลว เขาอธิบายว่า ปกติในฮีเลียมเหลวค่าโมบิลิตี้ (mobility value) ของกลุ่มไอออนบวกและไอออนลบ มีค่าน้อยกว่าของของเหลวชนิดอื่นๆ หรือไอออนบวกและไอออนลบเกิดได้ยากกว่า โดยที่กลุ่มของไอออนลบมีค่าน้อยกว่าไอออนบวก สามารถสร้างกลุ่มของประจุบวกได้เร็วกว่าในฉนวนเหลวชนิดอื่นๆ มีผลให้เกิดการเบรคดาวน์โดยตรงเหมือนในก๊าซ (ไม่มีประจุค้างที่ปลายแหลม) มีผลให้เบรคดาวน์ที่ขั้วบวกมีค่าสูงกว่า

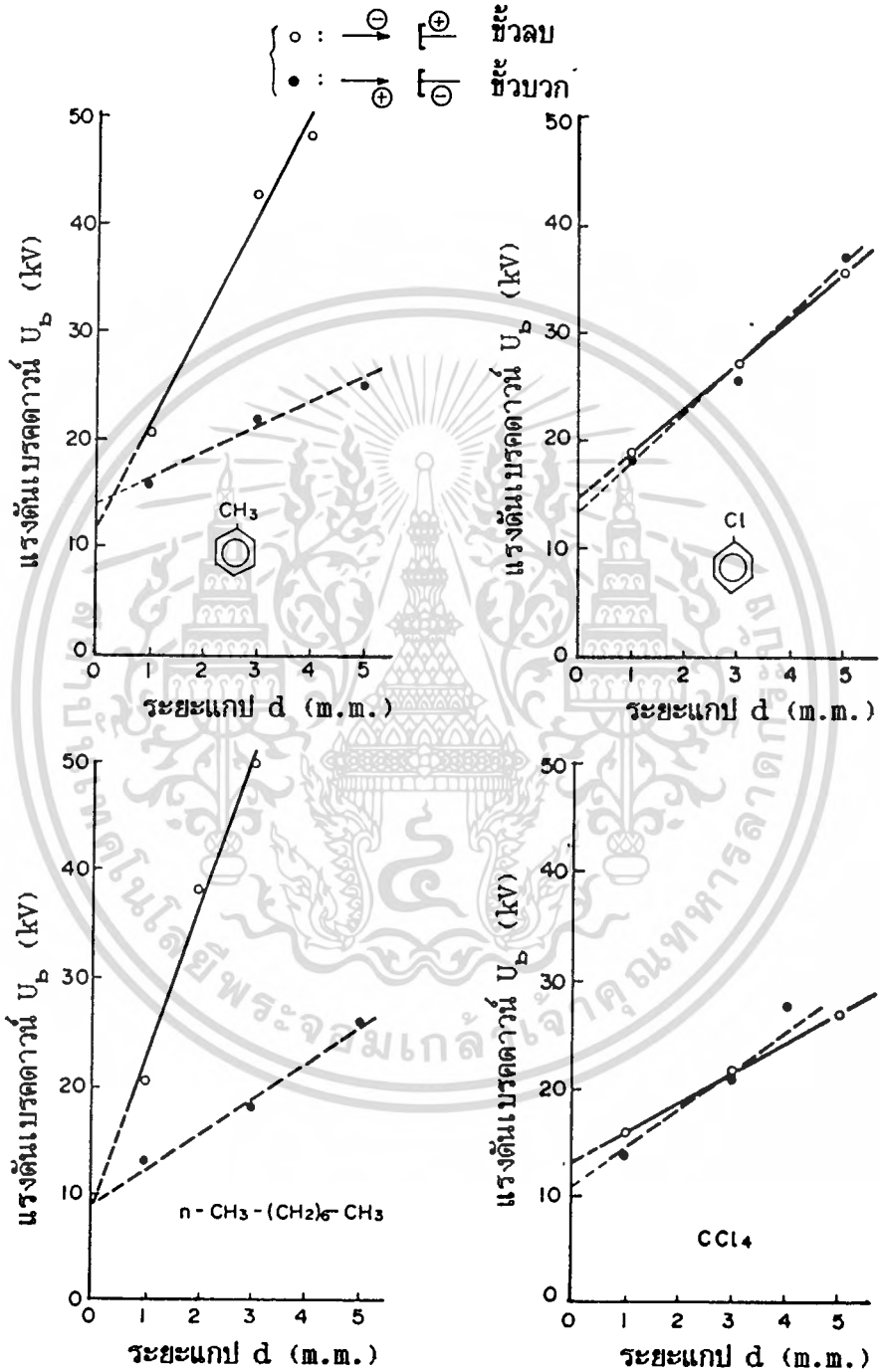
ขั้วโมเลกุลมีผลต่อแรงดันเบรคดาวน์ เป็นปรากฏการณ์ที่ฉนวนอยู่ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ เมื่ออิเล็กโตรดแบบปลายแหลมมีขั้วลบ จะเกิดอิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่ในฉนวนเหลวมีขบวนการอิเล็กตรอนอะแท็ชमें (electron attachment) และเป็นแบบต่อต้านการเกิดไอออนไนส์เซชัน (dissociative) ทำให้เกิดไอออนลบ และมีไอออนลบมากทำให้แรงดันขั้วลบมีค่าสูงกว่าขั้วบวก จากการศึกษาของ Yoshitaka Nitta และ Yoshinori Aihara [10] บอกว่า "โมเลกุลที่ประกอบด้วยกลุ่มของเมทิล (methyl group) จะให้ค่าของขั้วลบสูงกว่าขั้วบวก ถ้าโมเลกุลไม่มีขั้ว (non-polar) ค่าของขั้วลบและขั้วบวกใกล้เคียงกัน และอธิบายว่ากลุ่มของเมทิลเป็นตัวที่ทำให้เกิดประจุค้างในสนามไฟฟ้า โดยทำให้เกิดไอออนลบซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดประจุค้าง ดูรูปที่ 4.20.3

4.21 โครงสร้างโมเลกุล

ในตารางที่ 4.21 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ของสารอินทรีย์แบ่งได้เป็น 2 พวกคือพวกแรกโมเลกุลประกอบด้วยกลุ่มของเมทิลได้แก่ Toluene กับ n-Octane และอีกพวกหนึ่งเป็นโมเลกุลไม่มีกลุ่มเมทิลประกอบด้วย Chlorobenzene กับ Carbon-tetra-chloride

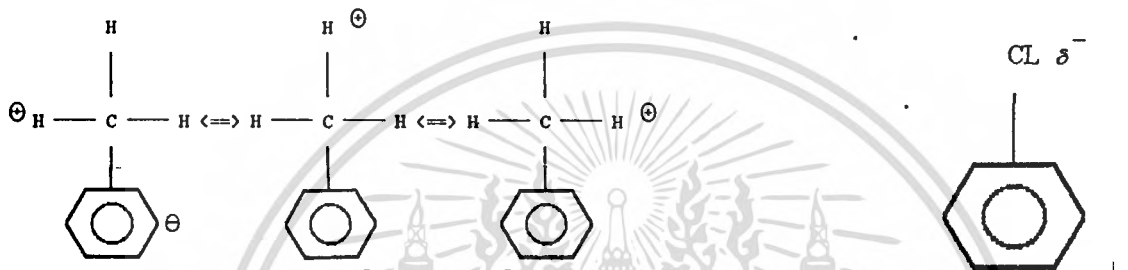
สำหรับโมเลกุลของ Toluene และ n-Octane มีกลุ่มของเมทิลในโครงสร้าง

โมเลกุลไฮโดรเจนเป็นส่วนประกอบในกลุ่มเมทิลเมื่ออยู่ใน Toluene จะมีค่าโพลาไรซ์เป็นบวก



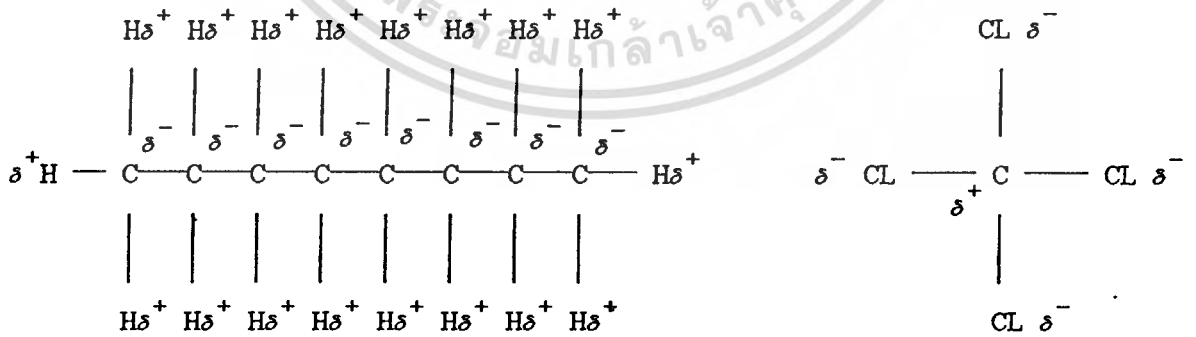
รูปที่ 4.20.3 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ในทอมของระยะแกป [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



hyperconjugation ของ Toluene

Chlorobenzene



n-Octane

Carbon-tetra-chloride

ตารางที่ 4.21 แสดงแรงดันเบรคดาวน์อิมพัลส์ในของเหลวไฮโดรคาร์บอน[10]

ของเหลว	ปลายแหลมชี้ลง ,kV , kV/mm			ปลายแหลมชี้บวก ,kV , kV/mm		
	d	B.D.V.	B.D.S.	d	B.D.V.	B.D.S.
Toluene	1	20.4	20.4	1	16.0	16.0
	3	42.3	14.1	3	21.8	7.3
	4	48.0	12.0	5	25.0	5.0
n-Octane	1	20.4	20.4	1	13.3	13.3
	2	38.3	19.1	2	18.4	6.1
	3	49.8	16.6	3	26.0	5.2
Chloro- benzene	1	18.8	18.8	1	18.3	18.3
	3	27.3	9.1	3	25.5	8.8
	5	35.5	7.1	5	37.0	7.4
Carbon- tetra- chloride	1	16.0	16.0	1	14.1	14.1
	3	21.8	7.3	3	21.0	7.0
	4	28.8	5.5	4	28.0	7.0

d คือระยะแกป (ม.ม.)

B.D.V. คือ 50% แรงดันเบรคดาวน์ของฉนวน(kV)

B.D.S. คือ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวน(kV/m.m.) ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(positively polarized) โดยการไฮเปอร์คอนจูเกชัน(hyperconjugation) ดังรูปที่ 4.21

ในโมเลกุลของ n-Octane ไม่มีไฮเปอร์คอนจูเกชัน แต่เกิดโพราไรซ์เป็นบวก โดยการเทียบค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี มีผลให้ไฮโดรเจนมีค่าโพราไรซ์เป็นบวก เมื่ออิเล็กตรอนอิสระ (free electron) บริเวณปลายแหลมวิ่งมาชนโมเลกุลบริเวณ + และ δ^+ เป็นเหตุให้เกิดไอออนบวกและไอออนลบจากขบวนการอะแท็ชमेंที่สามารถแบ่งออก 2 ชนิดคือ ขบวนการด้านการเกิดไอออนไนส์เซชัน(dissociative)ดังสมการ 4.21.1 และขบวนการเกิดคู่ของอิเล็กตรอน (ion pair) ดังสมการ 4.21.2



Yoshitaka Nitta และ Yoshinori Aihara [10] กล่าวว่า " ขบวนการต่อต้านการเกิดไอออนไนส์เซชัน มีโอกาสเกิดมากกว่าในโมเลกุลของสารอินทรีย์ และอธิบายว่าอิเล็กตรอน จะมาจับกับโมเลกุลในบริเวณที่เกิด + และ δ^+ ทำให้เกิดไอออนลบดังสมการที่ 4.21.1 และมีผลให้เกิดประจุค้างในสนามไฟฟ้าในที่สุด "

4.22 สรุป

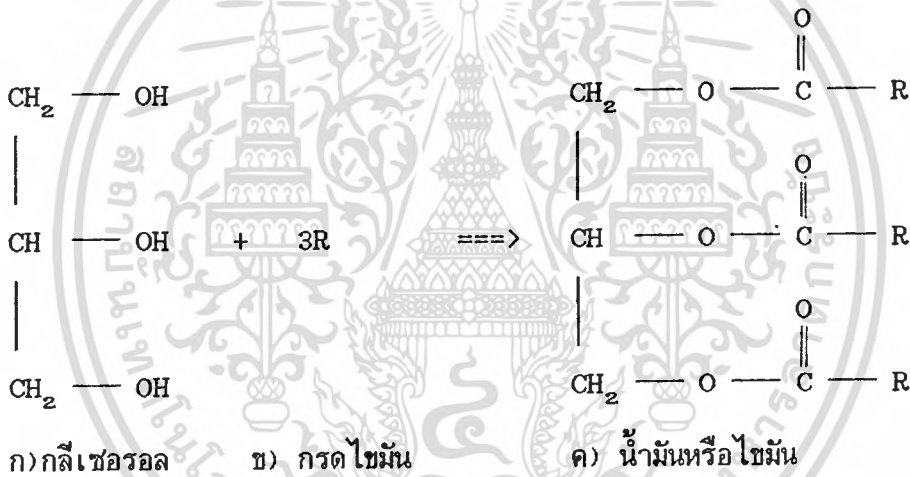
จากการศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อแรงดันเบรกดาวนีในฉนวนเหลวพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อแรงดันเบรกดาวนีมากกว่าในก๊าซและของแข็ง และปัจจัยที่มีผลมากได้แก่ ความชื้น ระยะกัปฟองอากาศ สิ่งเจือปนที่เป็นของแข็ง โครงสร้างของโมเลกุล อิเล็กโตรดโคตติง แผ่นฉนวนกันในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ประจุค้าง และที่มีผลน้อย(มีผลมากในด้านเคมี) ได้แก่ อุณหภูมิ สารละลาย และออกซิเจนที่ปะปน เมื่อรู้ปัจจัยต่างๆแล้ว สามารถนำไปออกแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่มีน้ำมันเป็นฉนวนไฟฟ้า

บทที่ 5

โครงสร้างโมเลกุลของน้ำมันพืช

5.1 บทนำ

น้ำมันพืชที่นำมาเป็นตัวอย่างศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นน้ำมันไฮโดรคาร์บอนที่สกัดมาจากพืชที่เป็นผลผลิตภายในประเทศคือ ถั่วเหลือง รำข้าว และปาล์ม ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างพื้นฐาน 2 ชนิดคือเอสเทอร์ของสารคาร์บอกซิลิกที่เป็นโซ่ยาวหรือกรดไขมัน(fatty acid) กับ กลีเซอรอล(1,2,3-Trihydroxypropene) ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงองค์ประกอบขั้นพื้นฐานในโมเลกุลของน้ำมันพืช

น้ำมันที่สกัดได้จากพืชจะแตกต่างกันไปตามองค์ประกอบของกรดไขมัน(R) ในโมเลกุล และกรดไขมันที่เป็นส่วนประกอบก็มีคาร์บอนตั้งแต่ 12 ถึง 26 ตัว คาร์บอนที่ประกอบในกรดไขมันจะเป็นเลขคู่เสมอเนื่องจากกรดไขมันเกิดจากการรวมตัวของคาร์บอนที่ละ 2 อะตอมในโมเลกุลของกรดอะซิติก กรดไขมันนี้เป็นสาเหตุให้น้ำมันมีเสถียรภาพต่ำหรือสูง ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของกรดไขมันว่าเป็นประเภทอิ่มตัวหรือไม่อิ่มตัว (มีพันธะคู่ในโมเลกุล) พันธะคู่ในโมเลกุลเป็นต้นเหตุให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน มีผลให้น้ำมันเหม็นกลิ่นหืน(rancidity) ในปัจจุบันการสกัดน้ำมันพืช

ใช้เทคโนโลยีขั้นสูง สามารถควบคุมปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ อายุการใช้งานจึงยาวนานโดยปราศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า จากกลิ่นหืน ไม้ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 องค์ประกอบของน้ำมันพืช

ชนิดของน้ำมันพืชได้จากการสกัดพืช แตกต่างกันไปตามส่วนประกอบของกรดไขมันที่มีอยู่ในพืชนั้นๆ ทำให้คุณสมบัติของน้ำมันพืชที่ได้ต่างกัน สำหรับกรดไขมันพื้นฐานที่มีอยู่ทั่วไปแสดงในตารางที่ 5.2.1 และสูตรโครงสร้างของกรดไขมันแสดงในตารางที่ 5.2.2

ตารางที่ 5.2.1 แสดงปริมาณกรดไขมันในน้ำมันพืช

น้ำมัน	ปริมาณกรดไขมัน %					
	ลิโนเลอิก	โอเลอิก	ไลโนเลนิก	สเตียริก	ไมริสตริก	ปาล์มิติก
ถั่วเหลือง	50-58	20-30	5-10	2-4	1-2	6-10
รำข้าว	34.6	47.6	0.8	← 17.6 →		
ปาล์ม	2-11	40-52	-	1-6	1-6	32-47

ตารางที่ 5.2.2 แสดงสูตรโครงสร้างของกรดไขมันในน้ำมันพืช

ชนิดกรดไขมัน	สูตรโครงสร้างโมเลกุล
1 ไมริสตริก	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COOH}$
2 ปาล์มิติก	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$
3 สเตียริก	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$
4 โอเลอิก	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$
5 ลิโนเลอิก	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$
6 ไลโนเลนิก	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$

5.3 การเปรียบเทียบโครงสร้างโมเลกุลของจำนวนเหลวกับน้ำมันพืช

ในการพัฒนาคุณสมบัติของจำนวนเหลวสำหรับใช้เป็นจำนวนเหลวในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ต้องศึกษาโครงสร้างขั้นพื้นฐานโมเลกุลของจำนวนเหลว เปรียบเทียบกับโครงสร้างโมเลกุลของจำนวนเหลวที่นิยมใช้ในปัจจุบันเช่น น้ำมันแร่ โพลีบิวเทน ไฮโดรคาร์บอนเหลวพวกแอฟทาลีน พาราฟิน เป็นต้น

5.3.1 ไฮโดรคาร์บอนเหลวจำพวกแอฟทาลีน

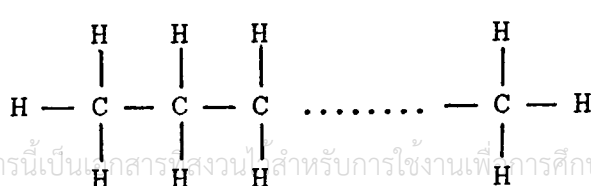
ไฮโดรคาร์บอนเหลวจำพวกแอฟทาลีน กลั่นมาจากน้ำมันปิโตรเลียม ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจนต่อกันเป็นโซ่วงกลมที่เรียกว่า ไฮคลิกไฮโดรคาร์บอน (cyclic hydrocarbon) มีคุณสมบัติในการต่อต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน เนื่องจากไม่มีพันธะคู่ในโมเลกุลดังรูปที่ 5.3.1 ในจำนวนน้ำมันที่ใช้ในปัจจุบัน (ประเทศในค่ายตะวันออก) มีไฮโดรคาร์บอนเหลวจำพวกแอฟทาลีน ประมาณ 70 - 80 %



รูปที่ 5.3.1 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของจำนวนไฮโดรคาร์บอนเหลวจำพวกแอฟทาลีน[2]

5.3.2 ไฮโดรคาร์บอนเหลวจำพวกพาราฟิน

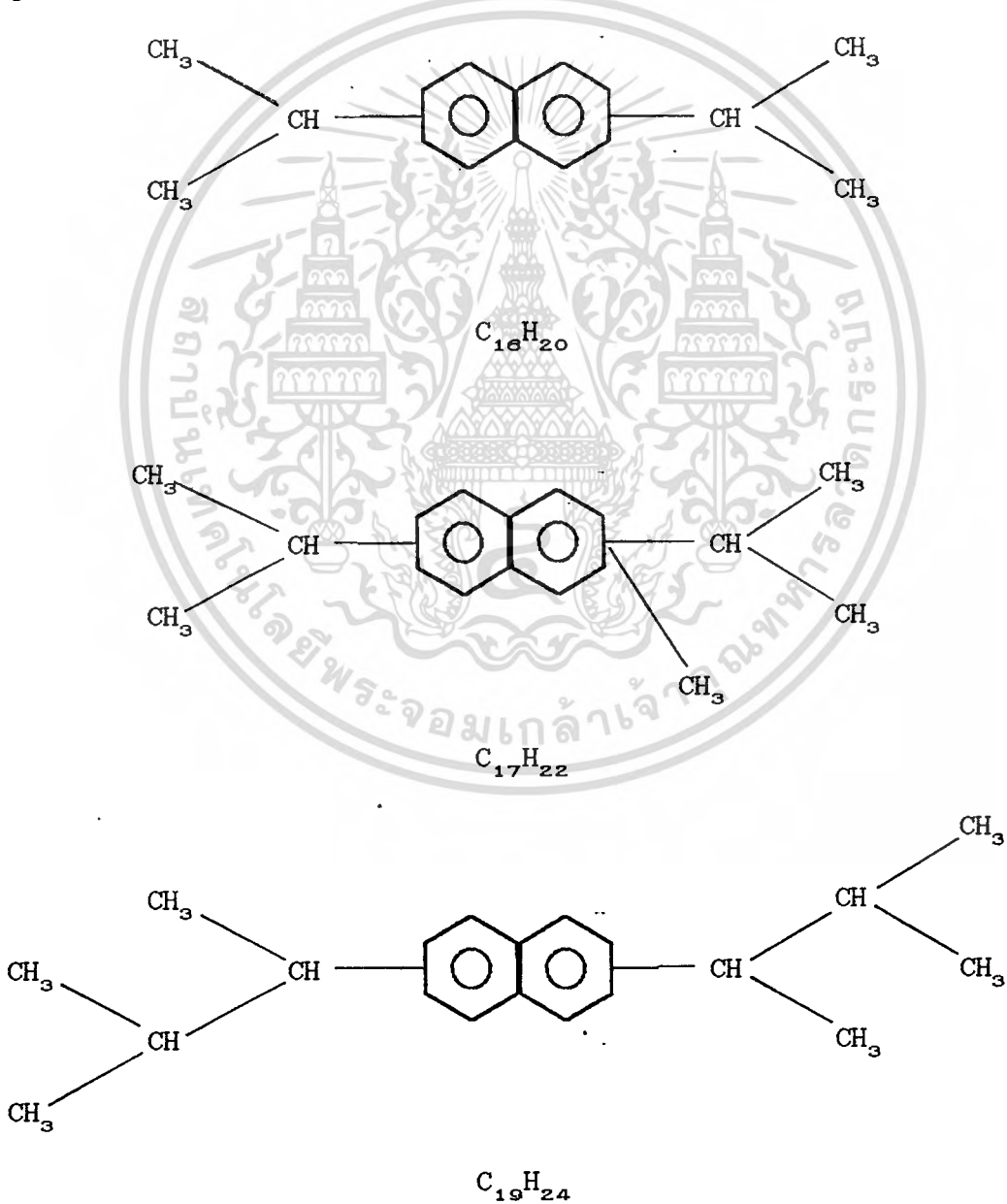
ไฮโดรคาร์บอนเหลวจำพวกพาราฟิน ประกอบด้วยอะตอมคาร์บอนและไฮโดรเจนเรียงต่อกันและมีโครงสร้างเป็นอนุกรมยาว(chain series structure) มีคุณสมบัติในการต่อต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันมากกว่าแอฟทาลีน มีโครงสร้างที่เสถียรภาพทางด้านเคมี ดังรูปที่ 5.3.2



รูปที่ 5.3.2 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของจำนวนเหลวไฮโดรคาร์บอน

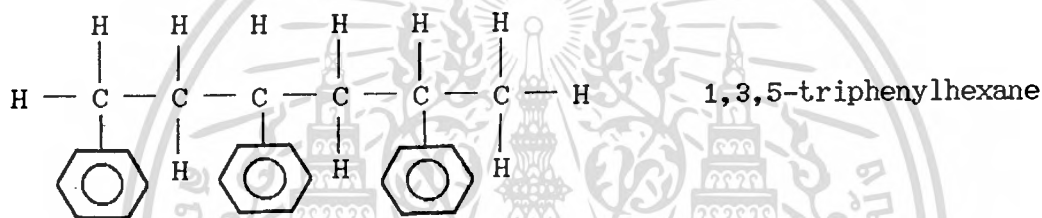
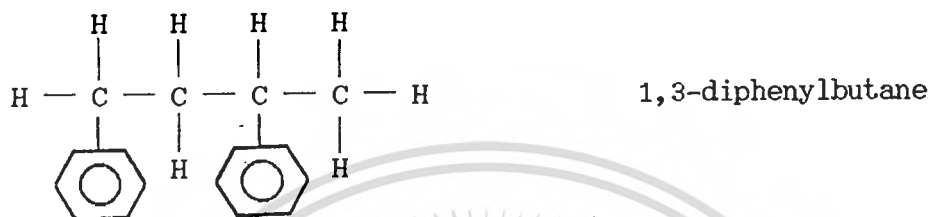
5.3.3 สารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวกอะโรมาติก

สารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวกอะโรมาติก ประกอบด้วยไซคลิกไฮโดรคาร์บอนหรือองค์ประกอบของเบนซีน มีอะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจน สารจำพวกนี้ต่อต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี เนื่องจากมีโมเลกุลของเบนซีนเป็นองค์ประกอบ ทำให้สารนี้เป็นตัวทำละลายที่ดี นิยมผสมสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวกอะโรมาติกประมาณ 10-12 % กับไฮโดรคาร์บอนชนิดอื่นๆ ในรูปที่ 5.3.3 เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวกอะโรมาติก ที่นิยมผสมในฉนวนเหลว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่รูปที่ 5.3.3 ก) แสดงโครงสร้างของโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวกอะโรมาติก

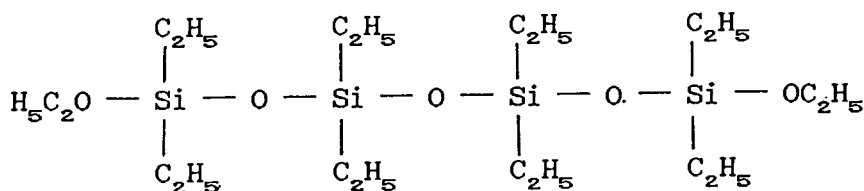
นอกจากนี้ ยังมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวกอะโรมาติก 2 ตัวที่มีคุณสมบัติต่อต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน มีจุดวาบไฟ(flash point) ประมาณ 300-500 °C นิยมใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าได้แก่ 1,3-diphenylbutane และ 1,3,5-triphenylhexane ดังรูป 5.3.3 ข)



รูปที่ 5.3.3 ข) แสดงโครงสร้างของโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวกอะโรมาติก

5.3.4 น้ำมันซิลิโคน

น้ำมันซิลิโคน(polyethyl-silicone liquids ,PES) เป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ประกอบด้วยอะตอมของ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และซิลิโคน การเรียงตัวของโมเลกุลเป็นเส้นตรงไม่มีพันธะคู่ ด้านทานการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีที่สุด สามารถทนความร้อนได้สูงและนาน มีโครงสร้างดังรูปที่ 5.3.4

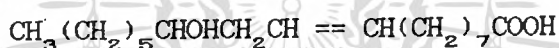


5.3.5 สารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวกคลอรีนเนต

สารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวกคลอรีนเนตใช้เป็นฉนวนไฟฟ้ามีหลายตัว ได้มาจากน้ำมันปิโตรเลียม(พวก diphenyl, $H_5C_6 - H_5C_6$) ผสมคลอรีนในอัตราส่วนที่พอเหมาะจะได้สารประกอบใหม่ มีสูตรโมเลกุลคือ $Cl_3H_2C_6 - C_6H_3Cl_2$ หรือ $C_6H_3Cl_3$

5.3.6 น้ำมันคาสเตอร์(castor oil)

น้ำมันคาสเตอร์ เป็นน้ำมันที่ได้จากพืช มีโครงสร้างเหมือนน้ำมันที่ใช้ทดสอบ ประกอบด้วยเซอรอลและกรดไขมัน ดังรูปที่ 5.3.6 นิยมใช้ร่วมกับกระดาษฉนวนในคาปาซิเตอร์



รูปที่ 5.3.6 แสดงโครงสร้างกรดไขมันที่ประกอบในโมเลกุลของน้ำมันคาสเตอร์[51]

5.4 สรุป

จากการพิจารณาโครงสร้างของฉนวนเหลวไฟฟ้าไม่ปรากฏพันธะคู่ในโมเลกุลฉนวนเหลว เนื่องจากพันธะคู่ในโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอน สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่าย เป็นต้นเหตุให้ฉนวนเหลวเสื่อมสภาพ และมีอายุการใช้งานน้อยลง เมื่อเปรียบเทียบกับโมเลกุลน้ำมันพืช ซึ่งเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่เหมือนกัน นอกจากนี้ น้ำมันพืชมีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย ดังนั้นในการพัฒนาน้ำมันพืชมาใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้า ต้องหาวิธีในการกำจัดพันธะคู่ในโมเลกุลของกรดไขมัน

บทที่ 6

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

6.1 บทนำ

การวัดแรงดันเบรคดาวน์หรือ U_p ของฉนวนเหลวไฮโดรคาร์บอน ที่ใช้เป็นฉนวนไฟฟ้า มีมาตรฐานในการวัดหลายมาตรฐานเช่น IEC Publ. 156 , ASTM D877-84a BS-148 , JIS C 2320 และ IEEE STANDARD TECHNIQUE FOR HIGH-VOLTAGE TESTING เป็นต้น มาตรฐานต่างๆ มีวิธีการทดลองและข้อกำหนดที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นอุปกรณ์และวิธีการทดลอง จะมีผลต่อแรงดันเบรคดาวน์ในฉนวนเหลว[50] เพื่อให้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีมาตรฐานที่แน่นอนสามารถใช้เปรียบเทียบกับข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ เราจึงเลือกมาตรฐาน IEC Publ.156 แต่เนื่องจากมาตรฐานนี้เป็นการวัดค่าแรงดันเบรคดาวน์ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับ เราต้องใช้ข้อจำกัดบางส่วนในการวัดค่าแรงดันเบรคดาวน์ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรงจากมาตรฐาน IEEE[57] นอกจากนี้ระบบอิเล็กทรอนิกส์ในการทดลองต้องใช้อิเล็กทรอนิกส์ที่มีลักษณะรูปทรงเรขาคณิตแตกต่างกันออกไป เราจึงใช้มาตรฐาน ASTM [54, 55] ในการออกแบบระบบอิเล็กทรอนิกส์ รายละเอียดอุปกรณ์การทดลองและวิธีการทดลอง จะได้กล่าวดังต่อไปนี้

6.2 ชุดอุปกรณ์การทดลอง

ในการทดลองทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง สิ่งที่ต้องคำนึงเป็นอันดับแรกคือ ความปลอดภัยของผู้ทดลอง นอกจากนี้ตำแหน่งการจัดวางของอุปกรณ์เป็นไปอย่างเหมาะสม สะดวก ถูกต้องหลักวิชาการ เพื่อให้ผู้ทดลองสังเกตปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้ชัดเจน ชุดอุปกรณ์ดังกล่าวแบ่งออกเป็น 4 ส่วนดังต่อไปนี้

- 1 ชุดแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง(D.C.high voltage generator)

ดังแสดงในรูปที่ 6.2.1

- 2 ชุดหน่วยควบคุมแรงดัน(voltage control unit) ดังแสดงในรูปที่ 6.2.2

- 3 ชุดภาชนะทดสอบ(test cell)

- 4 ชุดอุปกรณ์เครื่องมือวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.1 แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

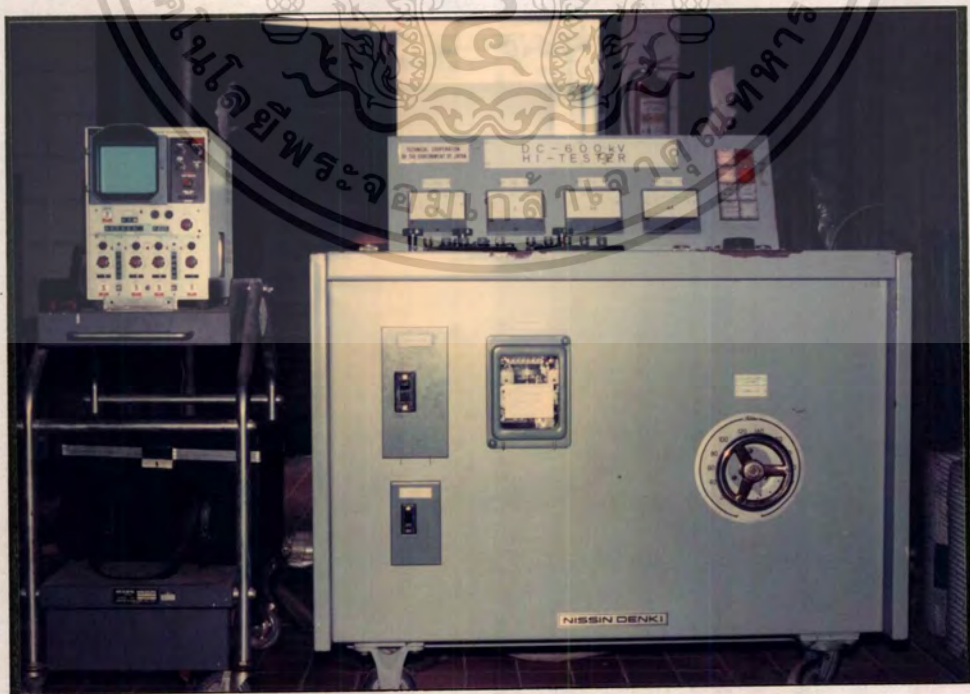
แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้เป็นของบริษัท นิลิน อีเล็คตริกซ์ จำกัด มีพิกัดทางด้านอินพุท 1-๘ , 50HZ , 220V , 12kVA ทางด้านเอาต์พุทเป็น - 600kV , 10 mA , 30 minutes โดยมีวงจรการทำงานแบบโวลต์เตจดับเบิลเซอร์(voltage double circuit) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ภายในอาคาร(indoor) ใช้น้ำมันเป็นฉนวนและเป็นตัวระบายความร้อนเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่กำเนิดออกมามีขั้วเป็นลบเมื่อเทียบกับดิน ดังนั้นสายส่งไฟฟ้าแรงสูงจากตัวกำเนิดแรงดันไฟฟ้าจึงต่อเข้ากับขั้วคาโธด และขั้วแอโนดถูกต่อลงดิน สายส่งไฟฟ้าแรงสูงถูกห่อหุ้มด้วยปลอกอลูมิเนียมเพื่อเพิ่มพื้นที่หน้าตัดช่วยลดความต่างศักย์บนพื้นผิวของสายส่ง ช่วยลดปรากฏการณ์โคโรนาในระบบ ดังแสดงในรูปที่ 6.2.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 6.2.1 แสดงแผนภาพของแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงพิกัด - 600kV

6.2.2 หน่วยควบคุมแรงดันไฟฟ้า

ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้า หน่วยควบคุมได้ถูกแยกออกจากแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้า กระแสตรง ซึ่งเป็นส่วนที่อันตรายอยู่คนละห้อง ทำให้เกิดความปลอดภัยแก่ผู้ทดลอง เป็นอุปกรณ์ ควบคุมการทำงานที่ใช้ภายในอาคารโดยมีไฟเข้าและไฟออกเป็น 1 ϕ , 50 Hz , 220V ประกอบ ไปด้วยอุปกรณ์ต่างๆดังนี้ AC voltmeter พิกัด 0-300 V class 2.5 สำหรับคูไฟเข้าและจ่าย ไปยังเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูง AC ammeter พิกัด 0-50 A class 1.5 สำหรับดูกระแสเข้า ตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูง DC voltmeter พิกัด 0-600 kV class 1.5 สำหรับดูแรงดัน ไฟฟ้าแรงสูงที่ออกมาจากตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูง DC ammeter พิกัด 0-10 mA class 1.5 สำหรับดูกระแสที่ไหลของตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง นอกจากนี้บนแผงควบคุมยังประกอบ ไปด้วยอุปกรณ์ที่ขึ้นสภาวะที่กำลั้งใช้งาน เช่น อุปกรณ์ตัดต่อระบบไฟฟ้า และอุปกรณ์ป้องกันความ ปลอดภัยในการใช้งาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเอาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 6.2.2 หน่วยควบคุมแรงดันไฟฟ้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.3 ชุดภาชนะทดสอบ

ในการเลือกวัสดุเพื่อออกแบบตามข้อกำหนดในมาตรฐาน IEC Publ.156 เกี่ยวกับชุดภาชนะทดสอบ ผู้ออกแบบได้คำนึงถึงความเหมาะสม สะดวกและง่ายต่อการทำความสะอาด นอกจากนี้ต้องคำนึงถึงความประหยัด ในการทดลองนี้ตัวภาชนะประกอบจากอะคริลิก(acrylic) เป็นสารในจำพวกพลาสติก แข็งแรง ทนต่อแรงดันและอุณหภูมิได้สูง ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำมันทดสอบ ส่วนตัวอะคริลิกมีลักษณะโปร่งใสเหมือนแก้ว สามารถมองเห็นปรากฏการณ์ของการเบรคดาวนี้ได้ดี ภายในภาชนะประกอบด้วยแกนทองเหลืองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นขั้วต่อสายส่งไฟฟ้าแรงสูงมีปลอกฉนวนหุ้ม(high voltage bushing) ทำจากโพลีเมอร์ประเภทพีวีซี ทำหน้าที่เพิ่มความต้านทานที่ขั้วไฟฟ้า ป้องกันกระแสรั่วและลดผลของปรากฏการณ์โคโรน่า ส่วนที่สองเป็นส่วนที่ต่อลงดินจึงกลึงเป็นเกลียวมีลักษณะคล้ายกับส่วนแรกแต่ปลอกฉนวนสั้นกว่าและแกนทองเหลืองสามารถเลื่อนเข้าและออกได้ เพื่อการปรับระยะแยกได้ในช่วง 0.1 - 25 มม. จากการทดสอบวัดค่าแรงดันเบรคดาวสามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้ 125 kV โดยไม่มีการแตกฉนวน ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ทดสอบไม่เกิน 110 kV

6.2.4 ชุดอุปกรณ์เครื่องมือวัด

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดมีความละเอียดสูงมาก เครื่องมือวัดประกอบด้วย ซิงค์โคสโคป (synchroscope) เครื่องมือวัดความดันบรรยากาศ (barometer) เครื่องมือวัดความชื้น (hygrometer) เครื่องมือวัดอุณหภูมิ (termometer) และเครื่องมือวัดระยะแยก(dialling micrometer)

6.2.5 การวัดระยะแยก

การวัดระยะแยกสามารถวัดจากภายนอกภาชนะทดสอบด้วยไดอัลลิ่งไมโครมิเตอร์ วัดได้ในช่วง 0.01 - 30 มม. มีความแม่นยำประมาณ 0.01 มม. โดยให้แกนเลื่อนของเครื่องมือวัดสัมผัสกับปลายของแกนทองเหลืองทำหน้าที่ยึดอิเล็กโตรดด้านที่ต่อลงดินตลอดเวลา ด้วยแรงดันจากสปริงในเครื่องมือวัด แกนเลื่อนดังกล่าวติดอยู่กับเข็มบนหน้าปัดโดยตรง ผ่านกลไกทางแมคคานิกของเครื่องมือวัด ทำให้เข็มหมุนตามระยะแยกที่เลื่อน ในการวัดกระทำได้โดยการทำให้ผิวเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวงไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นองขาดหน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าของอิเล็กทรอนิกส์ทั้งสองติดกันจากนั้นก็หมุนแกนอิเล็กทรอนิกส์โตรดด้านต่อลงดิน ไปตามระยะที่ต้องการไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นที่มีเหตุขัดแย้งเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3 ระบบอิเล็กทรอนิกส์

อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการทดลองนี้ประกอบไปด้วยอิเล็กทรอนิกส์ที่มีรูปทรงเรขาคณิตที่แตกต่างกันออกไป มีแบบทรงกลม(sphere) แบบจุด(point) แบบจานกลม(disk) แบบแผ่นขนาน(pararall plane) แบบใหม่(new class for uniform field) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

6.3.1 อิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลม

ตามมาตรฐาน IEC Publ.156 กำหนดอิเล็กทรอนิกส์ทรงกลมทั้งสองอันมีลักษณะทรงกลมผิวเรียบทำด้วยทองเหลือง ทองแดง หรือเหล็กสเตนเลส มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 13 มม.

6.3.2 อิเล็กทรอนิกส์แบบจุด

กำหนดตามมาตรฐาน ASTM D-3300-85[54] กำหนดอิเล็กทรอนิกส์แบบจุดมีขนาดบริเวณปลายสุดกว้าง $0.06 \text{ mm} \pm 20\%$

6.3.3 อิเล็กทรอนิกส์แบบจานกลม

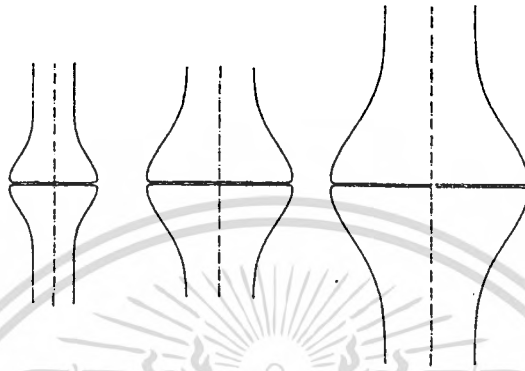
กำหนดตามมาตรฐาน ASTM D-877-84a[55] กำหนดให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางจานกลม 25 มม. หรือ 1 นิ้ว มีความหนาน้อยกว่า 3 มม. หรือ 1/8 นิ้ว และบริเวณขอบเป็นเหลี่ยมและทำจากทองเหลือง

6.3.4 อิเล็กทรอนิกส์แบบพื้นระนาบ

กำหนดลักษณะเป็นแบบโรโกสกี (Rogowski style) กำหนดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 25 มม.[9]

6.3.5 อิเล็กทรอนิกส์แบบใหม่

แนวความคิดในการสร้างอิเล็กทรอนิกส์แบบนี้ได้มาจาก ความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าบริเวณระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ถูกเสนอโดย P.Girdinig , G.Liberti , P.Molinari และ A. Vividni[24] จากการทดลองจำลองหาสนามไฟฟ้าด้วยคอมพิวเตอร์ อิเล็กทรอนิกส์นี้จะให้ความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าดีกว่าอิเล็กทรอนิกส์ชนิดอื่นๆ ดังในรูปที่ 6.3.5 แสดงแผนภาพของอิเล็กทรอนิกส์แบบใหม่



รูปที่ 6.3.5 แสดงแผนภาพของอิลีค ไตรดแบบใหม่

6.4 วิธีการทดลอง

ในการวัดแรงดันเบรคดาวน์หรือความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลว มีการคาดเคลื่อนอย่างมากต่อสิ่งแปลกปลอม[C1, 50, 58] ซึ่งมีโอกาสเกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นในขั้นตอนนี้ควรคำนึงถึงความสะดวก กระทำทุกขั้นตอนด้วยความระมัดระวังเพื่อลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในขณะทดลอง สามารถแยกขั้นตอนและเทคนิคในการทดลองดังต่อไปนี้

6.4.1 การเตรียมชุดภาชนะทดสอบ

เมื่อเราสร้างชุดภาชนะทดสอบแล้วควรตรวจสอบรอยรั่วซึม ซึ่งต้องระวังมากเนื่องจากในขณะเบรคดาวน์ของฉนวนเหลวจะมีความเครียดเนื่องจากสนามไฟฟ้า และความดันภายในภาชนะจะสูงน้ำมันจะไหลซึมออกมาเมื่อแน่ใจว่าไม่พรอยรั่วซึม ควรล้างและทำความสะอาดโดยใช้เบนซินและเฮกเซนเนื่องจากเป็นตัวทำละลายที่ดี และนำภาชนะไปตากแดดเพื่อกำจัดความชื้น ถ้าไม่ได้ใช้ชุดภาชนะทดสอบควรบรรจุน้ำมันเบนซินให้เต็ม นอกจากนี้ควรเก็บไว้ในที่ปราศจากฝุ่นละออง

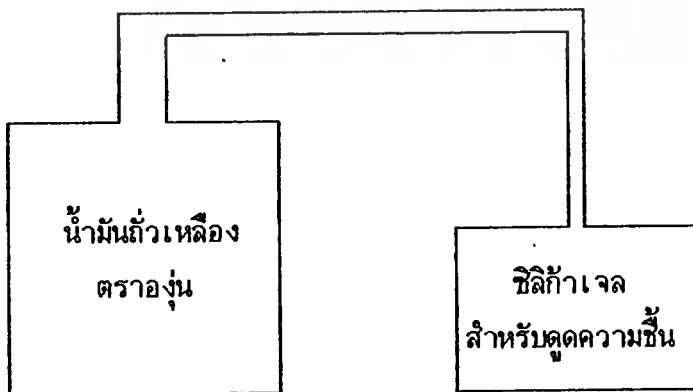
6.4.2 การเตรียมน้ำมัน

น้ำมันทดสอบนำมาจากท้องตลาดที่บรรจุกวดยาย ไม่ควรรนำน้ำมันที่บรรจุถึงมากทดลอง เนื่องจากมีสารปนเปื้อนมากกว่า ทำการดูความชื้นด้วยเครื่องมือที่ำขึ้นดังรูปที่ 6.4.2 ทั้งไว้ 1 คิน ในการบรรจุน้ำมันลงในชุดภาชนะทดสอบ ควรทำอย่างช้าๆเพื่อลดฟองอากาศจากนั้นใช้แท่งแก้วคนน้ำมันให้ทั่วภาชนะ เมื่อได้ปริมาณตามที่ต้องการแล้วควรปิดภาชนะทดสอบทันที หลังจากนั้นทิ้งไว้ 1 - 2 ชั่วโมง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงน้ำมันใหม่ทุกครั้งต้องทำความสะอาดใหม่

6.4.3 การวัดแรงดันเบรคดาวน์ของฉนวนเหลว

เมื่อเตรียมชิ้นตอนข้างต้นเรียบร้อยแล้ว ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเข้าที่ขั้วอิเล็กโตรดทางด้านไฟฟ้าแรงสูง โดยปรับแรงดันไฟฟ้าด้วยอัตราเร็ว 2 kV/sec จากนั้นสังเกตเข็มของมิลลิแอมมิเตอร์จะไหลอย่างรวดเร็วและเข็มของโวลต์มิเตอร์จะตกลง ในขณะที่เกิดการสปาร์คครั้งแรกข้ามช่องว่าง ซึ่งเราถือว่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการสปาร์คครั้งแรกว่า แรงดันเบรคดาวน์ของฉนวนเหลว ทำการวัดแรงดันเบรคดาวน์ประมาณ 5-20 ครั้งในแต่ละจุด สำหรับเทคนิคในการทดลองควรป้อนแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดเพื่อให้น้ำมันปรับตัวประมาณ 5 นาที ณ ระดับแรงดัน 1 kV เพื่อกำจัดฟองอากาศก่อนการทดลอง (ดูภาคผนวก ก)

สายยาว



6.5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

เนื่องจากการทดลองแต่ละครั้งอาจมีข้อบกพร่อง เราสามารถลดข้อบกพร่องนี้โดยการทดลองหลายๆครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยไว้เป็นตัวแทนของข้อมูลชุดนั้น สำหรับการหาค่าเฉลี่ยในกลุ่มข้อมูลหาได้จาก

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

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

σ = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

μ = ค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด

μ_i = จำนวนแรงดันเบรคดาวครั้งที่ i

N = จำนวนข้อมูลทั้งหมด

ถ้าอัตราส่วนระหว่าง σ/μ_i มากกว่า 0.1 แสดงว่าในการทดลองจะมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจะมีค่ามาก ทำให้ผลการทดลองมีค่าความผิดพลาดมาก

6.6 สรุป

การทดลองวัดแรงดันเบรคดาวต้องคำนึงถึงความสะดวก ปราศจากฝุ่นละอองและสิ่งที่สำคัญมากคือการปรับอัตราแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นคงที่ตลอด ส่วนอุปกรณ์การทดลองและวิธีการทดลองพยายามให้มีข้อผิดพลาดน้อยที่สุดประมาณ 3.45% และเพื่อให้การทดลองตรวจสอบแรงดันไฟฟ้ามีมาตรฐานมากขึ้นและสามารถเปรียบเทียบผลการทดลองอื่นๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ให้นำน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์ มาทดลองเปรียบเทียบกับน้ำมันพืช

บทที่ 7

ผลการทดลองและวิจารณ์

7.1 บทนำ

ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อแรงดันไฟฟ้าเบรคดาวน์ในน้ำมันพืช โดยใช้น้ำมันพืชที่ขายในท้องตลาดภายใต้อุปกรณ์และวิธีการทดลองในบทที่ 5 โดยแยกการศึกษาออกตามปัจจัยต่างๆ ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ในบทที่ 1 ดังต่อไปนี้ การทดลองที่ 1 ศึกษาการปรับตัวของฉนวนเหลวและผลของสารที่ใช้ทำอิลีคโตรด การทดลองที่ 2 ศึกษาผลขนาดของพื้นที่ผิวของอิลีคโตรดโดยใช้อิลีคโตรดแบบจานกลม(disk-disk) การทดลองที่ 3 ศึกษาผลของรูปทรงเรขาคณิตของอิลีคโตรด โดยใช้อิลีคโตรดรูปทรงกลม(sphere-sphere) แบบจานกลม แบบจุด-พื้นระนาบ(point-plane) แบบพื้นระนาบ-แบบจุด(plane-point) แบบพื้นระนาบ(rogowski) แบบใหม่(new class)[24]ทรงกลม-พื้นระนาบ ทรงกระบอก-พื้นระนาบ การทดลองที่ 4 ศึกษาผลของระยะห่างระหว่างอิลีคโตรด โดยหาความสัมพันธ์จากกราฟ V-d การทดลองที่ 5 ศึกษาผลของแผ่นฉนวนกั้น(barrier effect) ระหว่างอิลีคโตรด โดยใช้อิลีคโตรดแบบจุด-พื้นระนาบ โดยนำแผ่นโพลีเอทิลีนและกระดาษฉนวนเป็นตัวฉนวนกั้น การทดลองที่ 6 ศึกษาผลของความถี่ โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความถี่เบรคดาวน์กับอุณหภูมิ การทดลองที่ 7 ศึกษาโครงสร้างโมเลกุลและชีวโมเลกุล การทดลองที่ 8 ศึกษาผลของประจุค้างในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ การทดลองใช้ชุดภาชนะทดสอบ 2 ตัวตามมาตรฐาน IEC Publ.156 ในแต่ละขั้นตอนได้ทำการวัดค่าแรงดันเบรคดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์ควบคู่ไปด้วย ทั้งนี้เพื่อแสดงให้เห็นว่าน้ำมันพืชมีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าใกล้เคียงกับน้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ในปัจจุบัน

จากการศึกษาเรื่องการเบรคดาวน์ในฉนวนน้ำมัน[38,48] พบว่าการที่จะทำให้ผิวของอิลีคโตรดมีความเรียบและสะอาดอยู่เสมอทำได้ยากมาก เนื่องจากการเกิดเบรคดาวน์แต่ละครั้งนั้นจะมีสิ่งสกปรกติดอยู่ที่ผิว ซึ่งสภาพผิวจะเกิดรูพรุน(spot) เขม่า ฟองอากาศ มีผลทำให้การเบรคดาวน์ครั้งต่อไปมีการกระจายมาก และในการทดลองหาค่าแรงดันเบรคดาวน์ต้องทำการทดลองในแต่ละจุดอย่างน้อย 20 ครั้ง ดังนั้นเพื่อให้ค่าแรงดันเบรคดาวน์ของฉนวนเหล่านี้อาศัยมาตรฐาน

เดียวกันทั้งหมด จึงได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของฉนวนเหลวภายใต้แรงดันกระแสตรง

7.2 การทดสอบเบื้องต้น

การทดสอบขั้นนี้เป็นการทดสอบความพร้อมของอุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง โดยมีจุดประสงค์ที่จะปรับชุดการทดลองโดยใช้น้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์ เพื่อให้เกิดความคุ้นเคย ความปลอดภัย เข้าใจธรรมชาติโดยทั่วไปของปรากฏการณ์ก่อนการเบรคดาวน์ ในขณะที่เกิดการเบรคดาวน์และหลังการเบรคดาวน์ในฉนวนเหลว ความถูกต้องของโวลต์มิเตอร์ การควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ ให้อยู่ในสภาพที่มีมาตรฐานต่อไป

7.2.1 ผลของอุปกรณ์ตัดตอนวงจรไฟฟ้า

หลังจากเติมน้ำมันที่ผ่านการดูดความชื้นในน้ำมันด้วยซิลิกา (silica gel) สามารถดูดความชื้นออกได้ระดับหนึ่ง ลงบรรจุในภาชนะทดสอบแล้วทิ้งไว้ 2 ช.ม. เพื่อให้ฟองอากาศที่เกิดขึ้นขณะบรรจุในภาชนะลดลง และเมื่อต่อชุดภาชนะทดสอบเข้ากับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยการป้อนแรงดันโดยให้มีค่าเพิ่มขึ้นจากศูนย์ด้วยความเร็ว 2 kV/sec สังเกตปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในชุดภาชนะทดสอบ จนกระทั่งมีการสปาร์คข้ามแกนเรา เรียกว่า โวลต์เตจที่ทำให้เกิดการสปาร์คข้ามแกนครั้งแรกว่า แรงดันเบรคดาวน์ จากนั้นให้ปรับโวลต์เตจลงมาที่ศูนย์เหมือนเดิม ในขณะที่เกิดเบรคดาวน์ครั้งแรกผู้ทดลองจะต้องอ่านค่า โวลต์เตจที่เกิดขึ้น การวัดค่าแรงดันเบรคดาวน์มีค่าแน่นอน อาจจะมีสิ่งเกิดเข็มของไมโครแอมมิเตอร์จะเบี่ยงเบนไปขณะเกิดสปาร์ค ในขณะที่เกิดการสปาร์ค ถ้าไม่ปรับโวลต์เตจลงมาที่ศูนย์ จะเกิดอะวาลานซ์ข้ามแกนทำให้กระแสไหลผ่านฉนวนเหลวมากอุปกรณ์ตัดตอนจะทำการตัดตอนวงจรไฟฟ้าออก จากนั้นอุปกรณ์ฉุกเฉินจะมีเสียงไซเรนเตือน

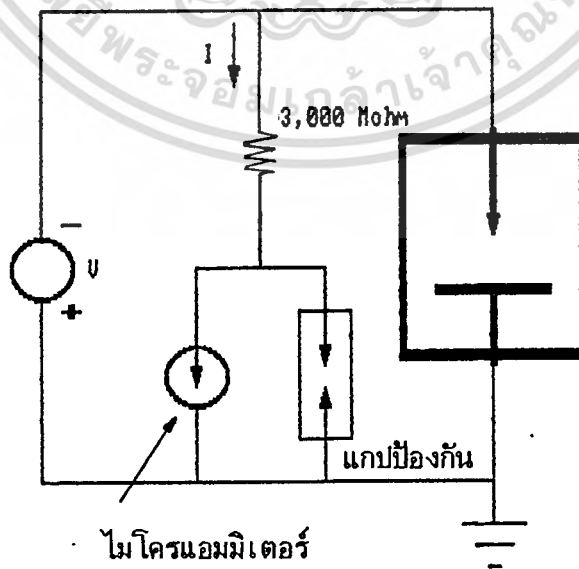
7.2.2 ผลของปรากฏการณ์โคโรน่า

เนื่องจากปรากฏการณ์โคโรน่าถูกพบบ่อยในการทดลองทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง [47] มีผลทำให้การวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเบรคดาวน์ผิดพลาดไปจากความเป็นจริง ทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่อมีปรากฏการณ์โคโรน่าเกิดขึ้น ทำให้กระแสเริ่มไหลในวงจรเป็นเหตุให้มีการก่อตัวของอะวาลานซ์เป็นไปก่อนกำหนด ทำให้เกิดการสปาร์คข้ามแกนได้เร็วขึ้น ดังนั้นแรงดันเบรคดาวน์จึงต่ำกว่าที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ควรจะเป็น ตำแหน่งที่พบมากที่สุดคือ รอยต่อระหว่างขั้วต่อสายไฟฟ้าแรงสูง (terminal) ของชุดอิเล็กทรอนิกส์

โตรดกับสายส่งไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง และพื้นที่ผิวรอบๆสายไฟฟ้า สามารถป้องกันได้โดยใช้ปลอกอลูมิเนียม(hollow cable) หุ้มเพื่อเพิ่มพื้นที่หน้าตัดสามารถลดแรงดันไฟฟ้าวิกฤติลง ทำให้ปรากฏการณ์โคโรน่าเกิดยากขึ้น การวัดแรงดันไฟฟ้าเบรคดาวน์จะมีค่าถูกต้องมากขึ้น

7.2.3 การวัดแรงดันสูง

ในการวัดแรงดันสูงหรือแรงดันตกคร่อมวัสดุทดสอบ สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงใช้วิธีวัดแบบอนุกรมระหว่างความต้านทานและไมโครแอมมิเตอร์(series resistance micrometer) โดยการต่อความต้านทานที่มีค่าสูงๆระดับ 3,000 M-ohm จากคู่มือของชุดการทดลองระบุว่าความต้านทานมีค่าความผิดพลาดประมาณ 1 % นำมาอนุกรมกับไมโครแอมมิเตอร์ดังรูปที่ 7.2.3 โดยมี I กระแสที่ไหลผ่านความต้านทาน R จะถูกวัดโดย moving coil ที่อยู่ในไมโครแอมมิเตอร์สามารถหาค่าของโวลต์เตจจาก $V = IR$ สำหรับโวลต์เตจที่เกิดขึ้นเนื่องจากความต้านทานภายในตัวไมโครแอมมิเตอร์มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความต้านทานจึงไม่นำส่วนนี้มาคิด และอุปกรณ์ป้องกันในกรณีเกิดแรงดันเกิน(over voltage) จะใช้ซีเนอร์ไดโอด การวัดแรงดันสูงด้วยวิธีนี้ จะให้ความละเอียดประมาณ 0.2 % ที่ระดับแรงดัน 500 kV



7.2.4 การวัดแรงดันสูงด้วยช่องว่างระหว่างทรงกลม

เนื่องจากในการทดลองนี้กระทำที่อุณหภูมิห้อง มีค่าประมาณ 27-31 องศาเซลเซียส จึงไม่สอดคล้องกับมาตรฐาน IEC Publ.156 ที่ต้องกระทำที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส 760 ม.ม.ปรอท จึงได้นำเอาวิธีการแบ่งเทียบโวลต์มิเตอร์ โดยใช้ช่องว่างระหว่างทรงกลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 250 ม.ม.มาตรวจสอบค่าความผิดพลาดของการวัดแรงดันเบรคดาวที่อ่านจากโวลต์มิเตอร์วิธีการทดลองได้นำมาตรฐาน IEC Publ.52 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตามมาตรฐาน IEC Publ.52 ได้กำหนดค่าแรงดันเบรคดาวของอากาศระหว่างทรงกลมไว้ในสภาวะมาตรฐานที่ 20 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ 760 ม.ม.ปรอท ถ้าวัดแรงดันเบรคดาวที่สภาวะอุณหภูมิและความดันบรรยากาศเท่าใด ต้องแปลงค่าที่วัดได้ให้เป็นค่าที่สภาวะมาตรฐานคือ $U_{bn} = U_b / K_d$ เมื่อ U_{bn} เป็นค่ามาตรฐาน U_b เป็นค่าที่วัดได้ที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ $/K_d$ เป็นค่าตัวประกอบแปรผันกับความหนาแน่นของอากาศซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาแน่นสัมพัทธ์ของอากาศ ρ ที่กำหนดได้จากสมการ

$$\rho = (P/760) \cdot (273 + 20) / (273 + t) = 0.386P / (273 + t)$$

เมื่อ P เป็นความดันของบรรยากาศเป็น ม.ม.ปรอท

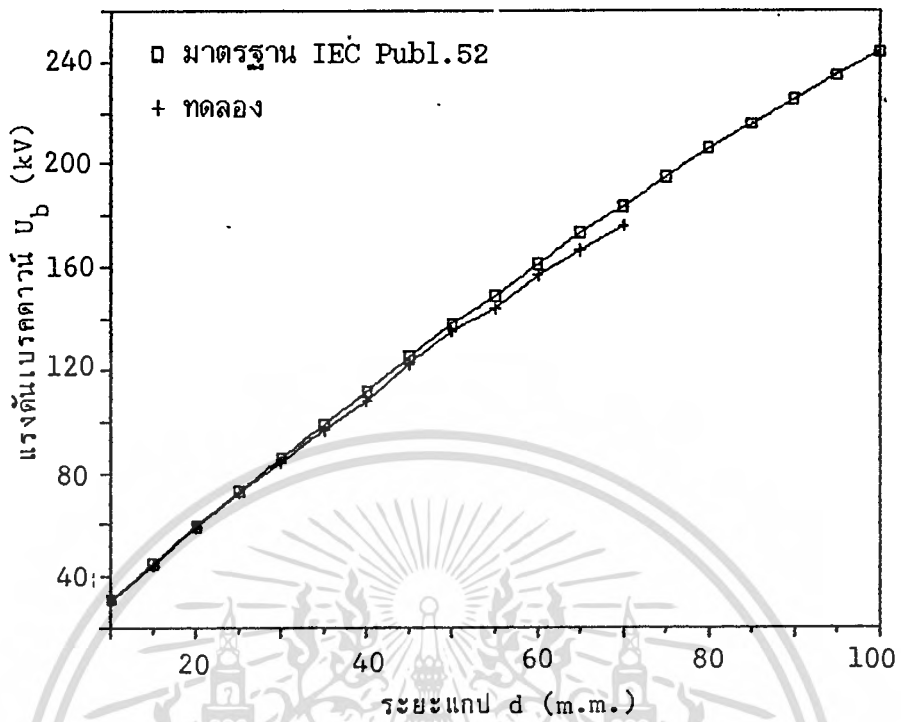
t เป็นอุณหภูมิห้องในขณะที่ทำการทดลอง

และค่า K_d จะเท่ากับ ρ เมื่อ ρ อยู่ในช่วงระหว่าง 0.9 - 1.05 ในรูปที่

7.2.4 แสดงการเปรียบเทียบแรงดันเบรคดาวระหว่างแรงดันที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 27°C กับ มาตรฐาน IEC Publ. 52

7.2.5 ผลของความชื้นสัมพัทธ์

เนื่องจากความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศมีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์โคโรน่า ถ้าความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศมีมาก จะมีผลให้ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของอากาศมีค่าลดลง [47] ความน่าจะเป็นที่แรงดันวิกฤติบนผิวของตัวนำจะทำลายความเป็นฉนวนของอากาศจะมีมากขึ้น เป็นสาเหตุให้เกิดปรากฏการณ์โคโรน่าง่าย ดังนั้นเพื่อให้ผลการทดลองมีมาตรฐานเดียวกันจึงต้องจำกัดขอบเขตความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศ ให้มีได้ไม่เกิน 75 %



รูปที่ 7.2.4 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรคดาวน์ในช่องว่างระหว่างทรงกลม ขนาด 250 ม.ม. มาตรฐาน IEC Publ.52. กับแรงดันเบรคดาวน์ทดสอบในห้องทดลอง ในเทอมของระยะแกป ที่อุณหภูมิ 27 °C

ตารางที่ 7.2.4 แสดงความผิดพลาดของอุปกรณ์ในการทดลอง

อุณหภูมิ °C	ความผิดพลาด %
27	2.45
28	2.47
29	2.51
30	2.54
31	2.65

7.2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเบรคดาวน์ของไฟฟ้ากระแสสลับและกระแสตรง

จากผลของรูปคลื่นต่อแรงดันเบรคดาวน์ในจนวนเหลว [48, 59] โดยปกติค่าแรงดันเบรคดาวน์ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับจะมีค่ามากกว่าค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า อัตราส่วนระหว่างแรงดันเบรคดาวน์ด้วยกระแสสลับต่อกระแสตรงประมาณ $1.2 - 1.6 : 1$ [50] ในตารางที่ 7.2.5 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรคดาวน์ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับและกระแสตรงของจนวนเหลว

ตารางที่ 7.2.5 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรคดาวน์ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับและกระแสตรงของน้ำมันทดสอบ

ชนิดของน้ำมัน	แรงดันเบรคดาวน์ ,kV		
	AC [1]	AC (ทดลอง)	DC
1. ถั่วเหลือง	79.30	73.99	37.63
2. รำข้าว	73.39	69.15	35.34
3. ปาล์ม	71.95	68.40	33.91

จากตารางที่ 7.2.5 จะเห็นได้ว่าแรงดันเบรคดาวน์ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับทดลองโดยคุณสมบัติ คุณสมบัติ คูณเฟือก กับ ผู้เขียน มีค่าไม่เท่ากัน เป็นผลเนื่องมาจากผู้ทดลองได้มีการดูความชื้นออกด้วยซิลิกาและอุปกรณ์ในการตัดวงจรไฟฟ้า ซึ่งเป็นของต่างกัน ครั้งแรกเป็นของบริษัทฟอสเตอร์ และการทดลองครั้งหลังมาจากบริษัท ASEA มีผลให้แรงดันเบรคดาวน์ต่างกัน สันนิษฐานปัจจัยในหัวข้อที่ 4.2 และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างแรงดันเบรคดาวน์ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับกับกระแสตรง มีอัตราส่วน $1.96 : 1$, $1.95 : 1$ และ $2.017 : 1$ ในน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ถั่วเหลือง รำข้าว และปาล์ม ตามลำดับ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.3 การวิเคราะห์ความผิดพลาดจากการทดลอง

7.3.1 ความผิดพลาดในการวัดแรงดันไฟฟ้า สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้วิธีการมระหว่างความต้านทานสูงกับไมโครแอมมิเตอร์ ซึ่งความต้านทานมีค่าสูงถึง 3,000 M-ohm มีค่าความผิดพลาดประมาณ 1% และวิธีการนี้ให้ความละเอียดถึง 0.2% ที่ระดับแรงดัน 500 kV ส่วนค่าความผิดพลาดเนื่องจากโวลต์เตจที่เกิดเนื่องจากความต้านทานในไมโครแอมมิเตอร์น้อยมาก เมื่อเทียบกับระดับโวลต์เตจที่วัด จึงสามารถตัดทิ้งไปได้ และความผิดพลาดที่ทำการทดลองในห้องทดลองที่มีอุณหภูมิซึ่งไม่ตรงตามมาตรฐาน IEC Publ.156 ซึ่งทดลอง ณ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส สามารถหาโดยการใช่วิธีวัดแรงดันด้วยช่องว่างระหว่างทรงกลมในหัวข้อที่ 7.2.4 มีน้อยกว่า 2.45 % เมื่อรวมความผิดพลาดที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะได้น้อยกว่า 2.45 % ซึ่งข้อผิดพลาดในการทดลองนี้สามารถยอมรับได้ สำหรับการทดลองทางไฟฟ้าแรงสูง

7.3.2 ความผิดพลาดในการตั้งระยะแกป ระยะแกปสามารถตั้งให้ถูกต้องด้วยไดออลลิงไมโครมิเตอร์ ที่มีความแม่นยำเท่ากับ 0.01 ม.ม. นับได้ว่าเป็นเครื่องมือที่มีความละเอียดสูง ในการทดลองนี้ได้ใช้ระยะแกปที่น้อยที่สุดคือ 1 ม.ม. ดังนั้นเราให้ความผิดพลาดที่เกิดจากการตั้งระยะแกปเป็น 1 % [62] และถ้ารวมความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดแรงดันไฟฟ้าและจากการวัดระยะแกปจะได้น้อยกว่า 3.45 %

7.4 การทดลองที่ 1

การทดลองนี้เป็นการศึกษาผลของการปรับตัวของน้ำมันที่นำมาทดสอบ โดยการตรวจสอบค่าแรงดันเบรคดาวน์ 100 ครั้งต่อเนื่อง การตรวจสอบค่าแรงดันเบรคดาวน์ติดต่อกันหลายๆครั้ง เพื่อต้องการรู้ว่า น้ำมันทดสอบมีคุณสมบัติอย่างไรบ้างเมื่อมีการเบรคดาวน์นี้ๆกันและอิเล็กทรอนิกส์ต่างชนิดกันมีผลต่อแรงดันเบรคดาวน์อย่างไร ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 7.4.1- 7.4.12 โดยแยกการแสดงผลออกเป็น 2 ส่วน ก) แสดงคุณลักษณะแรงดันเบรคดาวน์ต่อเนื่องในน้ำมันทดสอบ 100 ครั้ง ข) เป็นการนำเสนอข้อมูลทางสถิติของข้อมูล ก โดยมีการแจกแจงความถี่การเบรคดาวน์ มี μ เป็นค่าเฉลี่ยเลขคณิต σ เป็นส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน Min และ Max เป็นค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของข้อมูลตามลำดับ

จากผลการทดลองตรวจสอบแรงดันเบรคดาวน์ในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าศาลเท็กซ์ลักษณะการเบรคดาวน์ในช่วงแรกๆค่าที่ได้จะสูงกว่าค่าเฉลี่ย ในช่วงกลางจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ย และในช่วงท้ายจะมีค่าลดลงและค่าที่ได้จากอิเล็กทรอนิกส์แต่ละสแตนเลสมีค่าสูงกว่า ส่วนในน้ำมันพืชพฤติกรรมแตกต่างกัน คือในช่วงแรกจะมีค่าแรงดันเบรคดาวน์ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยและค่าจะเพิ่มสูงขึ้นในช่วงกลางๆและมีแนวโน้มต่ำลงในช่วงท้ายๆ การเบรคดาวน์ของน้ำมันพืชมีการกระจายมากและมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมากประมาณ 4 - 7.77 kV

ตารางที่ 7.4 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ของน้ำมันทดสอบทั้ง 4 ชนิด โดยใช้อิเล็กทรอนิกส์ทรงกลม-ทรงกลม ระยะแกป 2.5 ม.ม.

สารที่ใช้ทำอิเล็กทรอนิกส์	ศาลเท็กซ์ kV	ถั่วเหลือง kV	รำข้าว kV	ปาล์ม kV
1. เหล็กสแตนเลส	22.86	39.33	36.45	34.21
2. ทองเหลือง	21.55	37.63	35.34	33.91
3. อลูมิเนียม	20.99	38.46	35.18	33.41

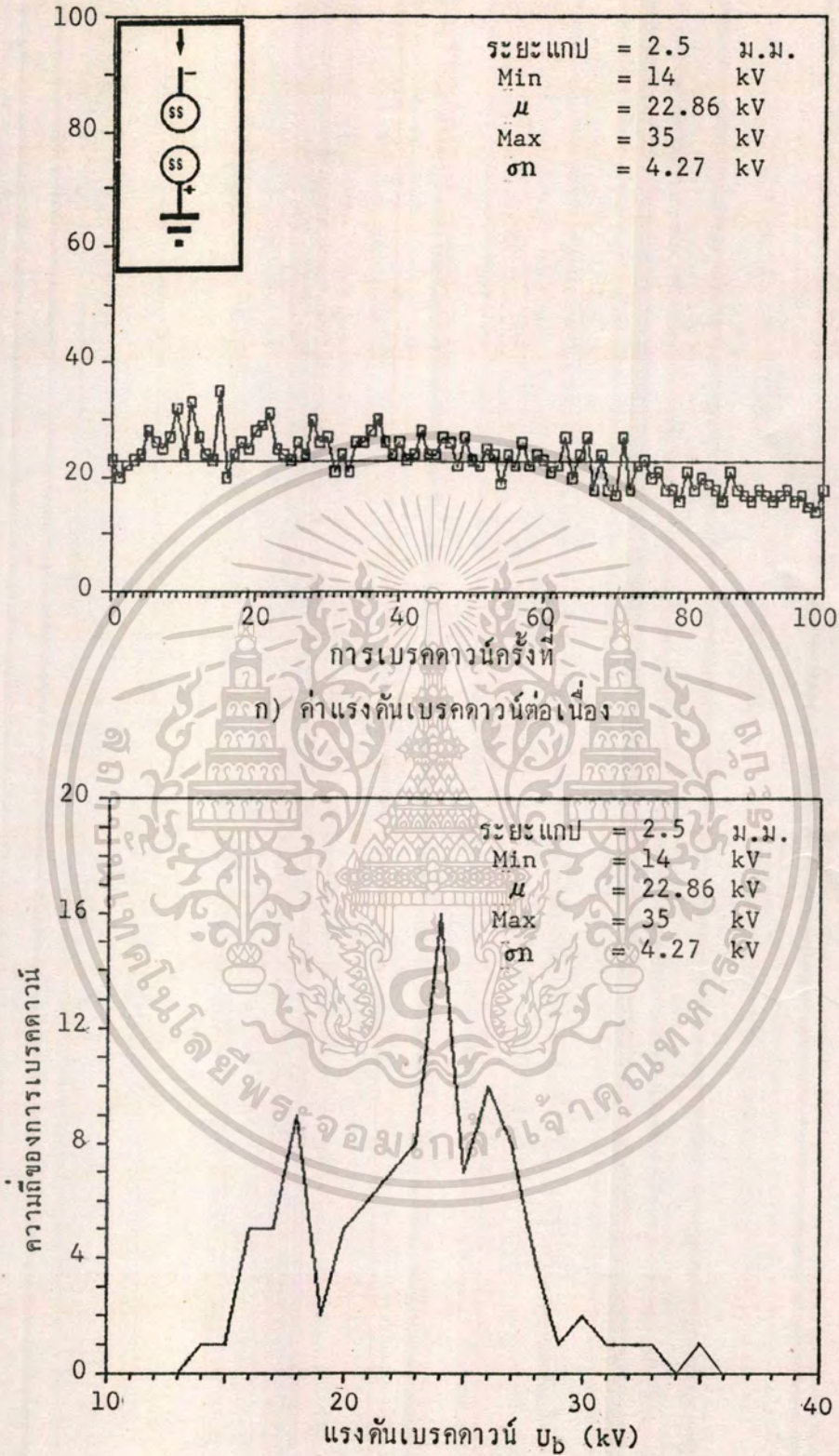
การทดลองที่ 1 เป็นทดลองเพื่อศึกษาการปรับตัวของน้ำมันพืชแปรตามจำนวนครั้งการเบรคดาวน์เทียบเคียงกับน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า ทั้งนี้เพื่อคุณูปการของน้ำมันพืชเมื่ออยู่ในสภาวะเกิดการเบรคดาวน์หลายครั้งต่อเนื่องกัน การทดสอบการเบรคดาวน์หลายๆครั้ง เพื่อให้เกิดความแน่ใจว่าน้ำมันพืชมีคุณสมบัติที่สามารถนำมาพัฒนาใช้เป็นฉนวนเหลวในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงต่อไป จากการทดลองข้างต้น จะเห็นได้ว่าแนวโน้มของการเบรคดาวน์จะเพิ่มขึ้นในช่วงกลางของการทดลองและลดลงในช่วงท้าย ผู้เขียนได้ตั้งข้อสังเกตไว้ 3 ประการดังนี้

1 เนื่องจากโมเลกุลของน้ำมันพืชซึ่งมีกรดไขมันเป็นองค์ประกอบมีคาร์บอน 12 - 16 ตัว เมื่อโมเลกุลเหล่านี้อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าสูงๆ และเกิดการเบรคดาวน์ในครั้งต้นๆ ของการทดลองทำให้โมเลกุลของน้ำมันพืชแตกสลายออกเป็นโมเลกุลที่เล็กกว่าและเสถียรกว่า ในขณะนี้ไม่สามารถรู้ว่าโมเลกุลที่แตกออกมีโครงสร้างเป็นอย่างไร

2 เนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในน้ำมันพืช หลังจากการเบรคดาวน์ในครั้งต้นๆของการทดลอง มีผลให้เกิดเป็นผลผลิตของกรดคีโตนหรือกรดไฮดรอกซีคีโตน มีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มบางๆลักษณะแข็งแรงมาก เคลือบอยู่ที่ผิวของอิเล็กโตรดและเป็นสะพาน(bridge) คล้ายเส้นใยสีขาวขุ่นเชื่อมระหว่างอิเล็กโตรด

3 เนื่องจากเกิดประจุค้างในสนามไฟฟ้า เป็นผลมาจากการเบรคดาวน์ในครั้งต้นๆของการทดลอง เมื่อเกิดเบรคดาวน์จะเกิดประจุไอออนลบกระจายอยู่ข้างคาโธด มีผลให้เบรคดาวน์ครั้งต่อไปมีแรงดันเบรคดาวน์สูงขึ้น

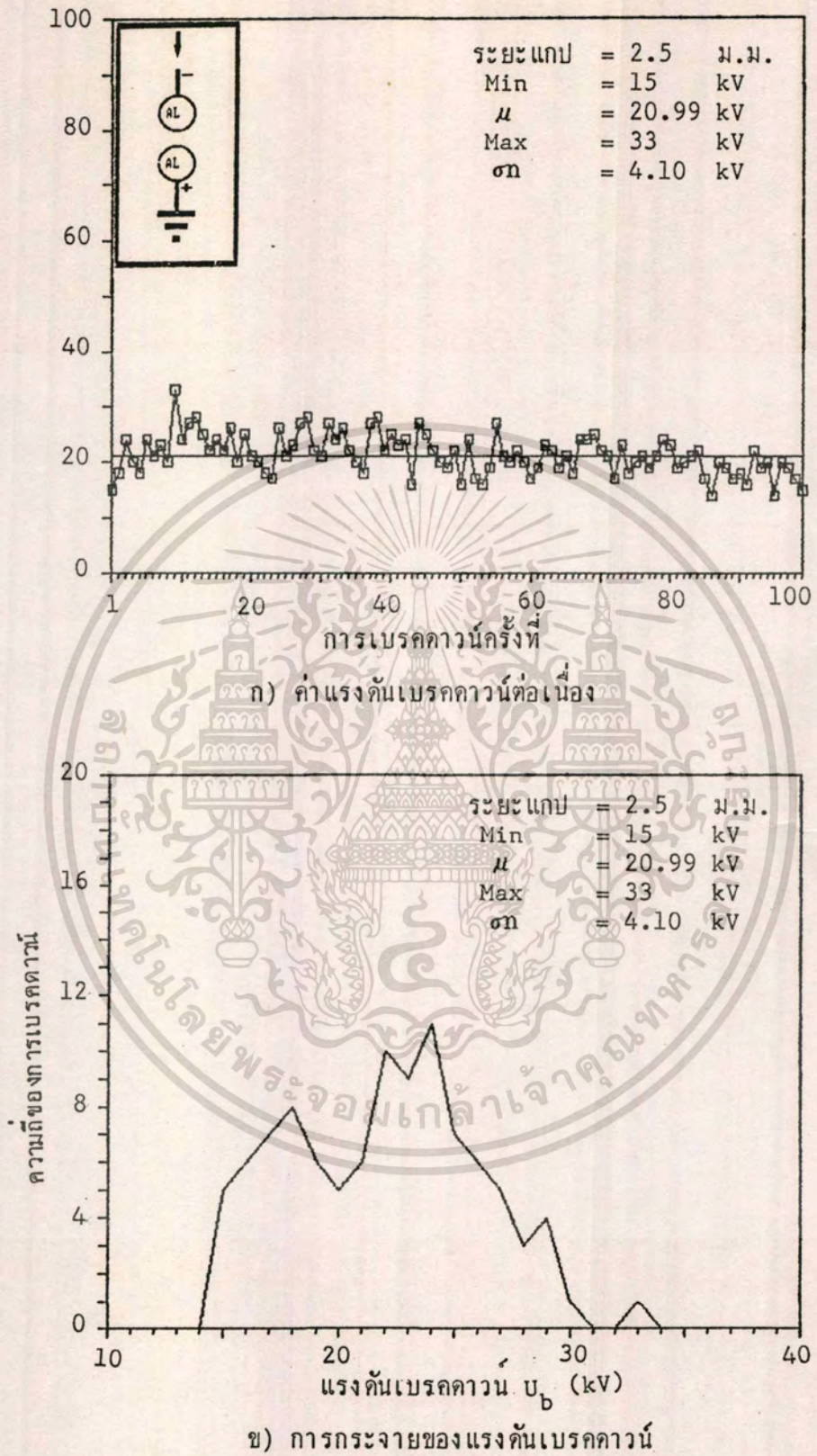
สำหรับในช่วงท้ายๆของการทดลองแรงดันเบรคดาวน์ลดลงเนื่องมาจากการสูญเสียสภาพของโมเลกุลและสิ่งสกปรก(sludge) ที่เกิดขึ้นขณะมีการเบรคดาวน์ในแต่ละครั้ง



ข) การกระจายของแรงดันเบรคควาน์

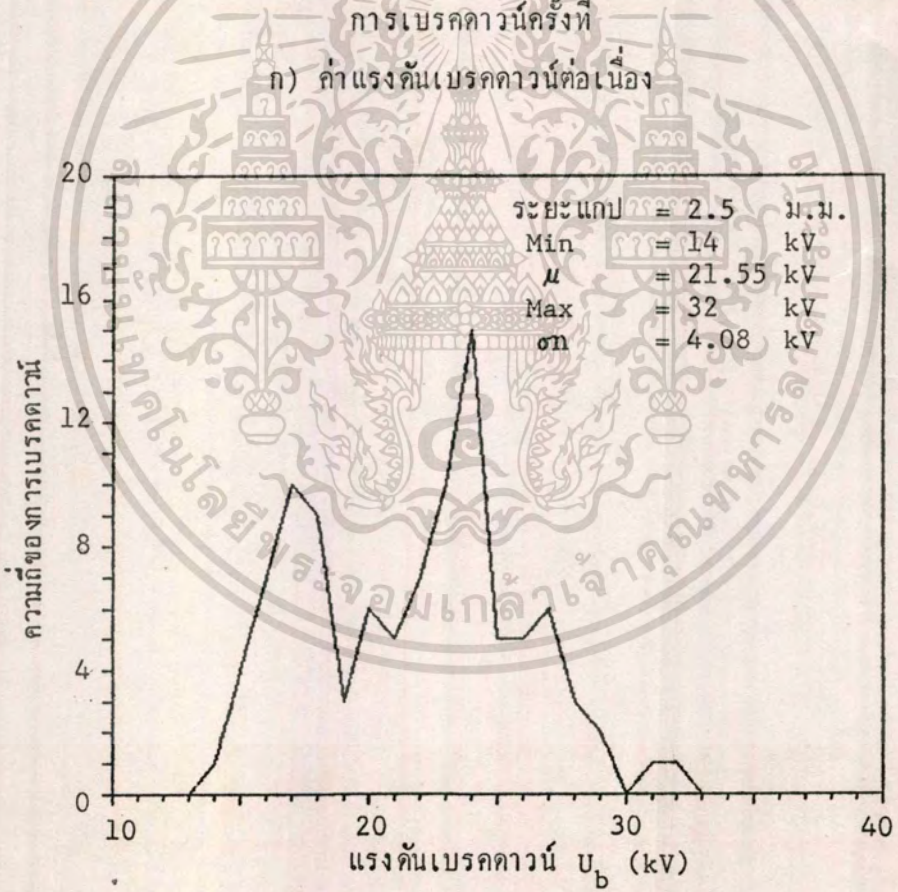
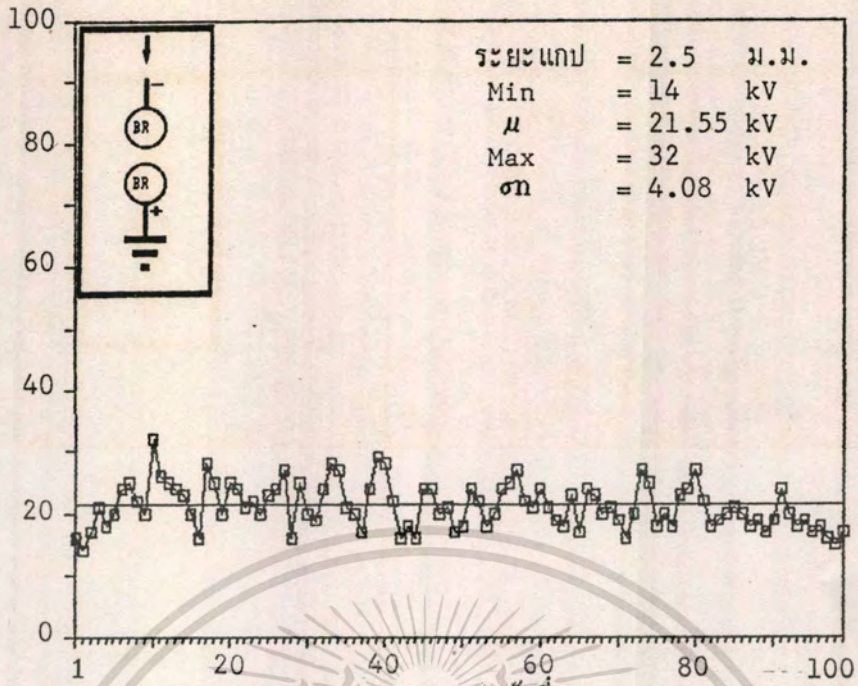
รูปที่ 7.4.1 แสดงแรงดันเบรคควาน์ต่อเนื่องในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าศาลเท็กซ์ โดยอิเล็กทรอนิกส์

ทรงกลม-ทรงกลม ทำจากเหล็กสแตนเลส เส้นผ่าศูนย์กลาง 13 ม.ม. ระยะแกป เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติหน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 2.5 ม.ม. อุณหภูมิ 29.7 °C และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.4.2 แสดงแรงดันเบรคความดันต่อเนื่องในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์ โดยอิลีคโตรด

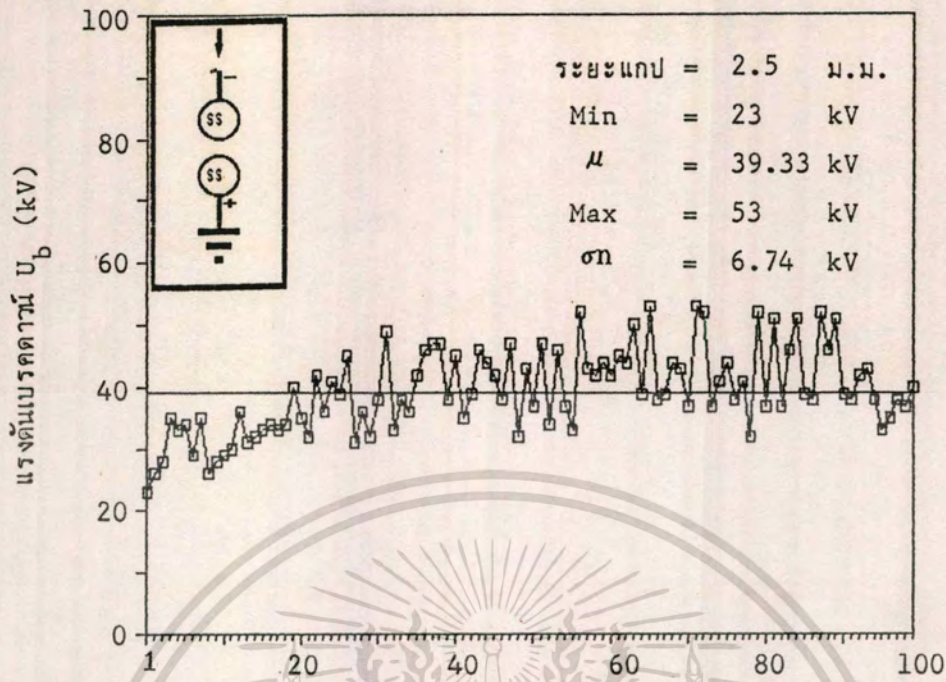
ทรงกลม-ทรงกลม ทำจากอลูมิเนียมเส้นผ่าศูนย์กลาง 13 ม.ม. ระยะแกป 2.5 ม.ม. เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ที่อุณหภูมิ 29 °C ให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



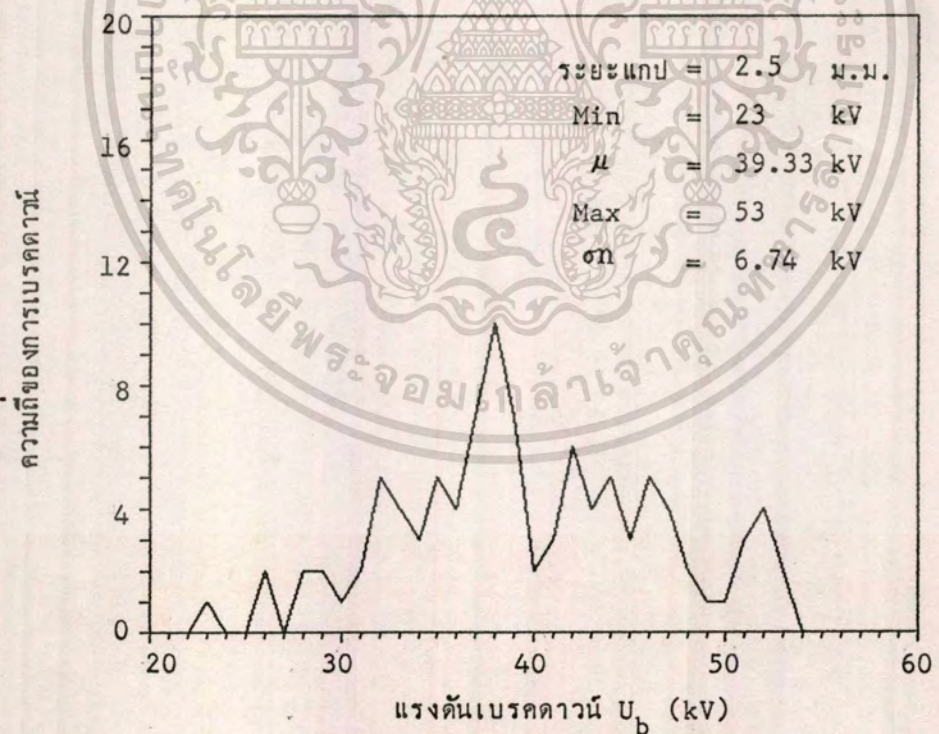
ข) การกระจายของแรงดันเบรคความถี่

รูปที่ 7.4.3 แสดงแรงดันเบรคความถี่ต่อเนื่องในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์ โดยอีเล็คโตรด

ทรงกลม-ทรงกลม ทำจากทองเหลืองเส้นผ่าศูนย์กลาง 13 ม.ม. ระยะแถบ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ออกหมึ 29 °C และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การเบรคตาวนครั้งที่
ก) ค่าแรงดันเบรคตาวนต่อเนื่อง



ข) การกระจายของแรงดันเบรคตาวน

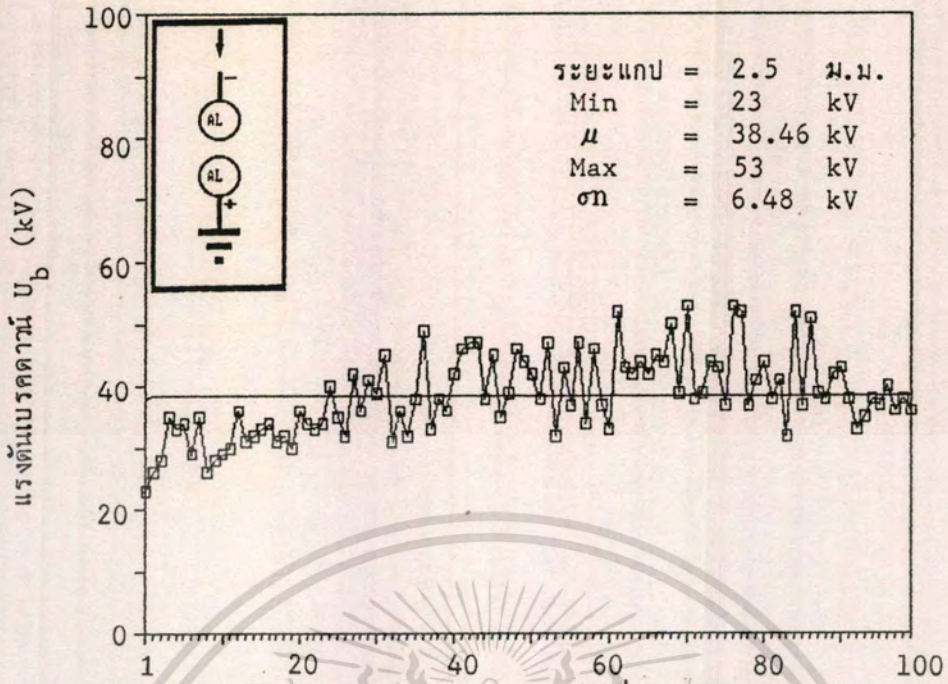
รูปที่ 7.4.4 แสดงแรงดันเบรคตาวนต่อเนื่องในน้ำมันถั่วเหลือง โดยอิเล็กโตรดทรงกลม-ทรงกลม

ทำจากเหล็กแอสแตนเลส เส้นผ่าศูนย์กลาง 13 มม. ระยะแกป 2.5 มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

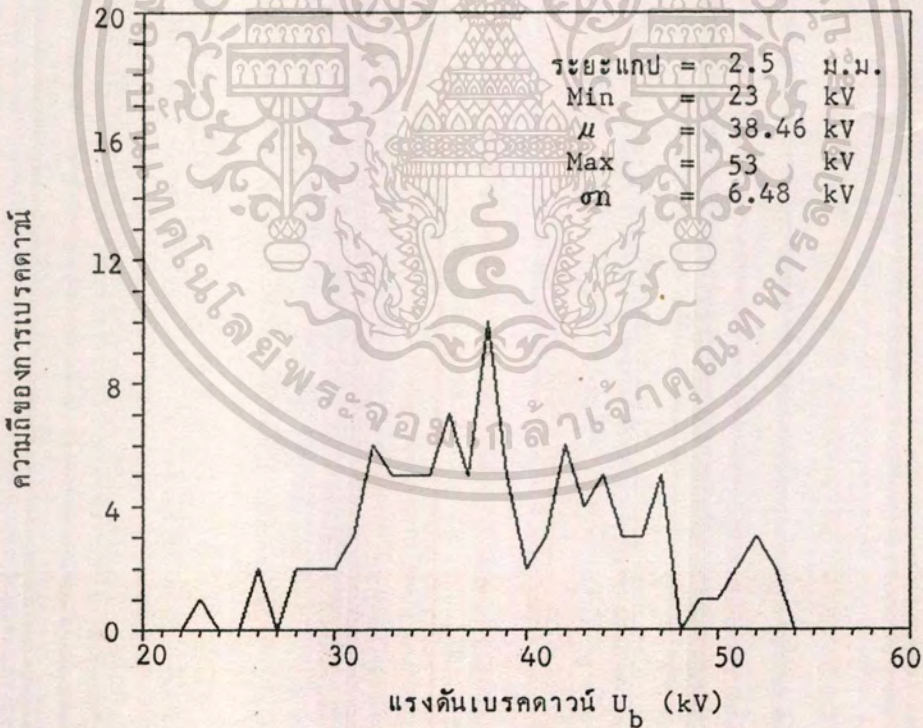
อุณหภูมิ 30 °C

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนั้น ช่างทั้งหมดมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



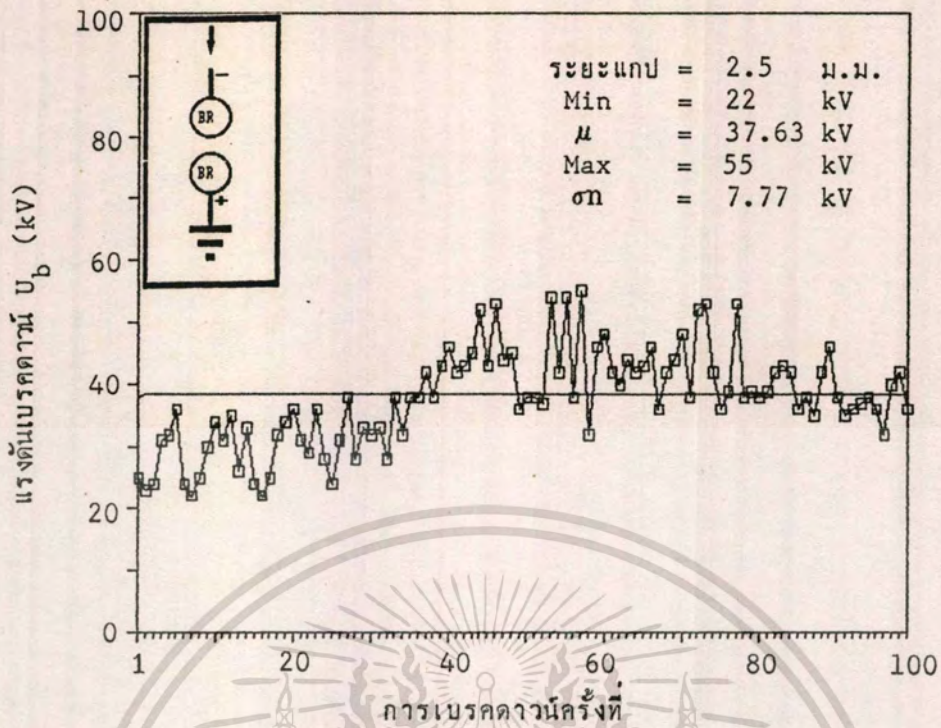
การเบรคตาวานครั้งที่

ก) ค่าแรงดันเบรคตาวานต่อเนื่อง

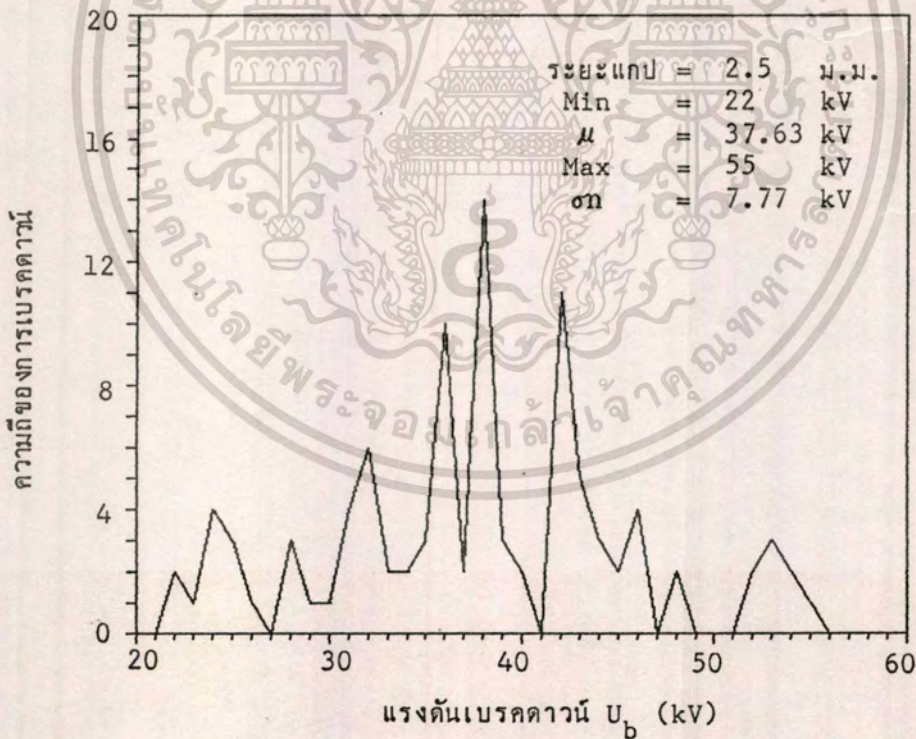


ข) การกระจายของแรงดันเบรคตาวาน

รูปที่ 7.4.5 แสดงแรงดันเบรคตาวานต่อเนื่องในน้ำมันฉนวน โดยอิเล็กทรอนิกส์ทรานสดิวเซอร์-ทรานสดิวเซอร์
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
 ทำจากอลูมิเนียม เส้นผ่าศูนย์กลาง 13 มม. ระยะแกป 2.5 มม. อุณหภูมิ 28 °C
 ไม่ปรากฏใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุใดก็ตาม และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

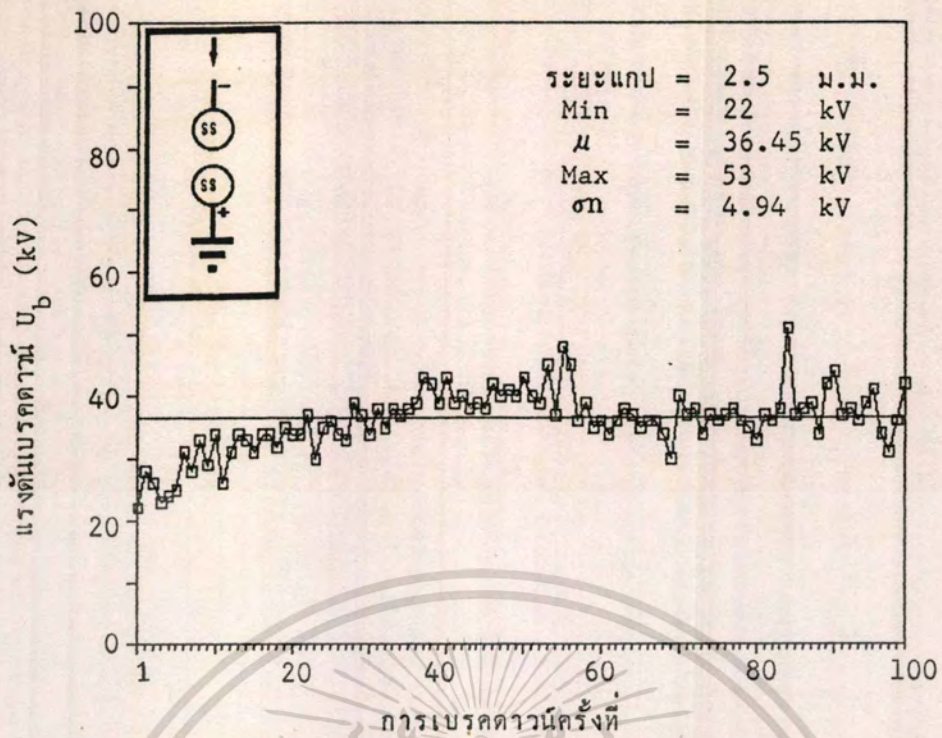


ก) ค่าแรงดันเบรคดาวน์ต่อเนื่อง

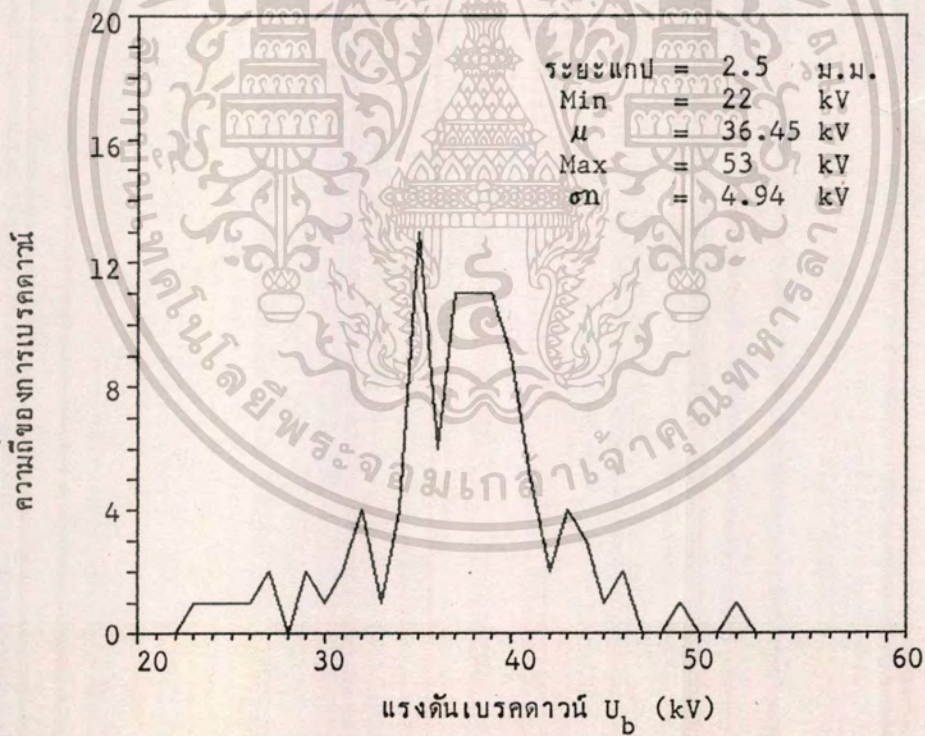


ข) การกระจายของแรงดันเบรคดาวน์

รูปที่ 7.4.6 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ต่อเนื่องในน้ำมันถั่วเหลือง โดยอิเล็กโตรดทรงกลม-ทรงกลม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ทำจากทองเหลือง เส้นผ่าศูนย์กลาง 13 ม.ม. ระยะแกป 25 ม.ม. อุณหภูมิ 30 °C



ก) ค่าแรงดันเบรคดาวน์ต่อเนื่อง

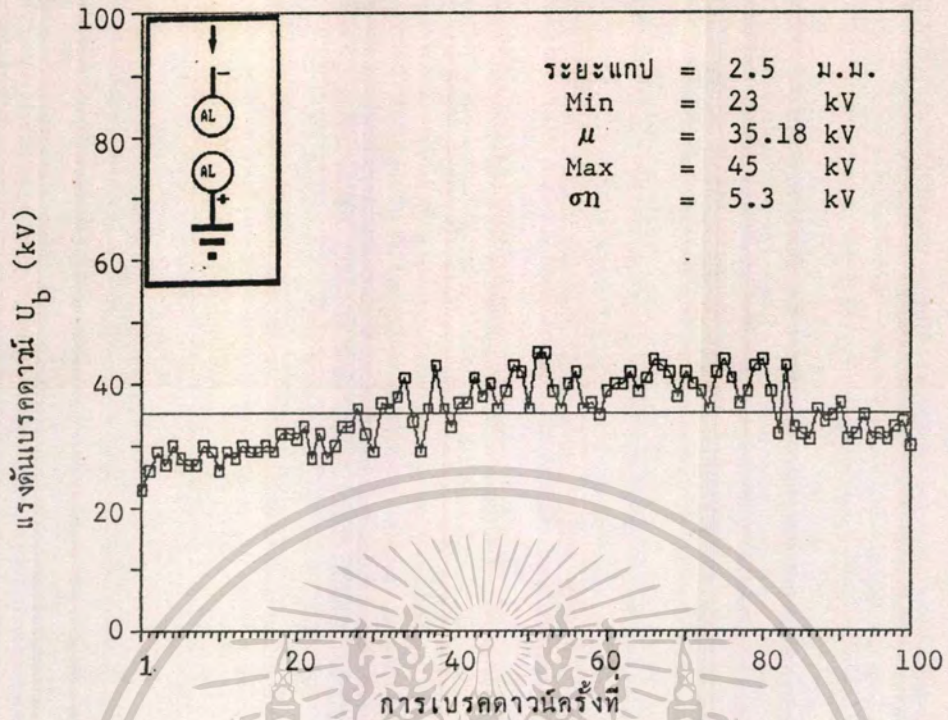


ข) การกระจายของแรงดันเบรคดาวน์

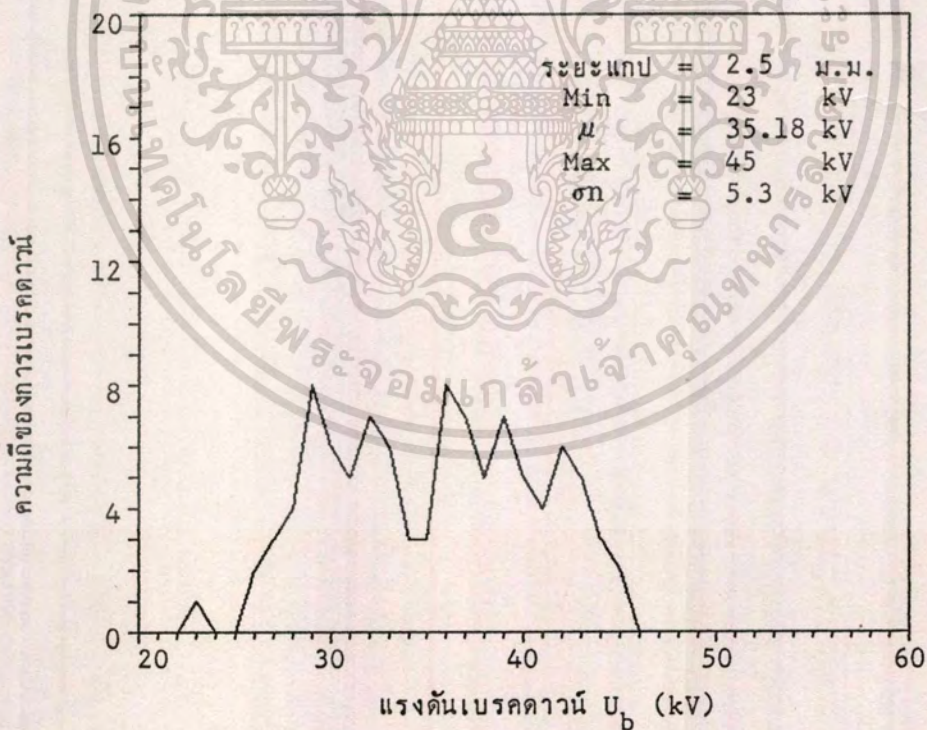
รูปที่ 7.4.7 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ต่อเนื่องในน้ำมันรำข้าว โดยอิเล็กทรอนิกส์ทรานซอร์ม-ทรานสฟอร์ม

ทำจากเหล็กแอสตนิเลส เส้นผ่าศูนย์กลาง 13 ม.ม. ระยะแกป 25 ม.ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
อุณหภูมิ 28 °C
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



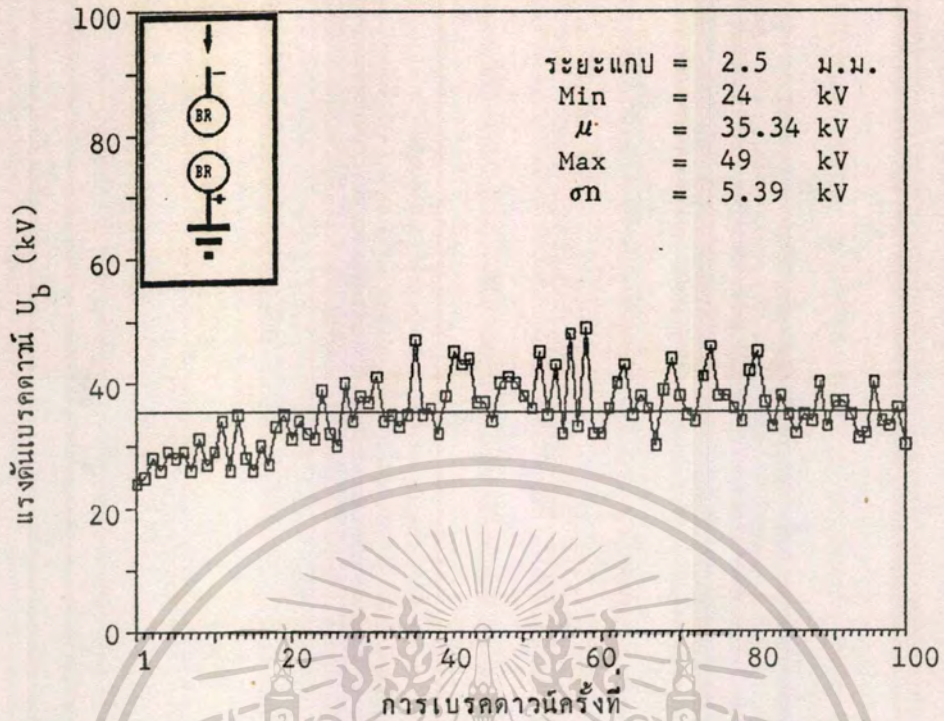
ก) ค่าแรงดันเบรคตาวานต่อเนื่อง



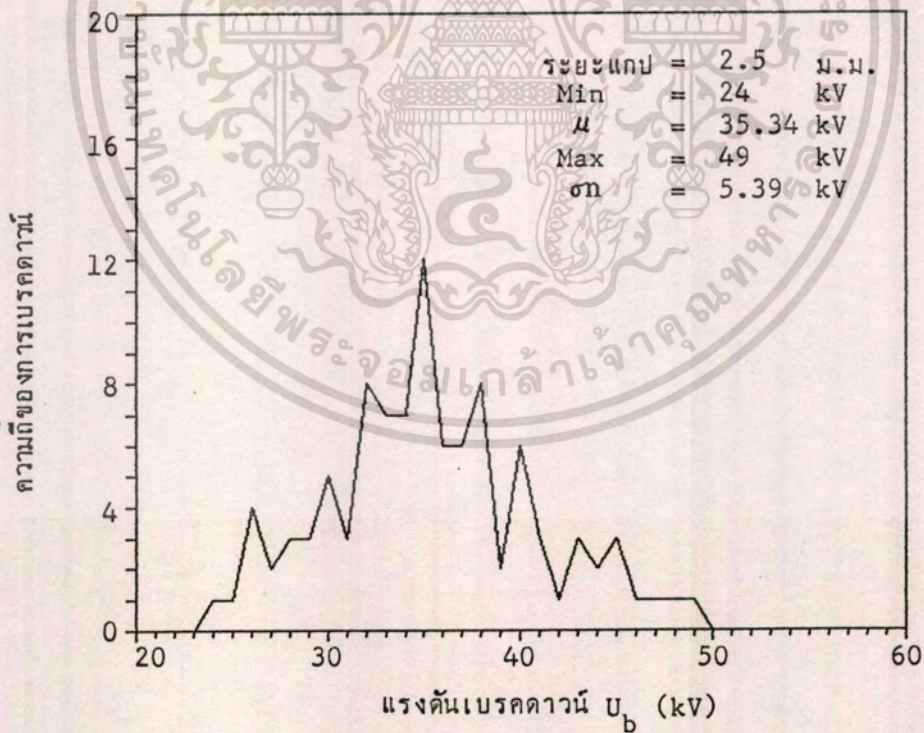
ข) การกระจายของแรงดันเบรคตาวาน

รูปที่ 7.4.8 แสดงแรงดันเบรคตาวานต่อเนื่องในน้ำมันรำข้าว โดยอิเล็กโตรดทรงกลม-ทรงกลม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ทำจากอลูมิเนียม เส้นผ่าศูนย์กลาง 13 ม.ม. ระยะแกป 25 ม.ม. อุณหภูมิ 30 °C

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแต่งสิ่งเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

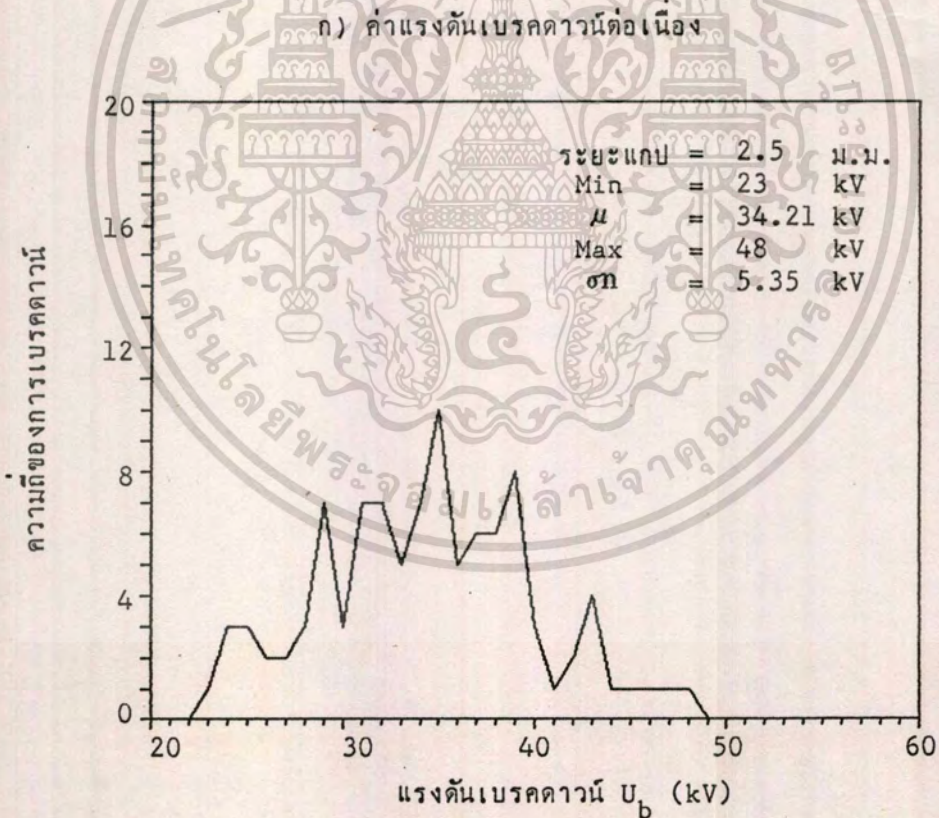
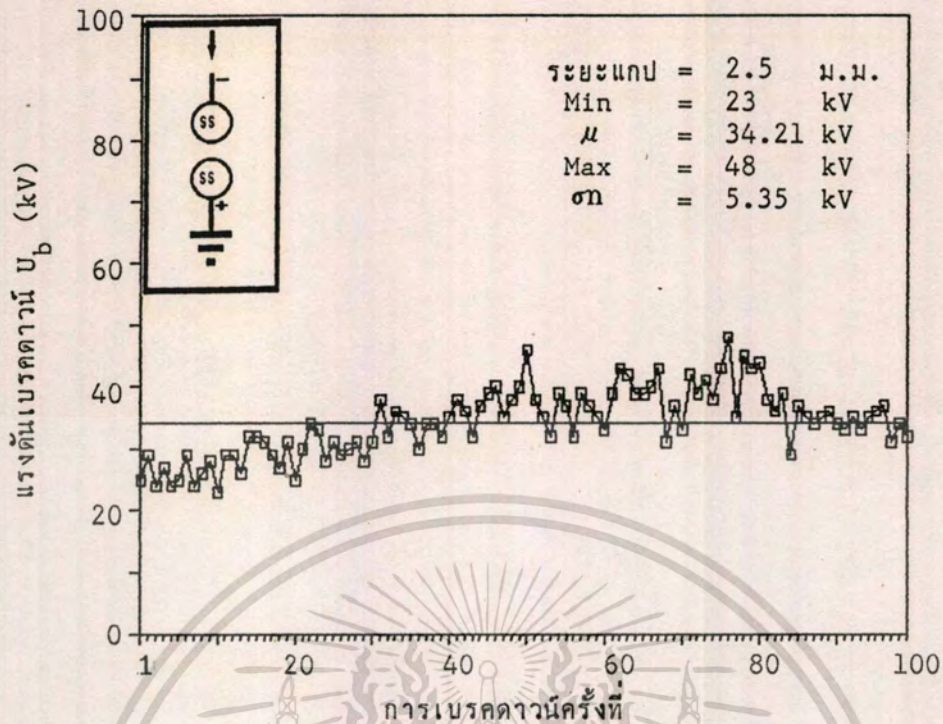


ก) ค่าแรงดันเบรคตามต่อเนื่อง



ข) การกระจายของแรงดันเบรคตาม

รูปที่ 7.4.9 แสดงแรงดันเบรคตามต่อเนื่องในน้ำมันรำข้าว โดยอิเล็กโตรดทรงกลม-ทรงกลม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ทำจากทองเหลืองเส้นผ่าศูนย์กลาง 13 มม. ระยะแกป 25 มม. อุณหภูมิ 29 °C
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นที่ให้มีเหตุที่เปลี่ยนแปลง และต้องยื่นร้องถึงเจ้าของเอกสารที่ถูกต้องที่ทำการนำไปใช้

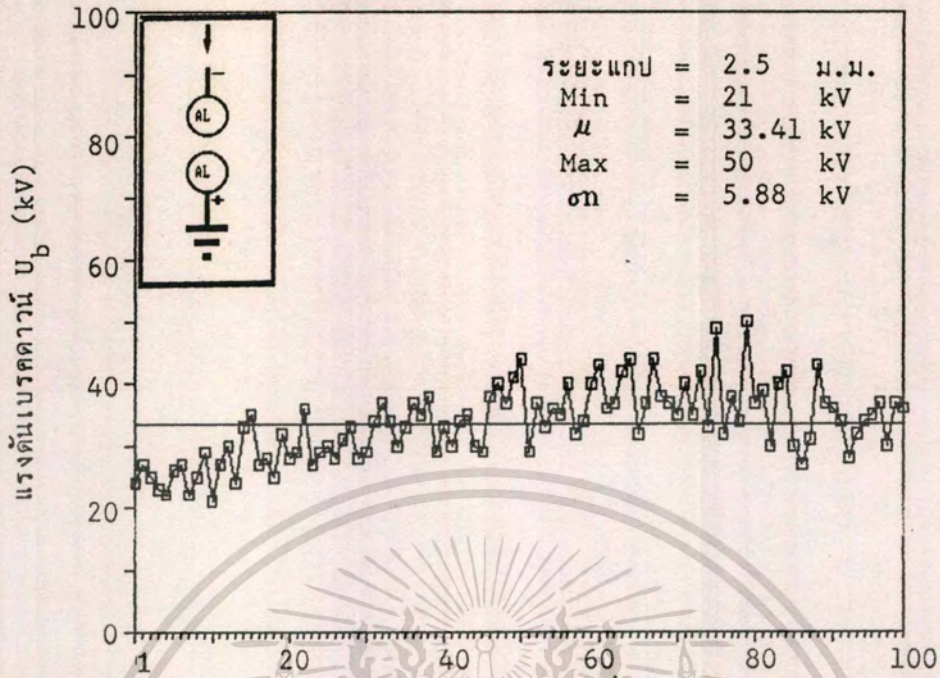


ข) การกระจายของแรงดันเบรคตาวาน

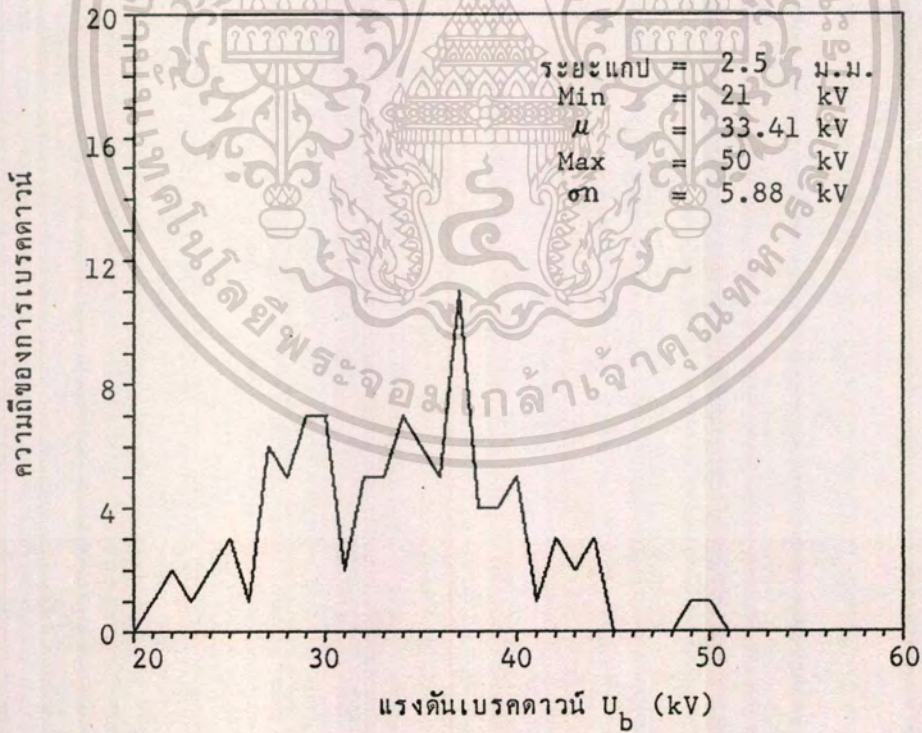
รูปที่ 7.4.10 แสดงแรงดันเบรคตาวานต่อเนื่องในน้ำมันพาล์ม โดยอิเล็กโตรดทรงกลม-ทรงกลม

ทำจากเหล็กสแตนเลสเส้นผ่าศูนย์กลาง 13 ม.ม. ระยะแกป 25 ม.ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ออกหมุมิ 29 °C



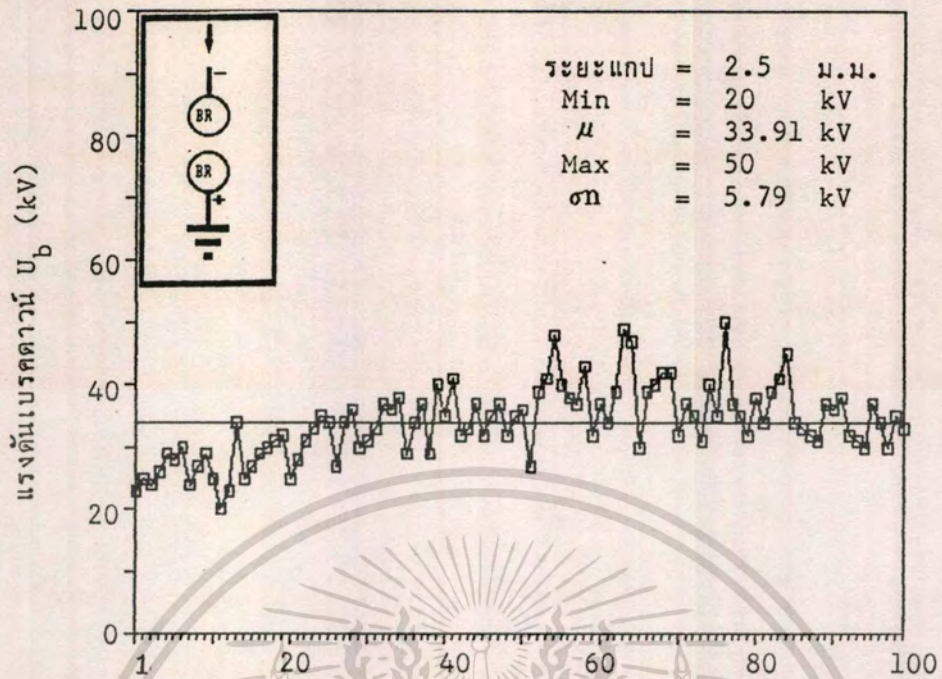
ก) ค่าแรงดันเบรคตาวานต่อเนื่อง



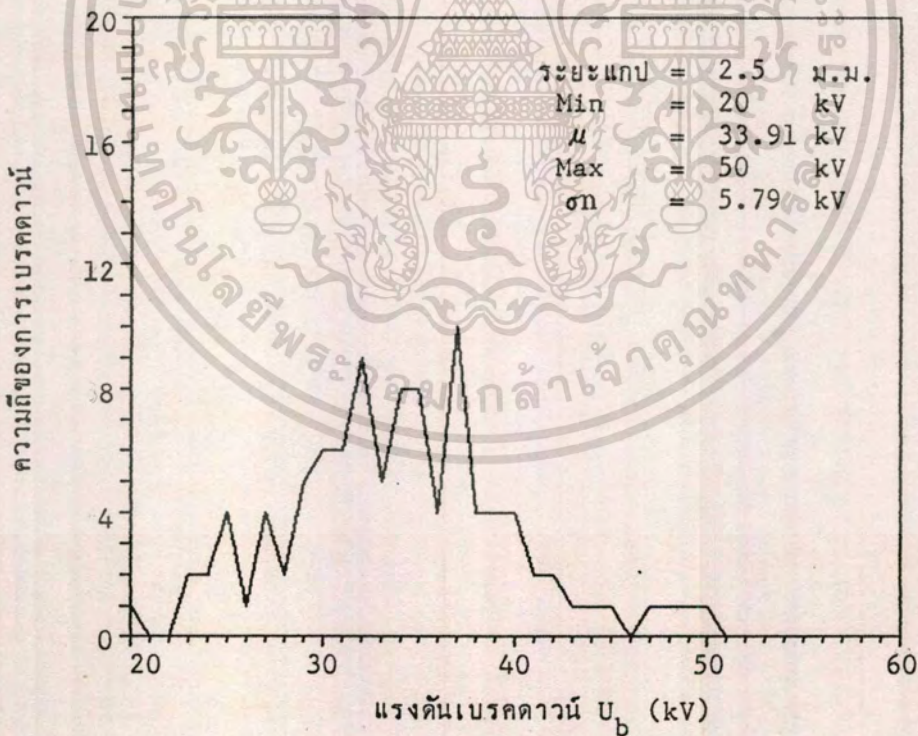
ข) การกระจายของแรงดันเบรคตาวาน

รูปที่ 7.4.11 แสดงแรงดันเบรคตาวานต่อเนื่องในน้ำมันพาล์ม โดยอิเล็กโตรดทรงกลม-ทรงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ทำจากอลูมิเนียมเส้นผ่าศูนย์กลาง 13 ม.ม. ระยะแกป 25 ม.ม. อุณหภูมิ 30 °C
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุขัดแย้งเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) ค่าแรงดันเบรคตาวานต่อเนื่อง



ข) การกระจายของแรงดันเบรคตาวาน

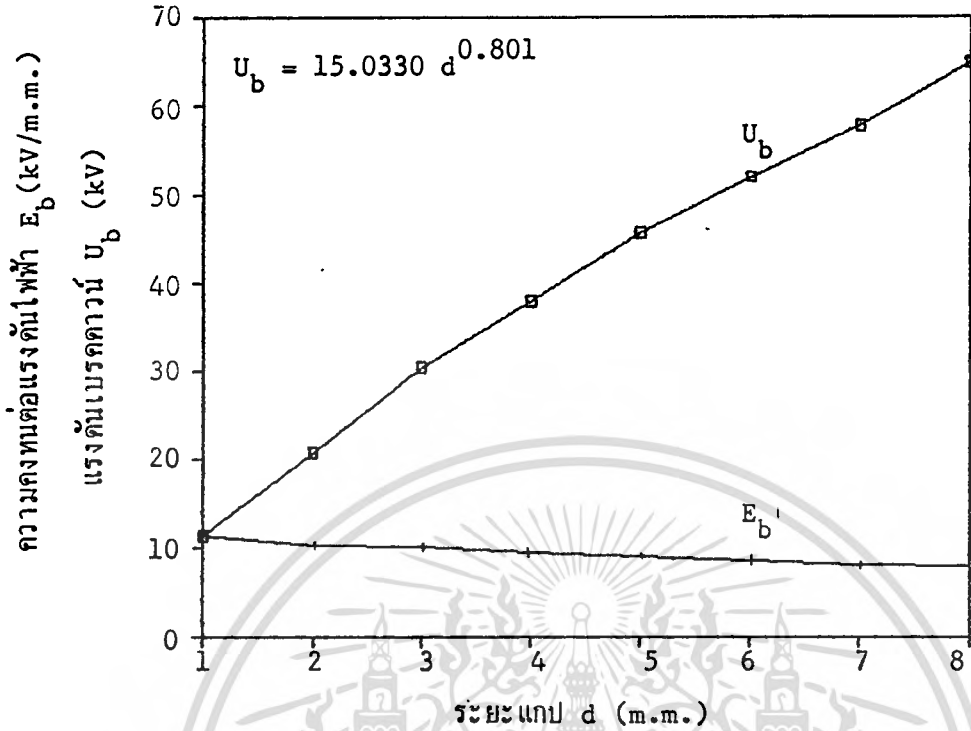
รูปที่ 7.4.12 แสดงแรงดันเบรคตาวานต่อเนื่องในน้ำมันพาล์ม โดยอิเล็กโตรดทรงกลม-ทรงกลม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ทำจากทองเหลืองเส้นผ่าศูนย์กลาง 13 มม. ระยะแกป 25 มม. อุณหภูมิ 27 °C
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

7.5 การทดลองที่ 2

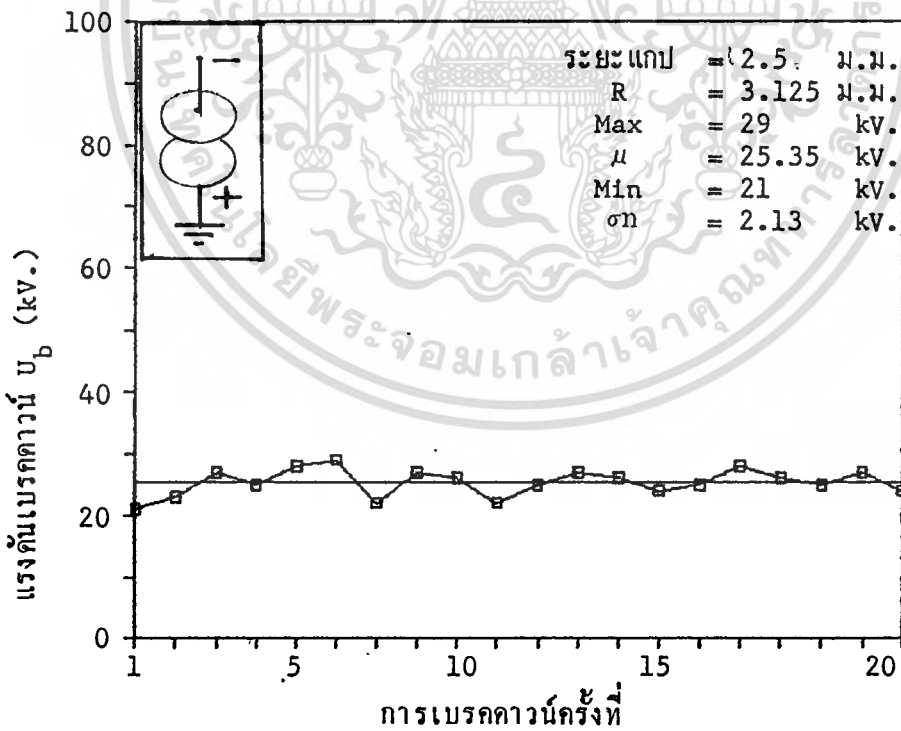
การทดลองนี้เป็นการศึกษาผลขนาดของพื้นที่ผิวอิเล็กทรอนิกส์โดยตรงต่อแรงดันเบรคดาวน์ โดยใช้ อิเล็กทรอนิกส์แบบจานกลม-จานกลม มีค่าส.ป.ส.แพคเตอร์สนามไฟฟ้าประมาณ 1 ถือว่าอยู่ภายใต้ สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ สาเหตุที่เลือกใช้อิเล็กทรอนิกส์แบบจานกลม-จานกลม เพราะเราสามารถควบคุมรูปทรงทางเรขาคณิตของอิเล็กทรอนิกส์ได้ง่ายกว่าแบบอื่นๆ และนอกจากนั้นยังสร้างและทำความเข้าใจ สะอาดพื้นผิวได้ง่าย เนื่องจากกลไกพื้นที่ผิวมีผลต่อการเบรคดาวน์เกี่ยวข้องกับความเร็วของพื้นผิวดังหัวข้อที่ 4.7 การนำเสนอผลการทดลองแสดงในรูปที่ 7.5.1 - 7.5.8 แสดงผลแรงดันเบรคดาวน์และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า ในเทอมระยะแกบและการปรับตัวของน้ำมันทดสอบ 20 ครั้ง โดยมี μ เป็นค่าเฉลี่ยเลขคณิต σ เป็นส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน Min และ Max เป็นค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของข้อมูลตามลำดับและผลการทดลองแสดงในตารางที่ 7.5 จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันเบรคดาวน์เพิ่มขึ้นเมื่อลดขนาดของพื้นที่ผิวอิเล็กทรอนิกส์ ถ้าพื้นที่ผิวลดลง 43.74 % ค่าแรงดันเบรคดาวน์เพิ่มขึ้น 5.59% และ 3.846 % ในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์และน้ำมันถั่วเหลืองตามลำดับ และพื้นที่ผิวลดลง 55.56 % ค่าแรงดันเบรคดาวน์เพิ่มขึ้น 2.16 % และ 6.17 % ในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์และน้ำมันถั่วเหลืองตามลำดับ

ตารางที่ 7.5 แสดงผลของพื้นที่อิเล็กทรอนิกส์ที่มีต่อแรงดันเบรคดาวน์ในน้ำมันทดสอบ

รัศมี (R) และพื้นที่ผิวของอิเล็กทรอนิกส์ ม.ม. และตาราง ม.ม.	แรงดันเบรคดาวน์ ,kV			
	คาลเท็กซ์	เพิ่มขึ้น	ถั่วเหลือง	เพิ่มขึ้น
1. 12.500 , 490.874	21.45	-	28.60	-
2. 9.375 , 276.117	22.65	1.20	31.15	2.55
3. 6.250 , 122.718	23.14	1.69	32.63	4.03
4. 3.125 , 030.679	25.35	3.90	33.25	4.65



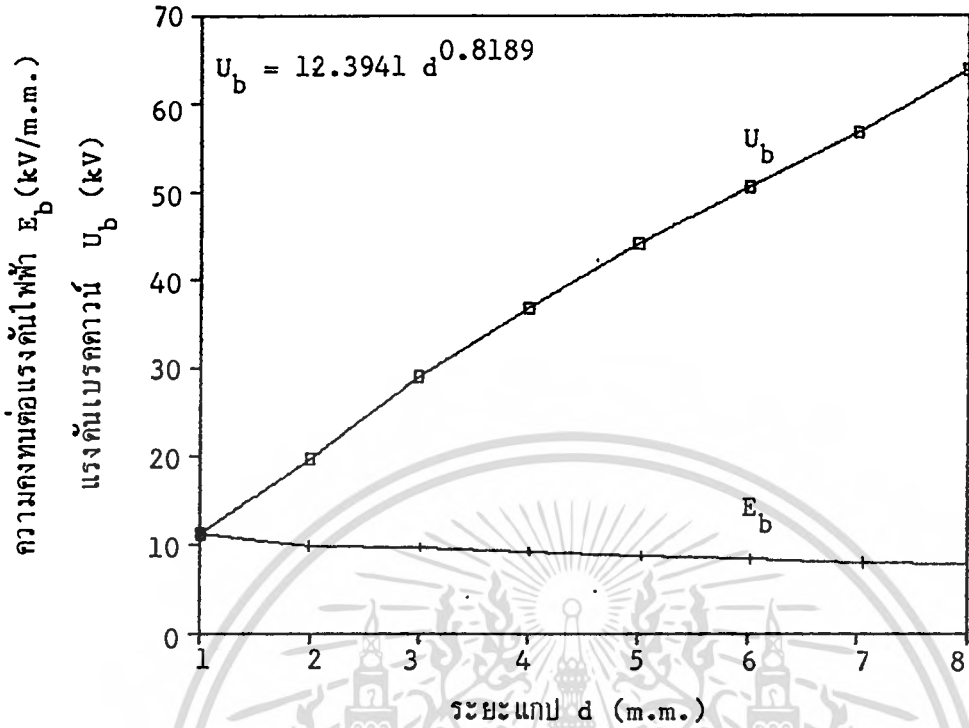
ก) แรงดันเบรคดาวน์และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในเทอมของระยะแกป



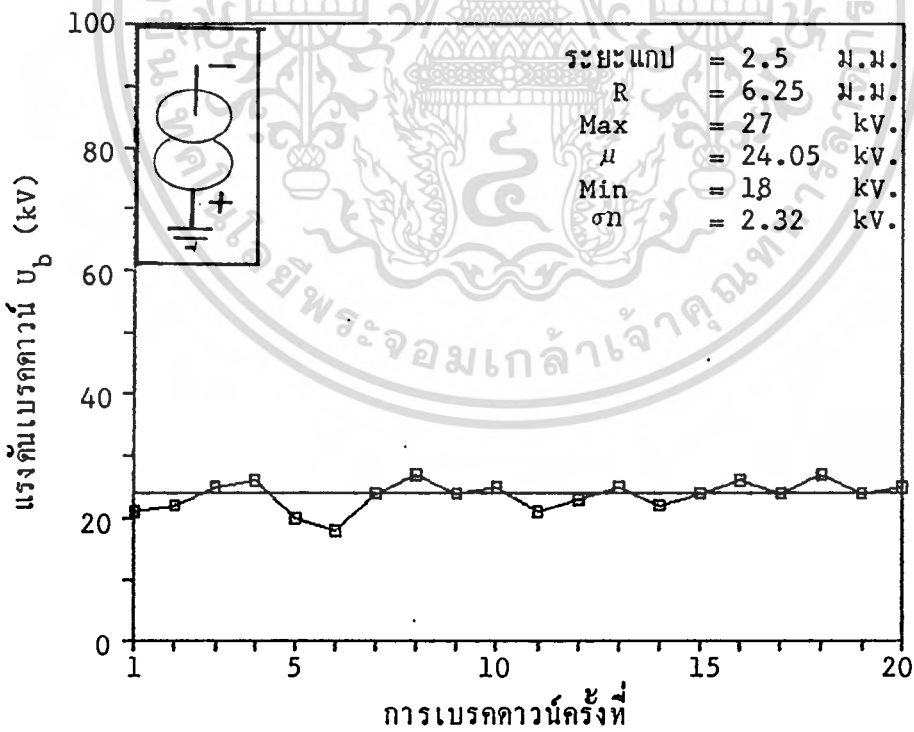
ข) ค่าแรงดันเบรคดาวน์ต่อเนื่อง

รูปที่ 7.5.1 แสดงแรงดันเบรคดาวน์และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารในเทอมระยะแกป(ก) และการปรับตัวของฉนวน(ข) โดยอิลีคโตรดจ่านกลม-จ่านกลม
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 ทำมาจากทองเหลือง มีรัศมี 12.5 ม.ม อุณหภูมิ 29 °C



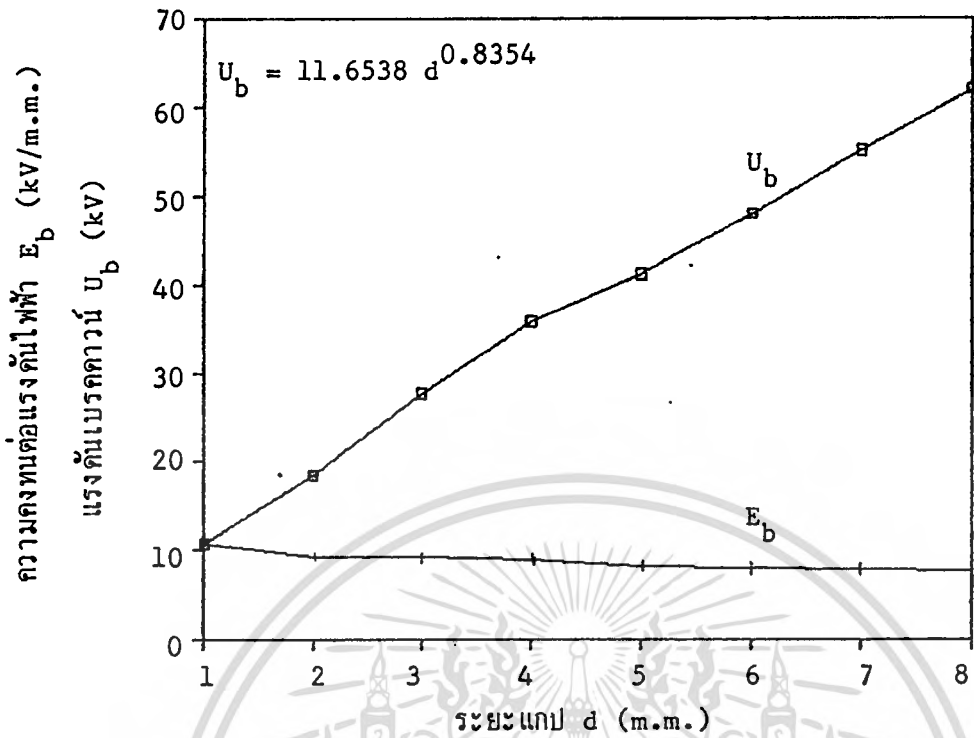
ก) แรงดันเบรคควานและความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในเทอมของระยะแกป



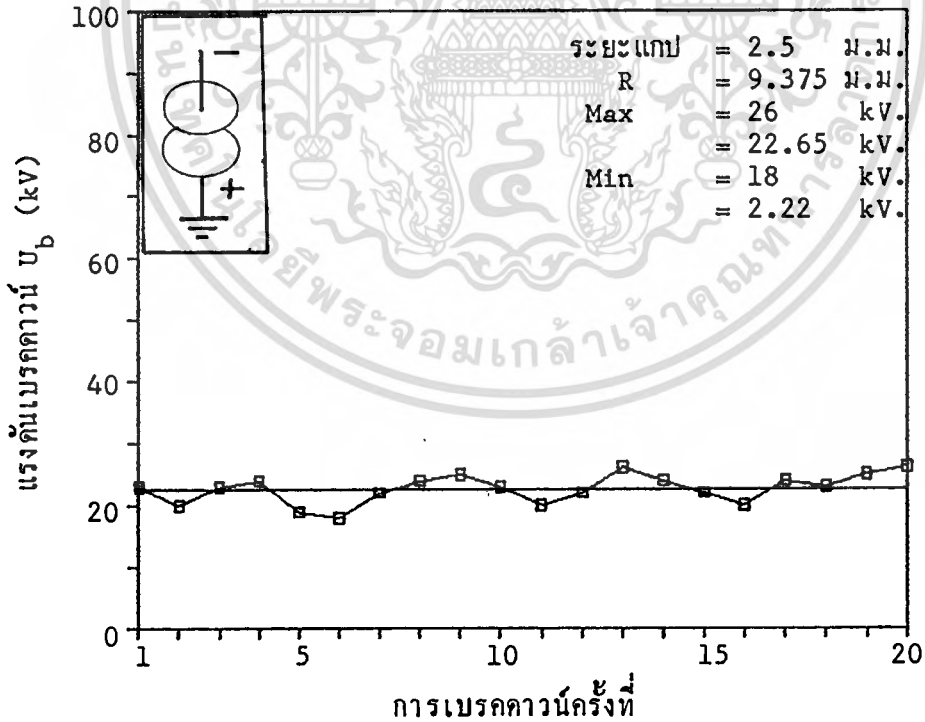
ข) ค่าแรงดันเบรคควานต่อเนื่อง

รูปที่ 7.5.2 แสดงแรงดันเบรคควานและความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารในเทอมระยะแกป(ก) และการปรับตัวของฉนวน(ข) โดยยิลีค โตรัดจันกลม-จันกลม
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ทำมาจากทองเหลือง มีรัศมี 6.25 ม.ม อุณหภูมิ 29 °C



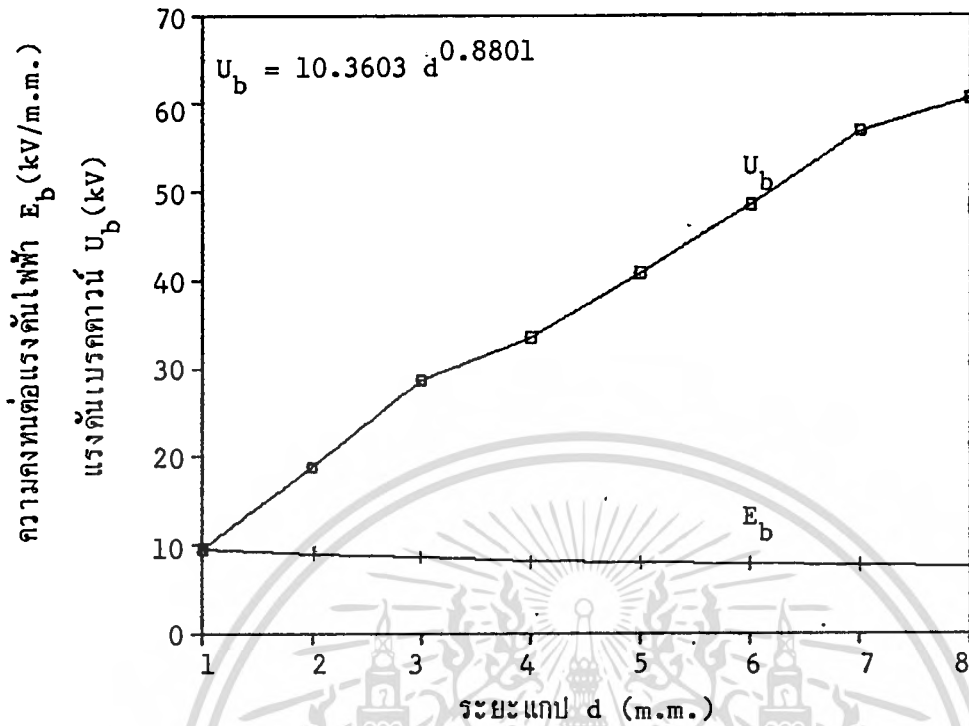
ก) แรงดันเบรคดาวน์และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในเทอมของระยะแกป



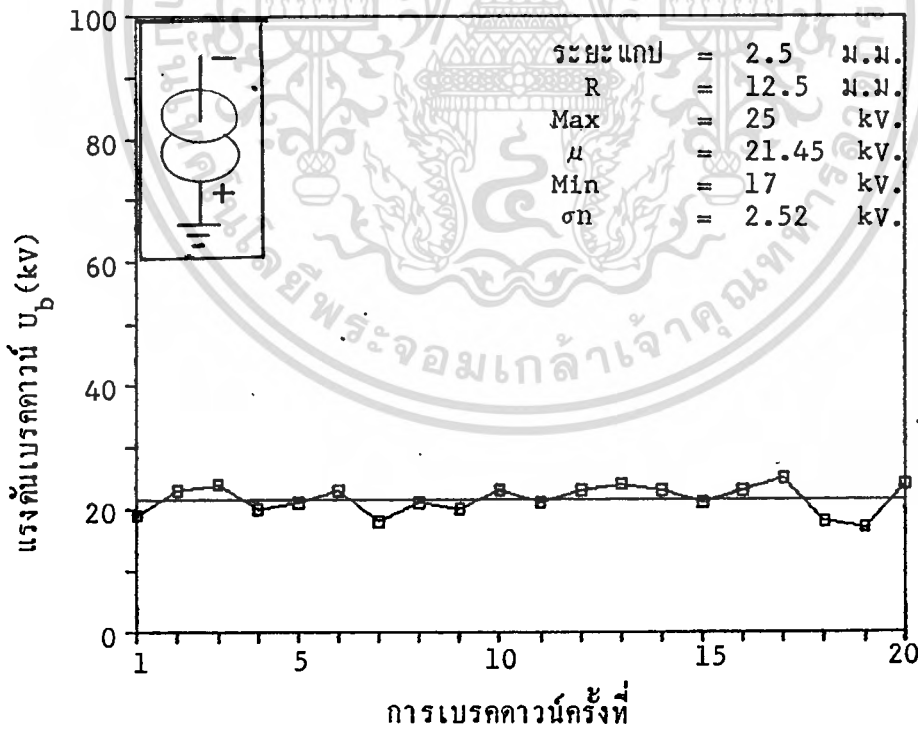
ข) ค่าแรงดันเบรคดาวน์ต่อเนื่อง

รูปที่ 7.5.3 แสดงแรงดันเบรคดาวน์และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารในเทอมระยะแกป(ก)และการปรับตัวของฉนวน(ข) โดยอิลีค โดโรต์จันกลม-จันกลมา
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ทำมาจากทองเหลือง มีรัศมี 3.125 ม.ม อุณหภูมิ 28 °C



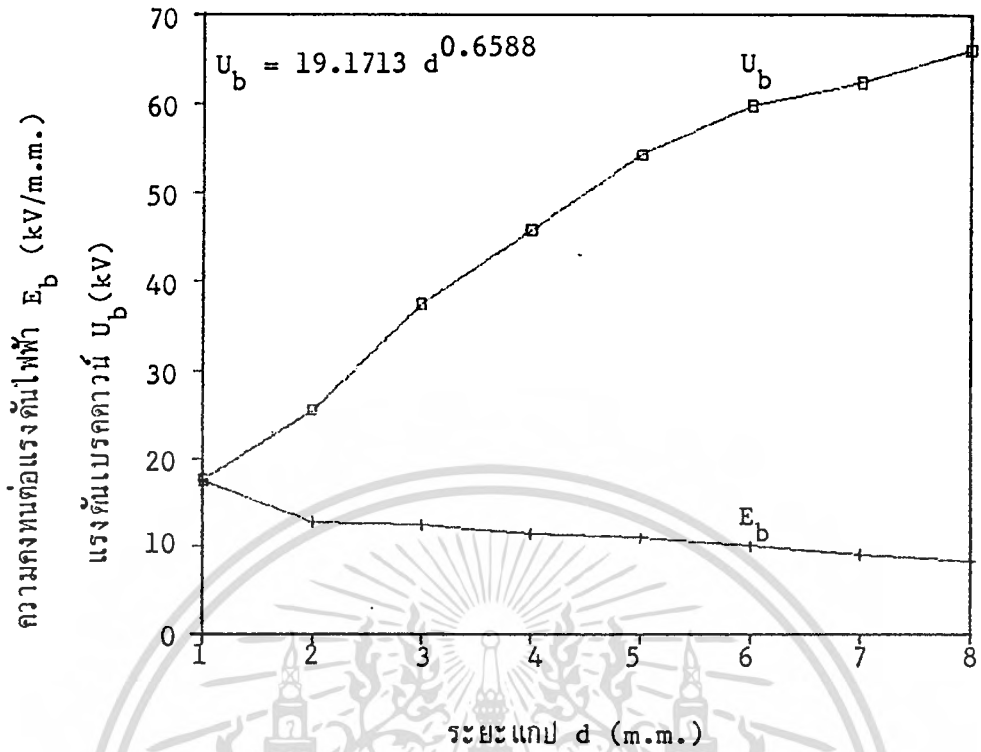
ก) แรงดันเบรกดาวนและความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในเทอมของระยะแกป



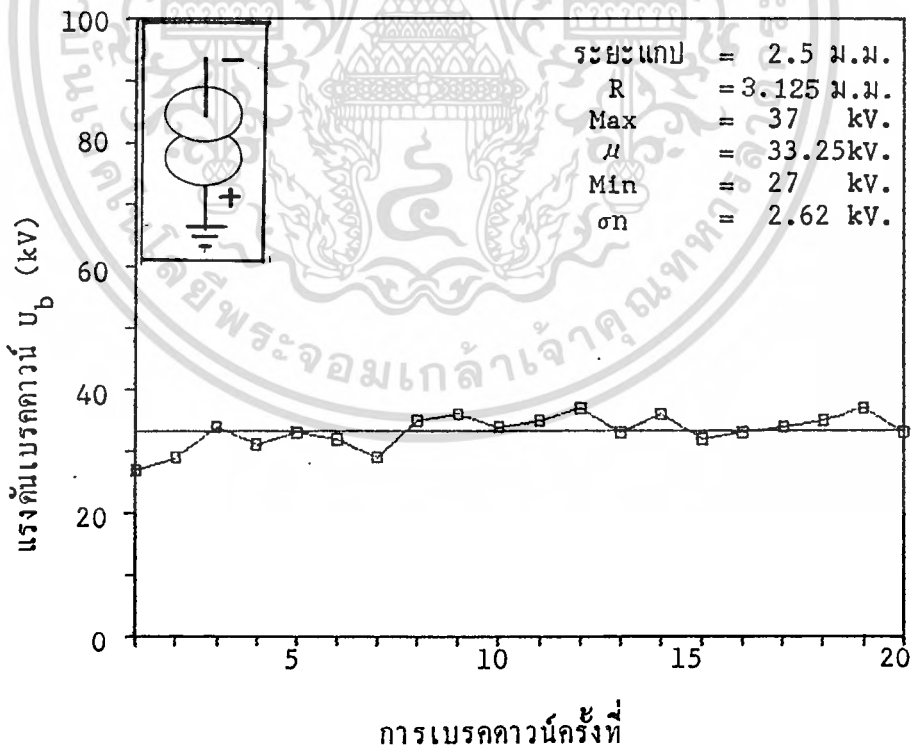
ข) ค่าแรงดันเบรกดาวนต่อเนื่อง

รูปที่ 7.5.4 แสดงแรงดันเบรกดาวนและความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารในเทอมระยะแกป(ก) และการปรับตัวของฉนวน(ข) โดยอิลีคโตรดจางนกลม-จางนกลมา
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนั้นก็ขอสงวนสิทธิ์ในค่าที่ได้แสดงออกมา และต่อจากนี้จึงจะออกเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ทำมาจากทองเหลือง มีรัศมี 1.563 ม.ม อุณหภูมิ 30 °C



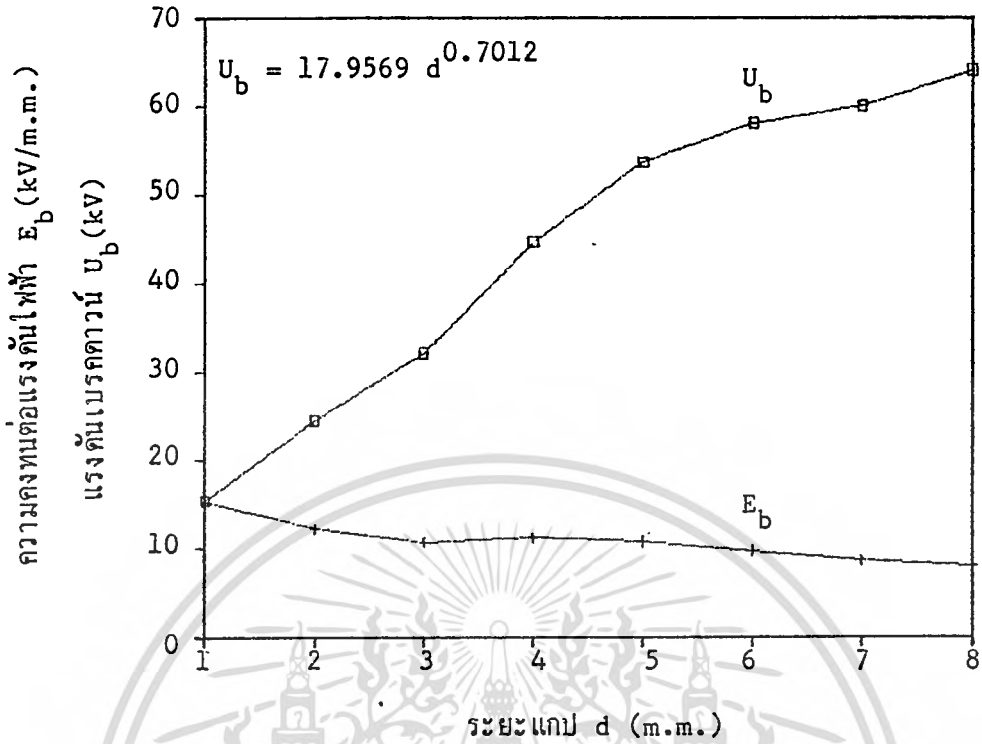
ก) แรงดันเบรคดาวน์และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในเทอมของระยะแกป



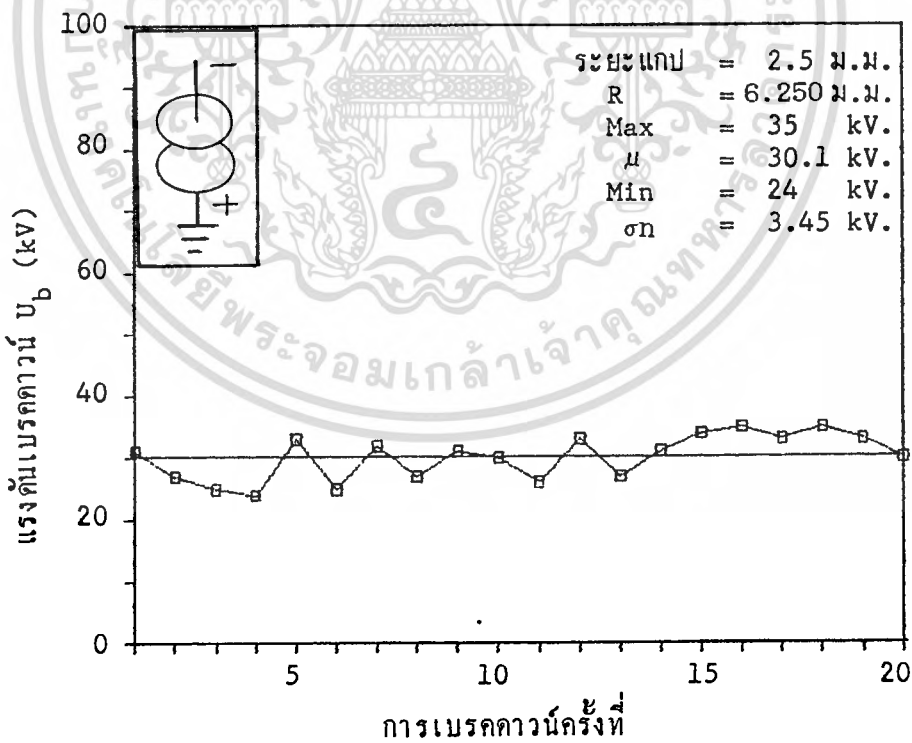
ข) ค่าแรงดันเบรคดาวน์ต่อเนื่อง

รูปที่ 7.5.5 แสดงแรงดันเบรคดาวน์และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในน้ำมันถั่วเหลือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การสงวนสิทธิ์การศึกษาค้นคว้า โดยอิลีค โตรค
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีงานวิจัยที่นำมาจากห้องทดลองมีรัศมี 12.5 ม.ม ออกหมุมิ 29 °C



ก) แรงดันเบรคตาวาน์และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในเทอมของระยะแกป

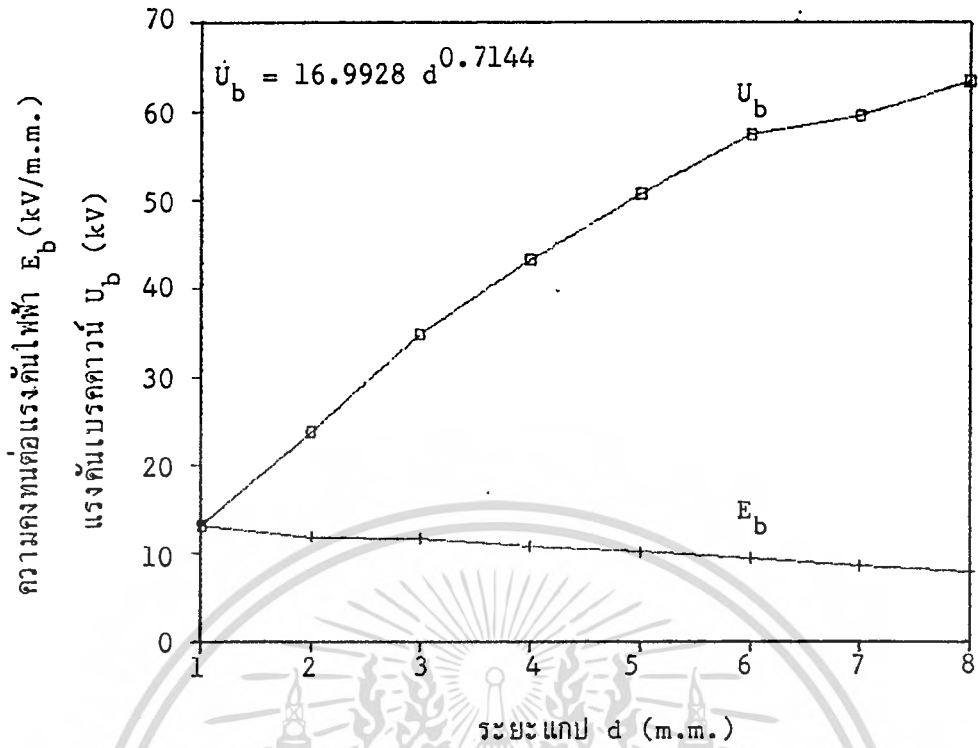


ข) ค่าแรงดันเบรคตาวาน์ต่อเนื่อง

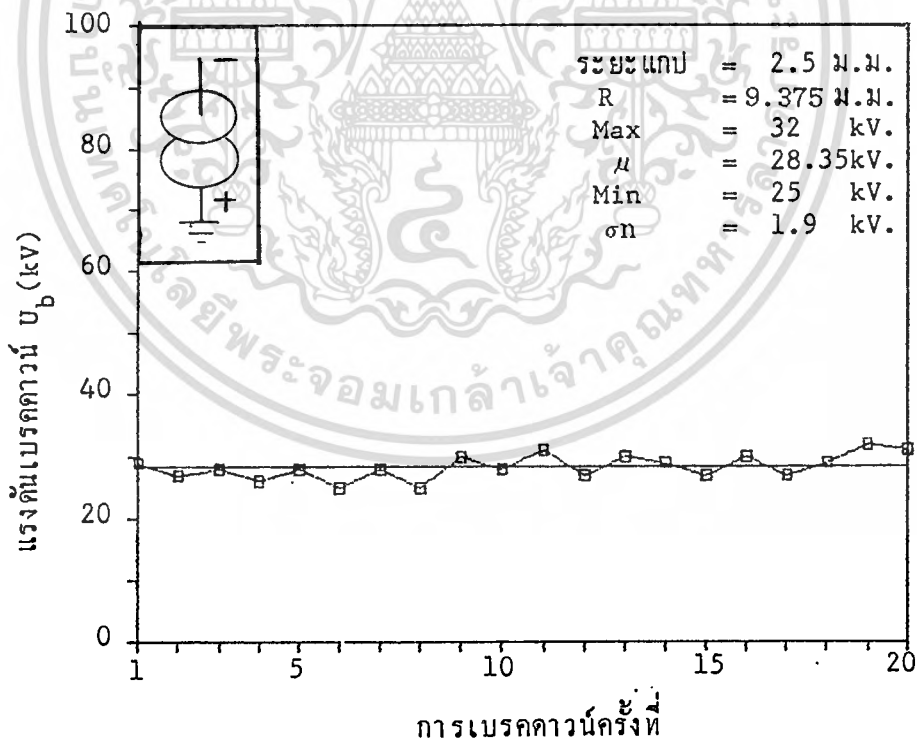
รูปที่ 7.5.6 แสดงแรงดันเบรคตาวาน์และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในน้ำมันถั่วเหลือง

ในเทอมระยะแกป(ก) และการปรับตัวของจำนวน(ข) โดยอิลีคโตรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นว่าไม่เหมาะสมกับการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกจำนวน-จำนวน ทำมาจากทองเหลืองมีรัศมี 6.25 ม.ม อุณหภูมิ 28 °C ใช้



ก) แรงดันเบรคตาวาน์และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในเทอมของระยะแกป

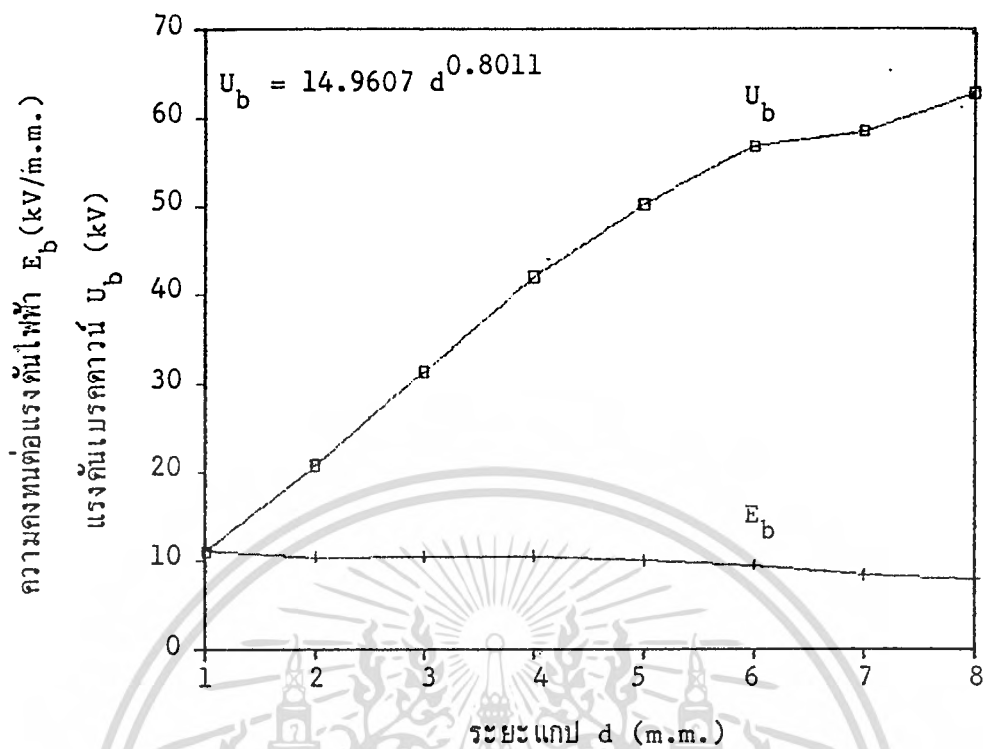


ข) ค่าแรงดันเบรคตาวาน์ต่อเนื่อง

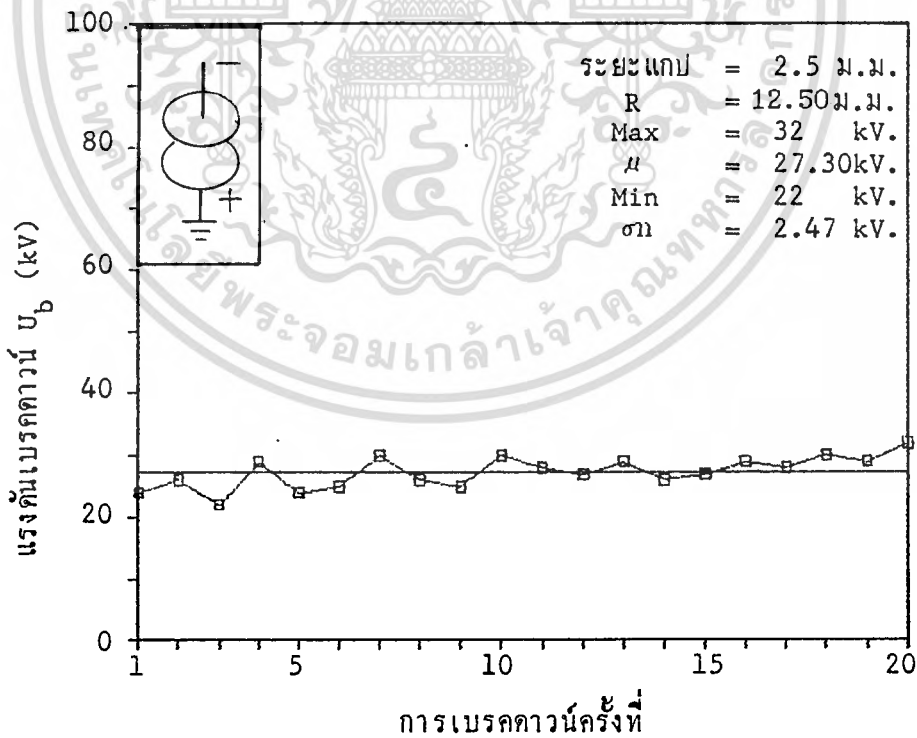
รูปที่ 7.5.7 แสดงแรงดันเบรคตาวาน์และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในน้ำมันถั่วเหลือง

ในเทอมระยะแกป(ก) และการปรับตัวของฉนวน(ข) โดยอิลีคโตรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอรรถา
งานกลม-งานกลม ทำมาจากทองเหลืองมีรัศมี 3.125 ม.ม ออกฤทธิ์ที่ 29 °C
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) แรงดันเบรคตาวานและความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในทอมของระยะแกป



ข) ค่าแรงดันเบรคตาวานต่อเนื่อง

รูปที่ 7.5.8 แสดงแรงดันเบรคตาวานและความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในน้ำมันถั่วเหลือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนในทอมระยะแกป(ก) และการปรับตัวของจนวน(ข) มาโดยอิล็คโตรดการค้ำ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามที่จะนำข้อมูลนี้ไปเผยแพร่หรือใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใด
จนวนกลม-จนวนกลม ทำมาจากทองเหลือง มีรัศมี 1.563 ม.ม อุณหภูมิ 28 °C

7.6 การทดลองที่ 3

การทดลองนี้เป็นการศึกษาผลของรูปทรงทางเรขาคณิตของอิเล็กโตรดต่อแรงดันเบรกดาวน์ โดยใช้อิเล็กโตรดรูปแบบต่างๆดังนี้ แบบใหม่ พื้นระนาบ(โรโกสกี) จานกลม-จานกลม ทรงกลม-พื้นระนาบ ทรงกลม-ทรงกลม จุด-พื้นระนาบ พื้นระนาบ-จุด และอิเล็กโตรดต่างๆมีส.ป.ส.แพคเตอร์สนามไฟฟ้าในตารางที่ 7.6 ผลการทดลองในรูปที่ 7.6.1 - 7.6.14 แสดงการกระจายของแรงดันเบรกดาวน์ของน้ำมันทดสอบ โดยใช้อิเล็กโตรดรูปทรงทางเรขาคณิตต่างๆกันในตารางที่ 7.6 โดยมี μ เป็นค่าเฉลี่ยเลขคณิต σ เป็นส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน Min และ Max เป็นค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของข้อมูลตามลำดับและผลการทดลองแสดงการเปรียบเทียบในตารางที่ 7.6 จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันเบรกดาวน์ในสนามไฟฟ้าสมำเสมอ(แบบใหม่ พื้นระนาบ จานกลม-จานกลม) มีแรงดันเบรกดาวน์ใกล้เคียงกัน ค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่ได้จากอิเล็กโตรดแบบใหม่มีค่าต่ำสุด และในสนามไฟฟ้าแบบไม่สมำเสมอ แรงดันเบรกดาวน์จะมีค่าสูงขึ้นตามค่า ส.ป.ส.แพคเตอร์สนามไฟฟ้าและจะมีค่ามากกว่าในสนามไฟฟ้าแบบสมำเสมอ ทั้งนี้เนื่องมาจากการบิดเบือนแรงดันไฟฟ้า ขั้วลบ เข้ากับระบบอิเล็กโตรด มีผลให้เกิดประจุค้าง ซึ่งมีผลให้ค่าแรงดันเบรกดาวน์ในสนามไฟฟ้าไม่สมำเสมอมีค่าสูงกว่าในสนามไฟฟ้าสมำเสมอ ดูหัวข้อ 7.10

การทดลองศึกษาผลของรูปทรงทางเรขาคณิตของอิเล็กโตรดต่อแรงดันเบรกดาวน์ โดยใช้อิเล็กโตรดแบบต่างๆ เพื่อจำลองรูปแบบของสนามไฟฟ้าในลักษณะต่างๆที่มีโอกาสเกิดในอุปกรณ์ไฟฟ้า เนื่องจากความแตกต่างของรูปทรงทางเรขาคณิตของอิเล็กโตรดทำให้รูปแบบของสนามไฟฟ้าต่างกันออกไป การดีสชาร์จในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงผ่านฉนวนไฟฟ้า ไม่สามารถบอกได้ว่าตำแหน่งใดที่จะเกิดการดีสชาร์จ บอกได้แต่เพียงโอกาสเกิดดีสชาร์จมากที่สุดตรงบริเวณมุมหรือปลายแหลม ดังนั้นเพื่อป้องกันการดีสชาร์จของฉนวนอื่นเนื่องมาจากรูปแบบของสนามไฟฟ้า จึงได้ทำการทดสอบรูปทรงทางเรขาคณิตแบบต่างๆเพื่อความมั่นใจว่าฉนวนเหล่านี้สามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้ดี

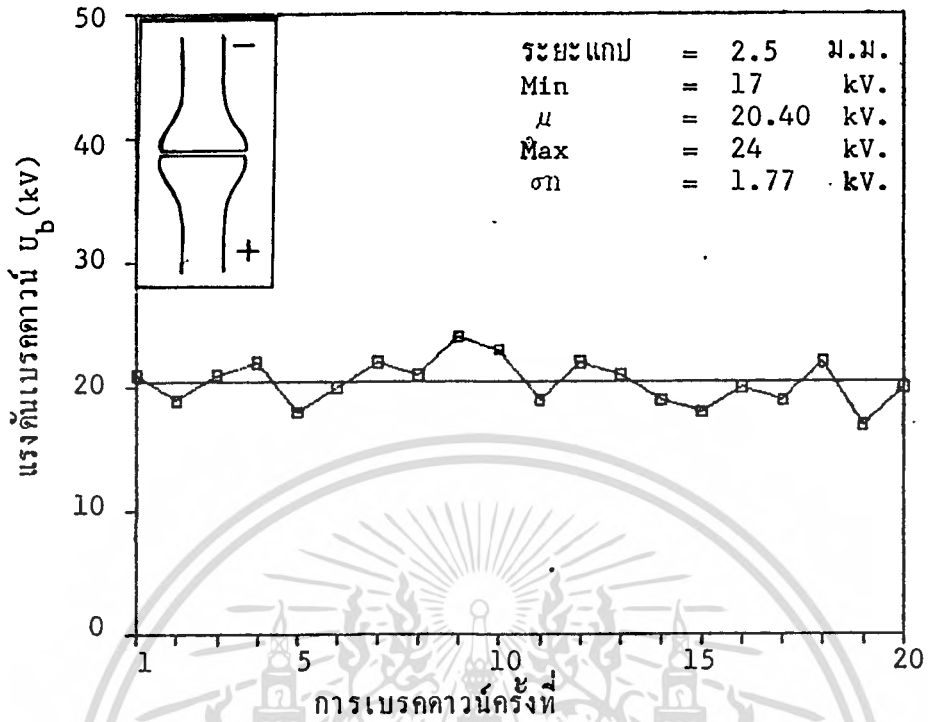
ตารางที่ 7.6 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ของน้ำมันทดสอบ โดยใช้โอเล็คโตรดแบบต่าง ๆ

ที่ระยะแกป 2.5 มม. อุณหภูมิห้อง

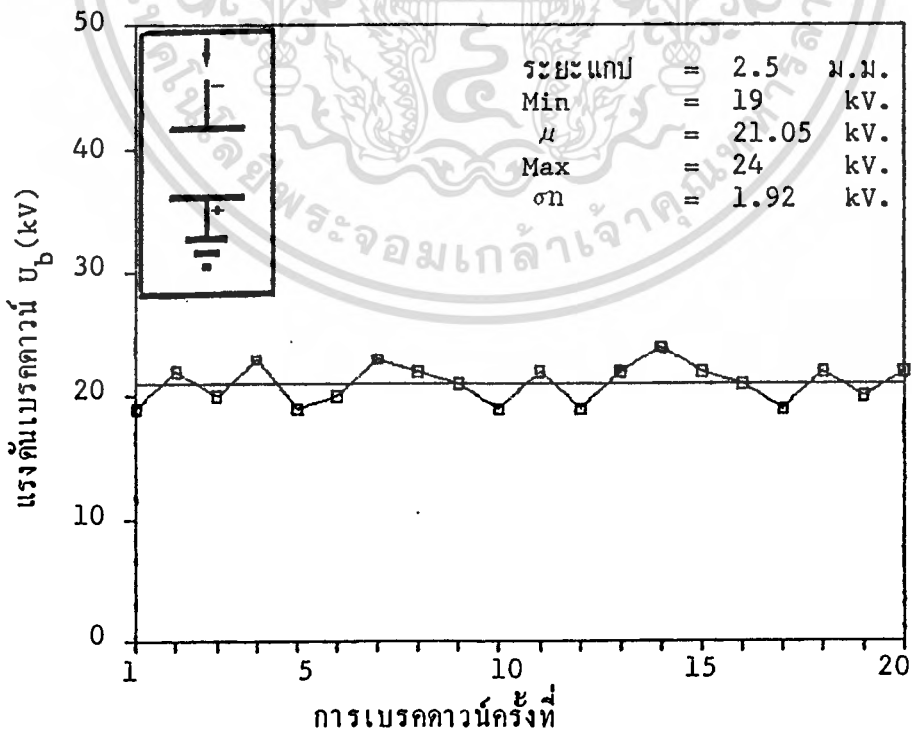
รูปทรงทางเรขาคณิต ของระบบโอเล็คโตรด	ส.ป.ส.แฟคเตอร์ ของสนามไฟฟ้า (f)	กาลเท็ทซ์ kV	ถั่วเหลือง kV	รำข้าว kV	ปาล์ม kV
1. แบบใหม่	1	20.40	26.30	25.8	24.1
2. พีระนาบ(โรโคสกี)	~ 1	21.05	26.85	-	-
3. จานกลม-จานกลม	~ 1	21.45	27.00	-	-
4. ทรงกลม-พีระนาบ	1.161	22.90	27.90	-	-
5. ทรงกลม-ทรงกลม	1.133	22.55	28.40	28.60	27.30
6. ทรงกระบอก-พีระนาบ	3	23.05	29.65	-	-
7. จุด-พีระนาบ	41.667	29.90	33.40	31.84	30.62
8. พีระนาบ-จุด	0.024	17.8	21.9	20.30	19.8

จากตารางที่ 7.6 จะเห็นได้ว่าแรงดันเบรคดาวน์จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า ส.ป.ส.แฟคเตอร์ สนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อ ส.ป.ส. แฟคเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น มีผลให้รูปแบบของสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากขึ้น เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าขึ้น จะเกิดประกายในสนามไฟฟ้ามากขึ้น แรงดันเบรคดาวน์จะเพิ่มมากขึ้นไปด้วย สำหรับแรงดันเบรคดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้ากาลเท็ทซ์ มีการเบรคดาวน์อยู่ในช่วง 17.8 - 29.9 kV เมื่อนำไปใช้งานในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจริงสามารถทนแรงดันได้ 17.8 - 29.9 kV สำหรับน้ำมันถั่วเหลืองสามารถทนแรงดันเบรคดาวน์ได้จริง 21.9 - 33.4 kV และ 42.92 - 65.46 kV สำหรับไฟฟ้ากระแสสลับ จะ

เห็นได้ว่าน้ำมันถั่วเหลืองมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าหรือค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าน้ำมันหม้อ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
แปลงไฟฟ้ากาลเท็ทซ์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

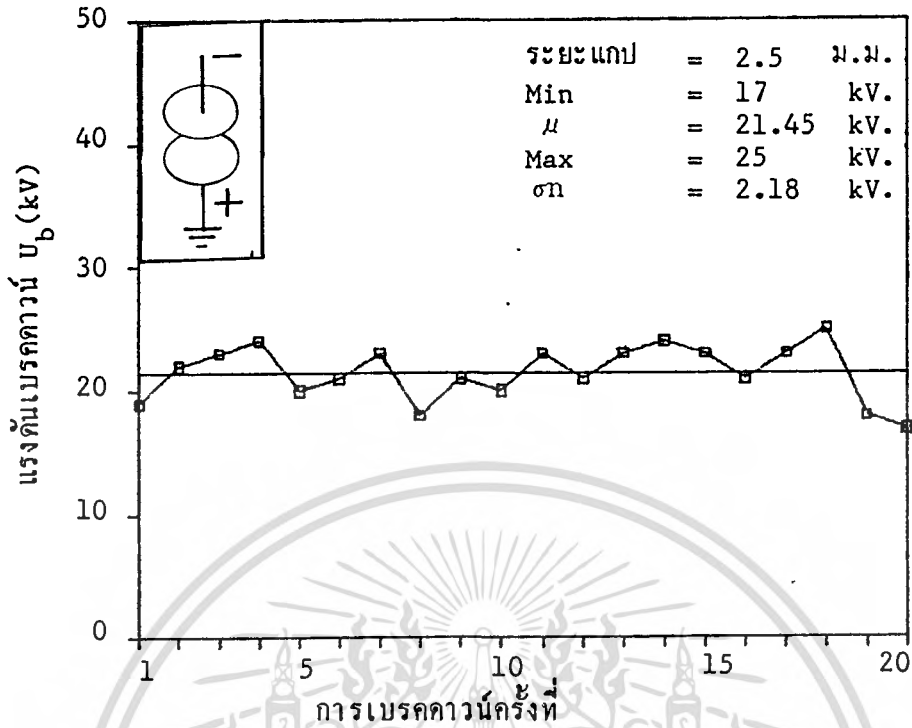


รูปที่ 7.6.1 แสดงแรงดันเบรคตาวาน์ของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์ โดยอิลีคโตรดแบบใหม่ ทำจากทองเหลือง อุณหภูมิ 29 °C



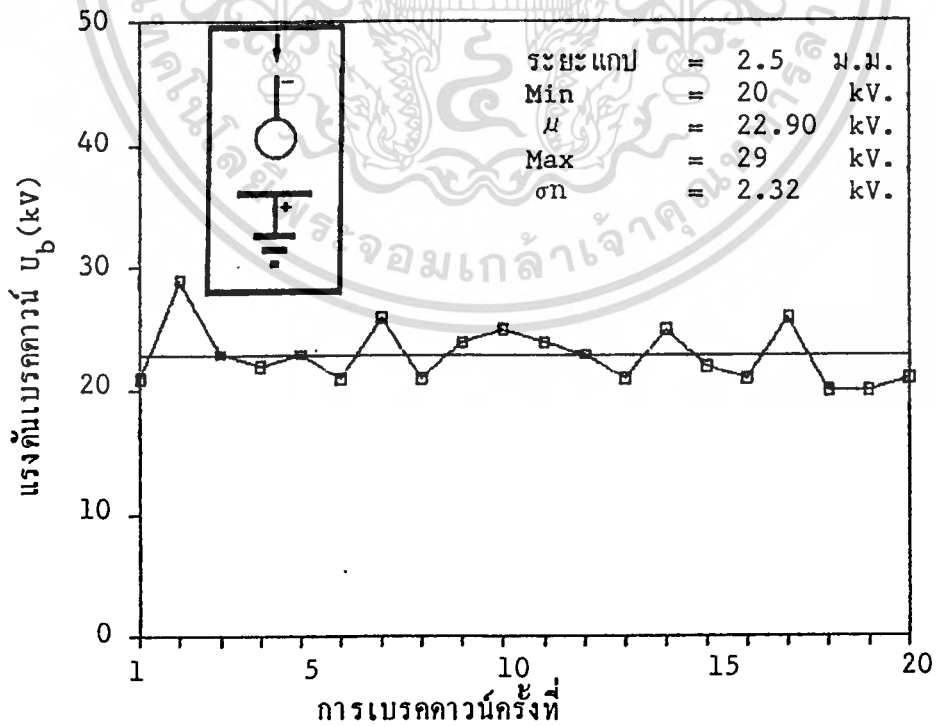
รูปที่ 7.6.2 แสดงแรงดันเบรคตาวาน์ของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์ โดยอิลีคโตรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับวารสารวิชาการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
พนระนาบ(ไรโกสกี) ทำจากทองเหลือง อุณหภูมิ 30 °C
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



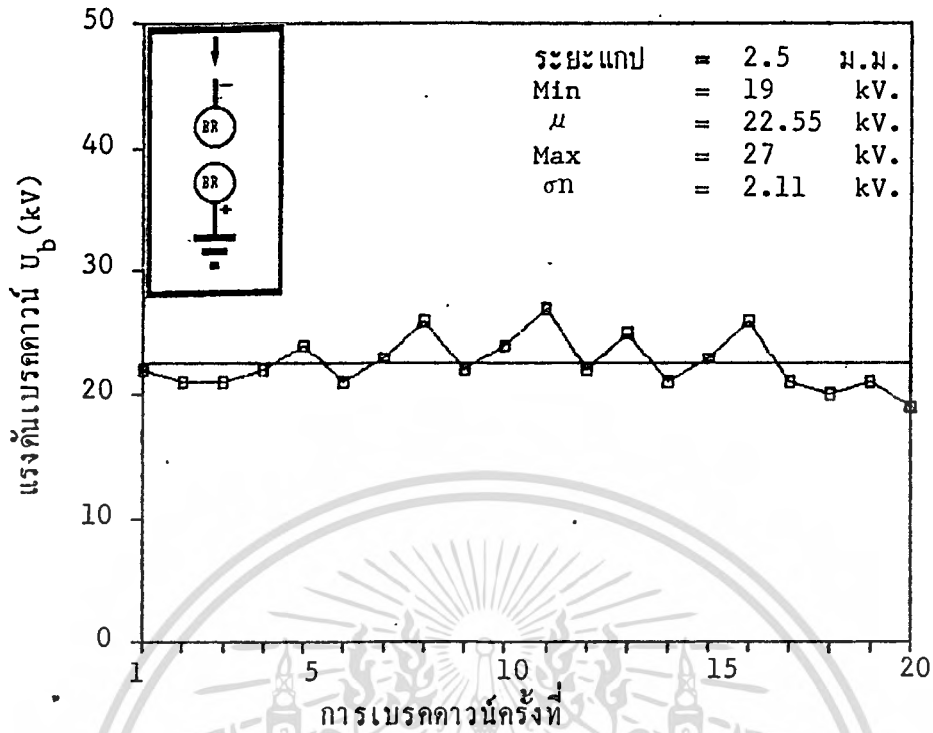
รูปที่ 7.6.3 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าศาลเท็กซ์ โดยอิเล็กทรอนิกส์

จานกลม-จานกลม ทำจากทองเหลือง อุณหภูมิ 29 °C

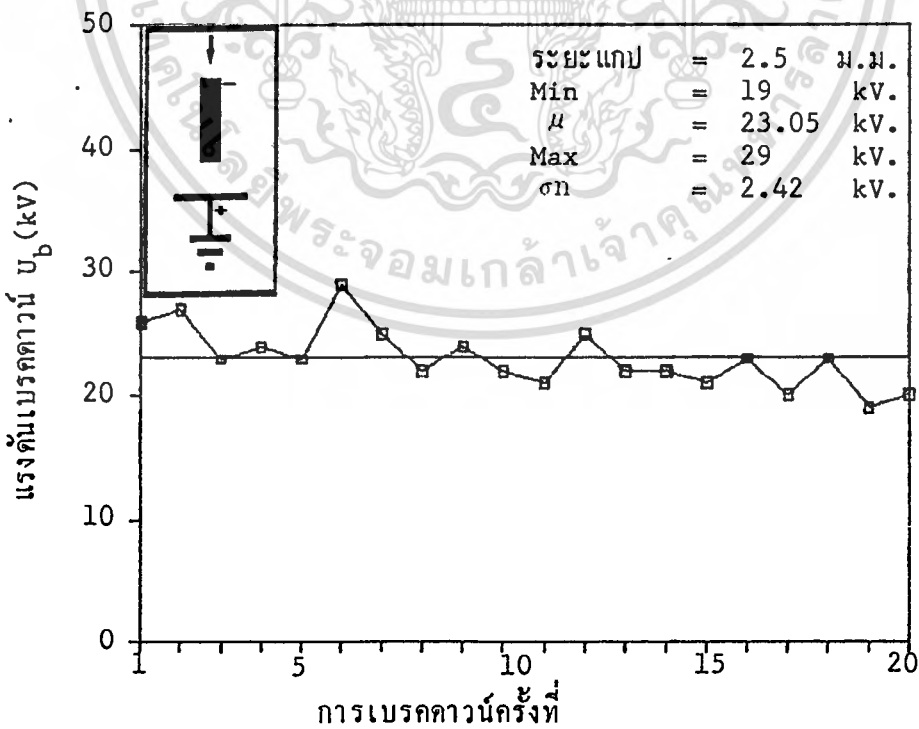


รูปที่ 7.6.4 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าศาลเท็กซ์ โดยอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ทรงกลม-พีระนาบ ทำจากทองเหลือง อุณหภูมิ 28 °C ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

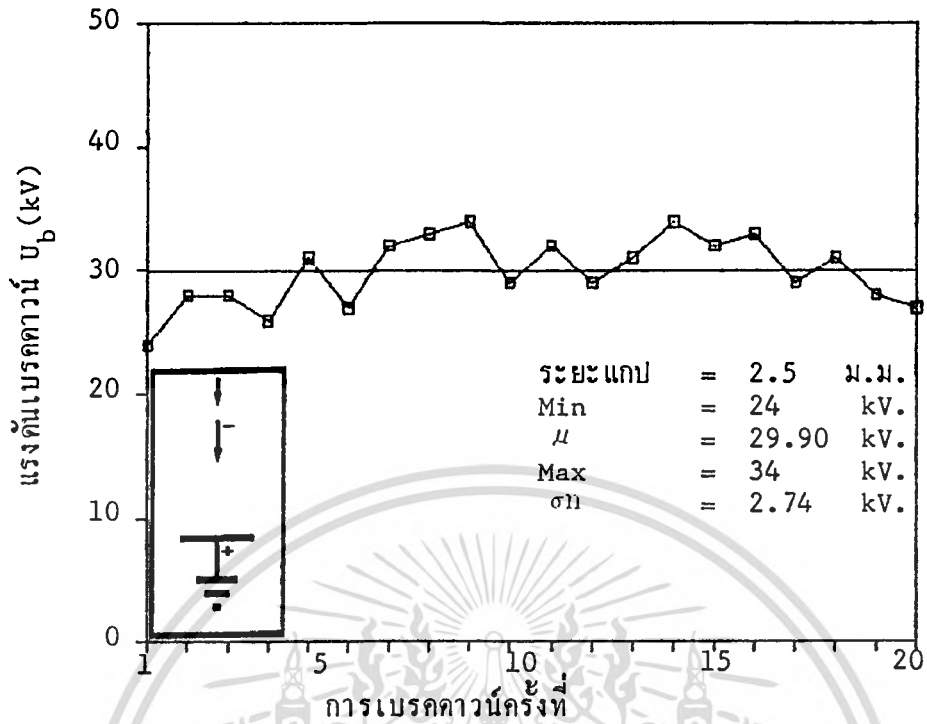


รูปที่ 7.6.5 แสดงแรงดันเบรคตาวานของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์ โดยอิเล็กทรอนิกส์ โครงกลม-ทรงกลม ทำจากทองเหลือง อุณหภูมิ 30 °C

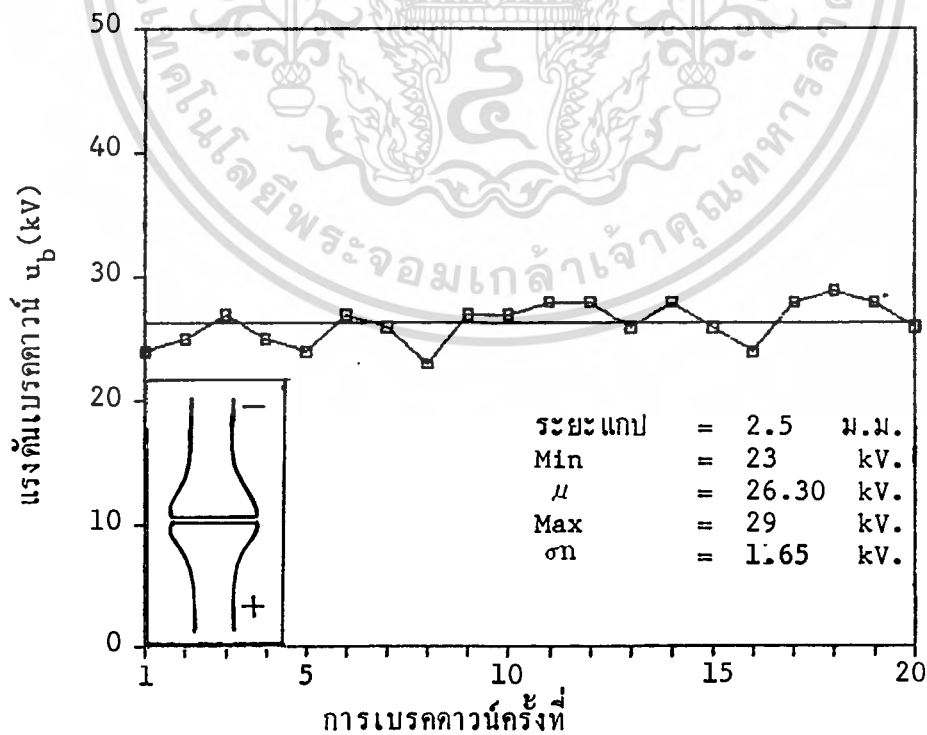


รูปที่ 7.6.6 แสดงแรงดันเบรคตาวานของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์ โดยอิเล็กทรอนิกส์ โครงกระบอ-พื้นระนาบ ทำจากทองเหลือง อุณหภูมิ 29 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้นเพื่อกระตือรือร้นเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
แม้ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

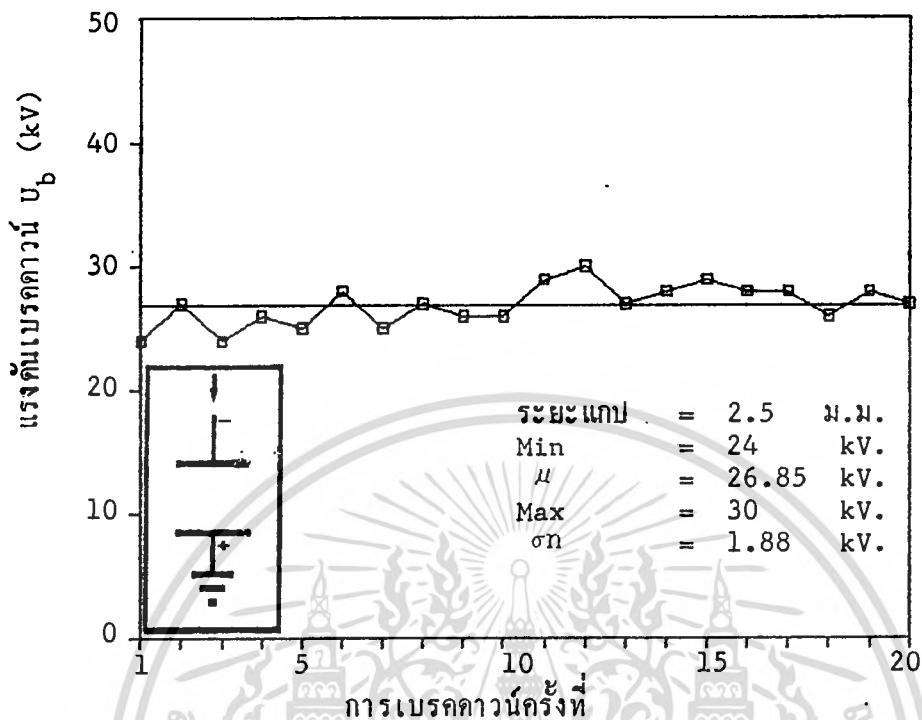


รูปที่ 7.6.7 แสดงแรงดันเบรคตาวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์ โดยอิเล็กทรอนิกส์
แบบจุด-พีระนาบ ทำจากทองเหลือง อุณหภูมิ 28 °C

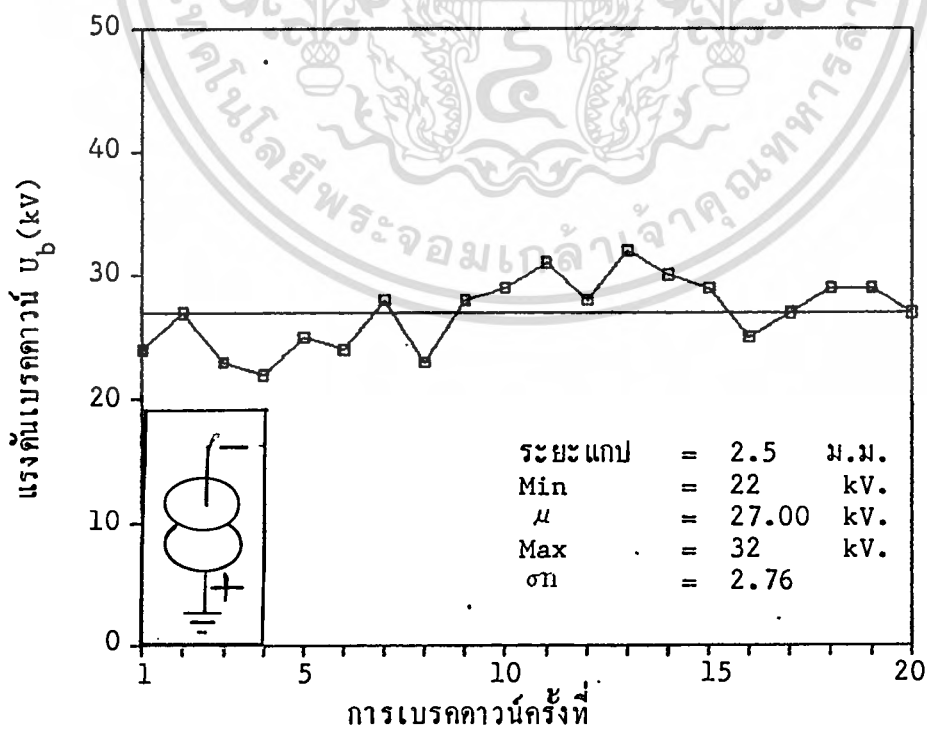


รูปที่ 7.6.8 แสดงแรงดันเบรคตาวนของน้ำมันถั่วเหลือง โดยอิเล็กทรอนิกส์แบบใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

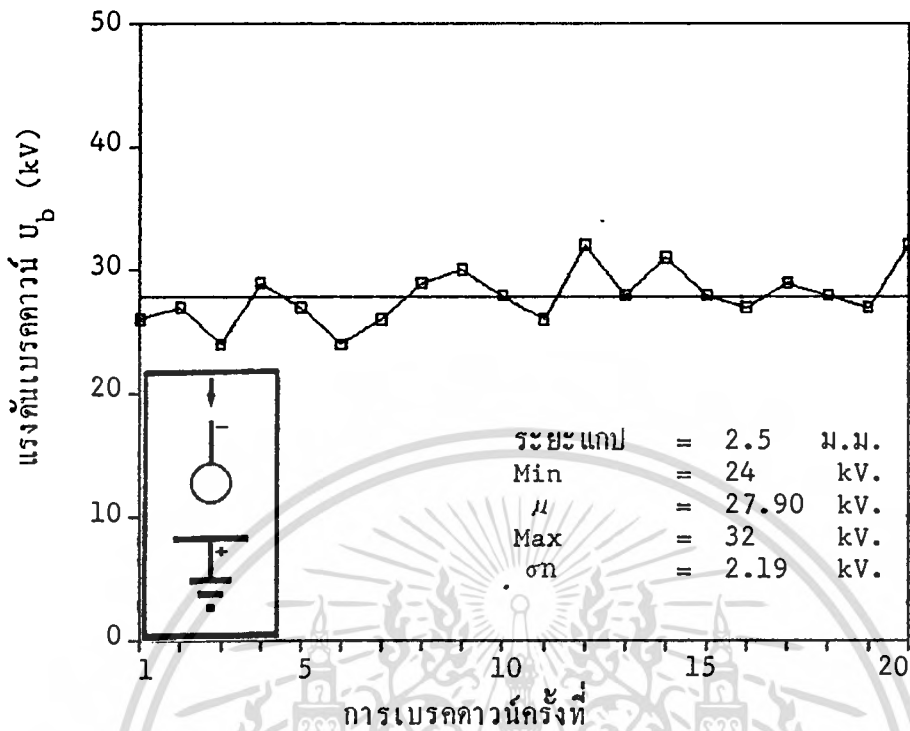


รูปที่ 7.6.9 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ของน้ำมันฉนวนที่ 28 °C
 พื้นระนาบ (โรโกสกี) ทำจากทองเหลือง ออกหมุมิ

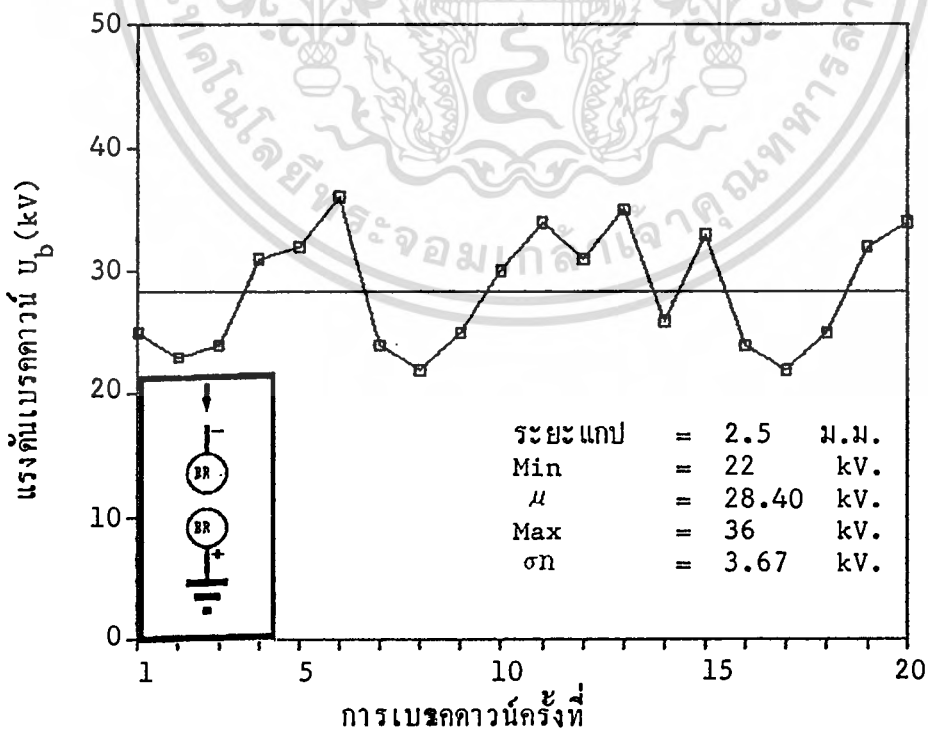


รูปที่ 7.6.10 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ของน้ำมันฉนวนที่ 31 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 งานกลม-งานกลม ทำจากทองเหลือง ออกหมุมิ 31 °C
 ไม่ว่าการณ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

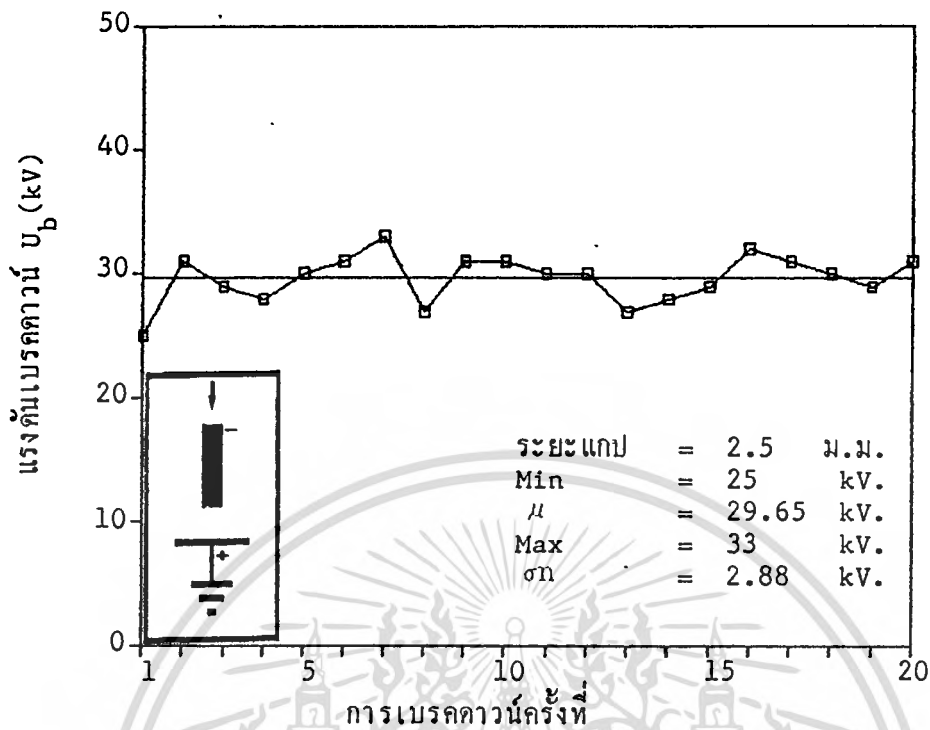


รูปที่ 7.6.11 แสดงแรงดันเบรคตาวานของน้ำมันฉนวน โดยอิเล็กโตรดทรงกลม-เฟ้นระนาบ ทำจากทองเหลือง อุณหภูมิ 27 °C

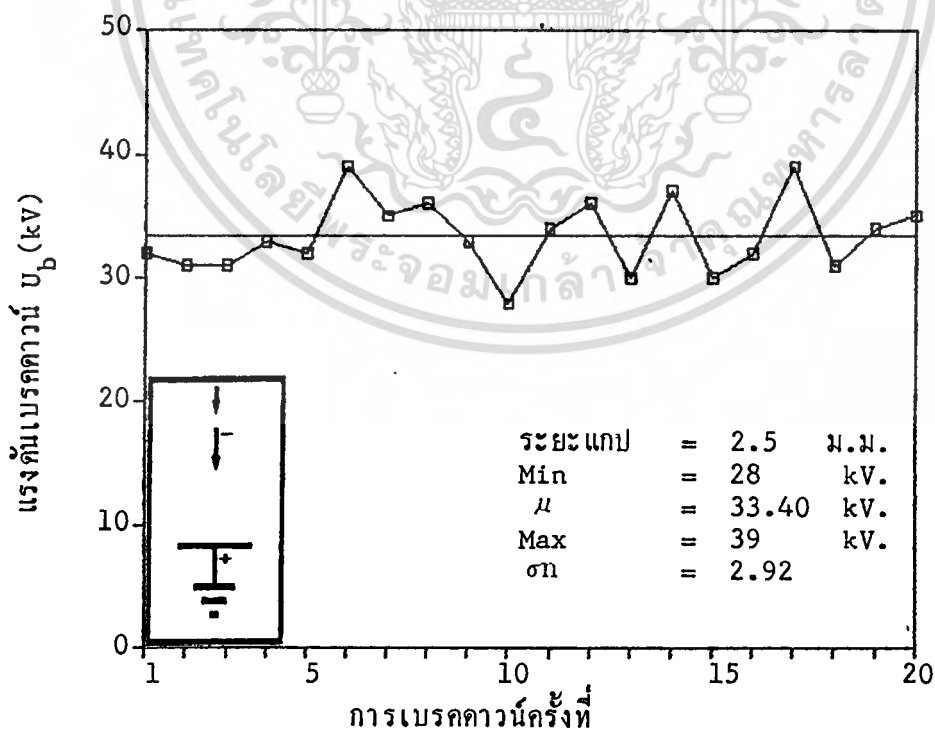


รูปที่ 7.6.12 แสดงแรงดันเบรคตาวานของน้ำมันฉนวน โดยอิเล็กโตรดทรงกลม-ทรงกลม ทำจากทองเหลือง อุณหภูมิ 28 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.6.13 แสดงแรงดันเบรคตาวานของน้ำมันฉนวนทำจากทองเหลือง โดยอีเล็กโตรดทรงกระบอก-พีระนาบ ทำจากทองเหลือง อุณหภูมิ 29 °C



รูปที่ 7.6.14 แสดงแรงดันเบรคตาวานของน้ำมันฉนวนทำจากทองเหลือง โดยอีเล็กโตรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้แบบจุด-พีระนาบ ทำจากทองเหลือง อุณหภูมิ 30 °C ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

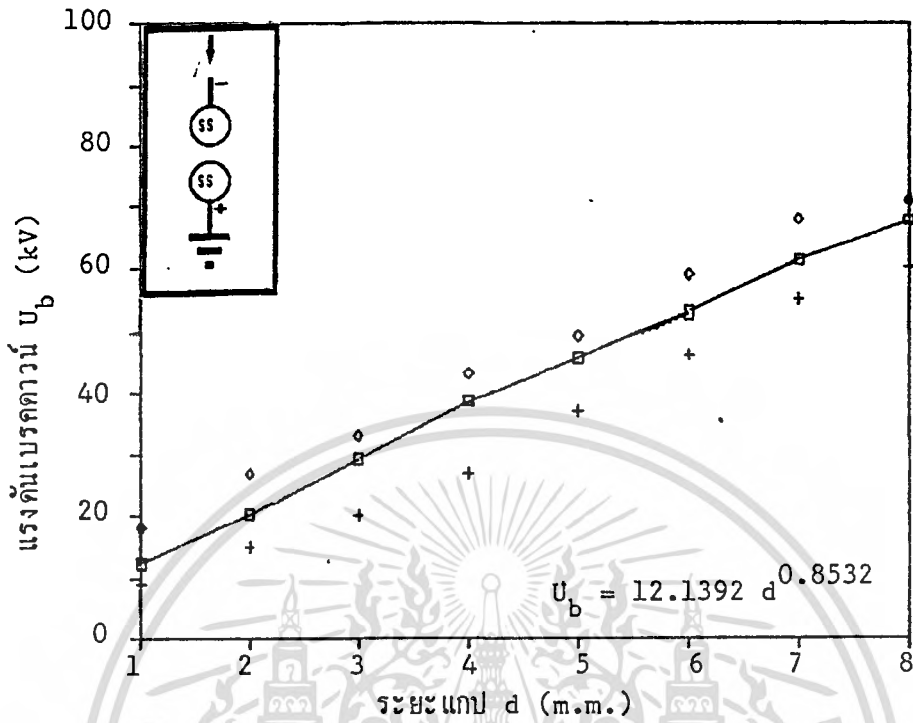
7.7 การทดลองที่ 4

ในการทดลองที่ 4 เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรคดาวน์ในทอมระยะแกป แสดงผลของการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ ระหว่างค่าแรงดันเบรคดาวน์ของฉนวนเหลว น้ำมัน ชนิดต่างๆแปรตามระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดโดยใช้อิเล็กโตรดทำจากโลหะต่างๆ 3 ชนิดและ ผลการสลับขั้วอิเล็กโตรดโดยใช้เหล็กแอสตนเลสกับอลูมิเนียม ผลที่ได้จะเห็นว่าฉนวนเหลว น้ำมันพืช ถั่วเหลืองมีค่าแรงดันเบรคดาวน์สูงกว่าชนิดอื่น ทั้งนี้เนื่องมาจากการพิจารณาโครงสร้างและองค์ประกอบโมเลกุลในน้ำมันถั่วเหลือง ส่วนใหญ่ประกอบด้วยโซ่ของพันธะคู่อยู่น้อยกว่าน้ำมันพืชชนิดอื่นๆ ถ้าพิจารณาตามหลักสมดุลย์ของพลังงานในสมการที่ 2.9 แสดงให้เห็นว่าขบวนการยึดหดและการ ลั่นของพันธะ C—H ในโมเลกุลของน้ำมันต้องใช้พลังงานสูงกว่าพันธะ C=H ถ้าน้ำมันพืชมีพันธะ คู่มากโอกาสเกิดเบรคดาวน์จึงมีมาก เป็นสาเหตุให้แรงดันเบรคดาวน์สูง ผลการทดลองในรูปที่ 7.7.1 - 7.7.20 โดยแยกการแสดงผลเป็น 2 ส่วนคือ ก) แสดงแรงดันเบรคดาวน์ในทอม ระยะแกป ข) แสดงความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในทอมของระยะแกป

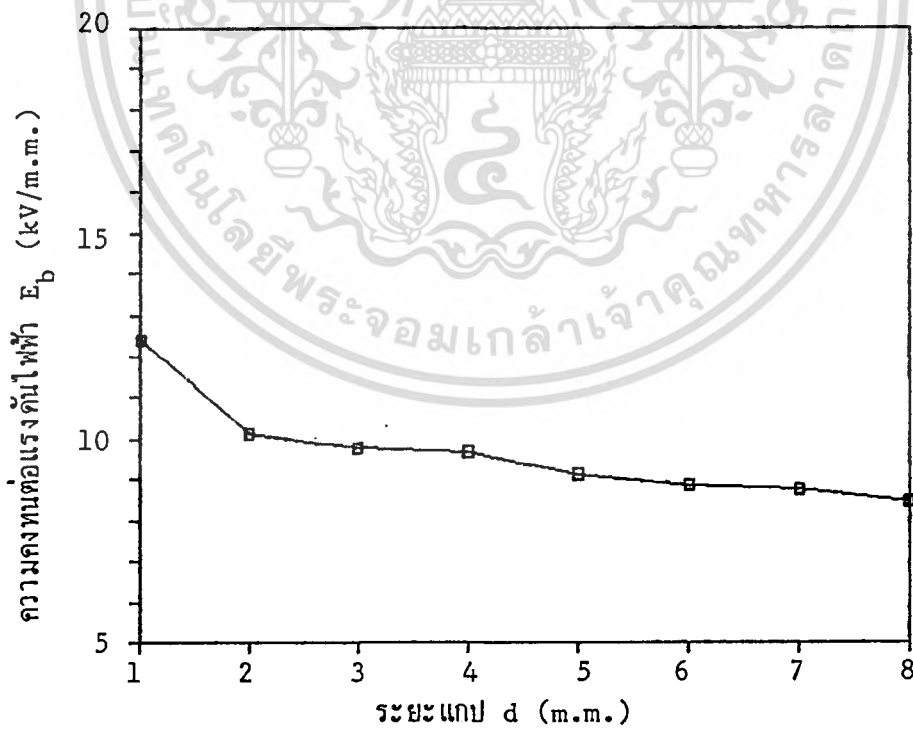
จากความสัมพันธ์ $U_b = k \cdot d^n$ เมื่อระยะแกปมากขึ้นแรงดันเบรคดาวน์ในน้ำมันพืชจะ ไม่สอดคล้องกับสมการข้างต้น เช่นที่ระยะแกป 8 ม.ม. ค่าที่ได้จากการประมาณด้วยสมการนี้กับ ค่าที่ทดลองต่างกัน น้ำมันถั่วเหลืองและน้ำมันชนิดต่างๆ

จากการทดลองในรูปที่ 7.7.1 - 7.7.20 แรงดันเบรคดาวน์ที่ใช้อิเล็กโตรดทำจาก โลหะต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกันมาก แต่แนวโน้มนของเหล็กแอสตนเลสจะให้แรงดันสูงกว่าที่ระยะแกป มากกว่า 2 ม.ม. และผลของการสลับขั้วโดยใช้อิเล็กโตรดเหล็กแอสตนเลสและอลูมิเนียมจะมีค่าแรง ดันเบรคดาวน์สูงกว่าไม่ได้สลับขั้วในช่วงระยะแกป 1 - 3 ม.ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) แรงดันเบรคตาวานในเทอมของระยะแกป

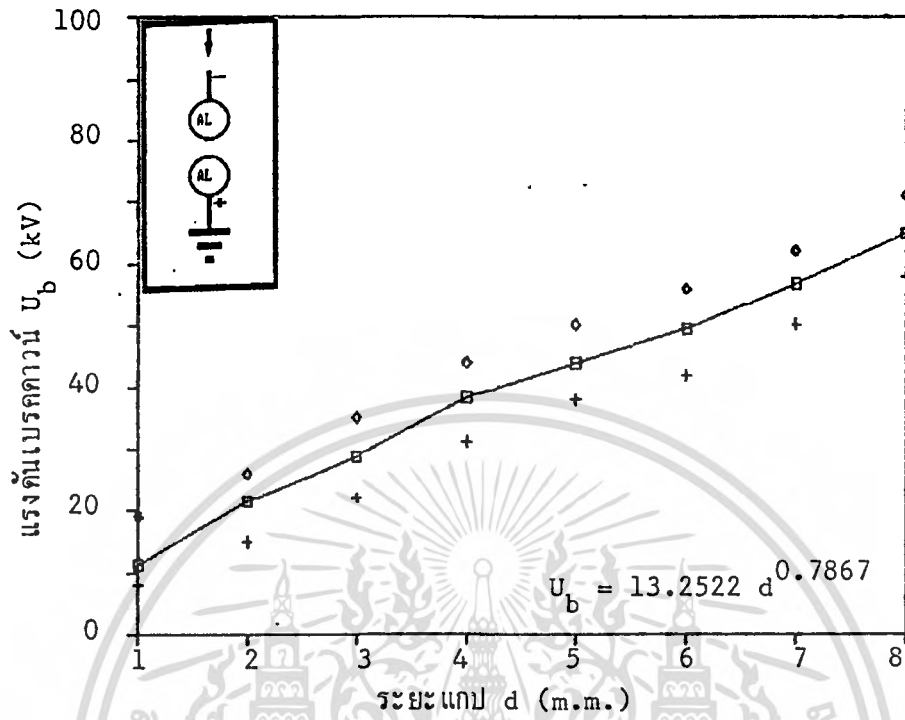


ข) ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในเทอมของระยะแกป

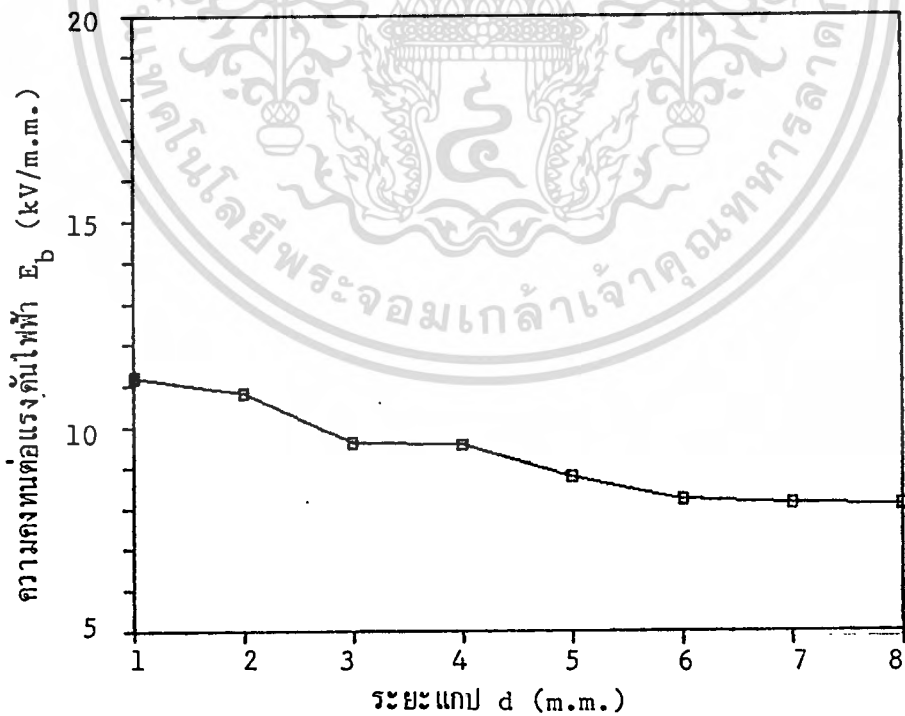
รูปที่ 7.7.1 แสดงแรงดันเบรคตาวาน (ก) และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (ข)

ในเทอมของระยะแกป ในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าศาลทักษิณ โดยอิลีคโตรดทรงกลม-ทรงกลม ทำจากเหล็กสแตนเลส อุณหภูมิ 27 °C

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏในเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) แรงดันเบรคดาวน์ในเทอมของ ระยะแกป

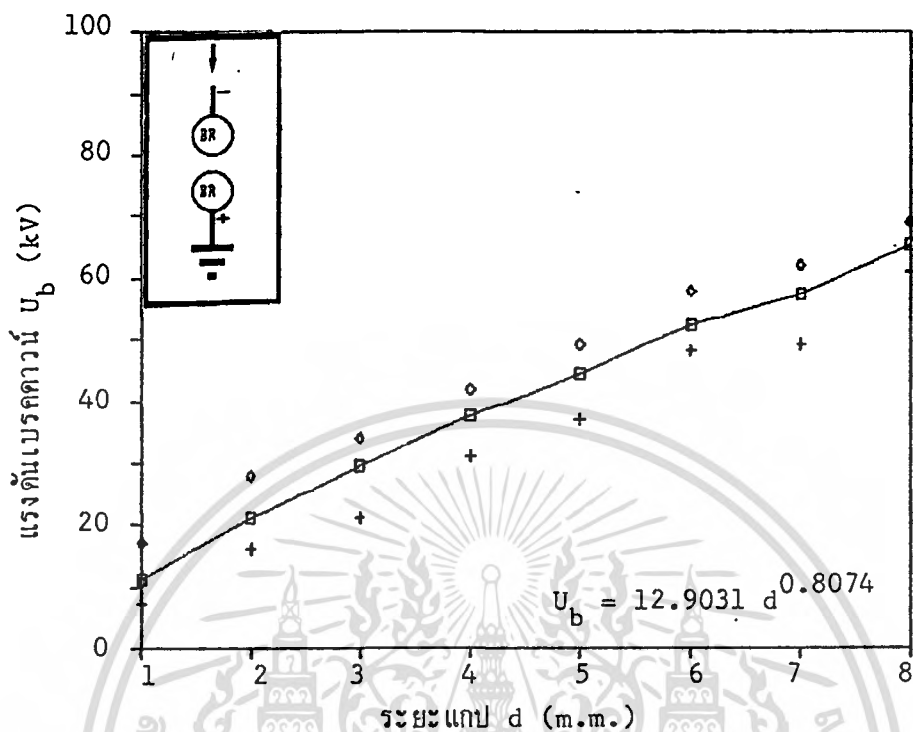


ข) ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในเทอมของ ระยะแกป

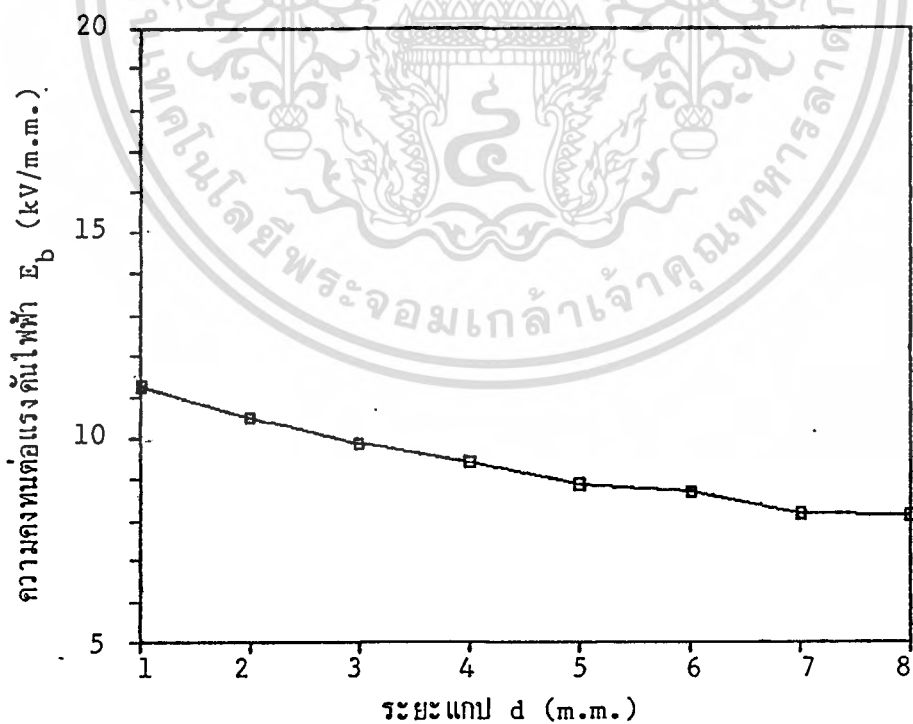
รูปที่ 7.7.2 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ (ก) และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (ข)

ในเทอมของระยะแกป ในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์โดยอิลีคโตรด
ทรงกลม-ทรงกลม ทำจากอลูมิเนียม อุณหภูมิ 28 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของกรมการพลังงานเพื่อการค้าภายใต้เงื่อนไขการใช้งานการค้ำ
ไม่ว่ากรรมใดๆทั้งสิ้น



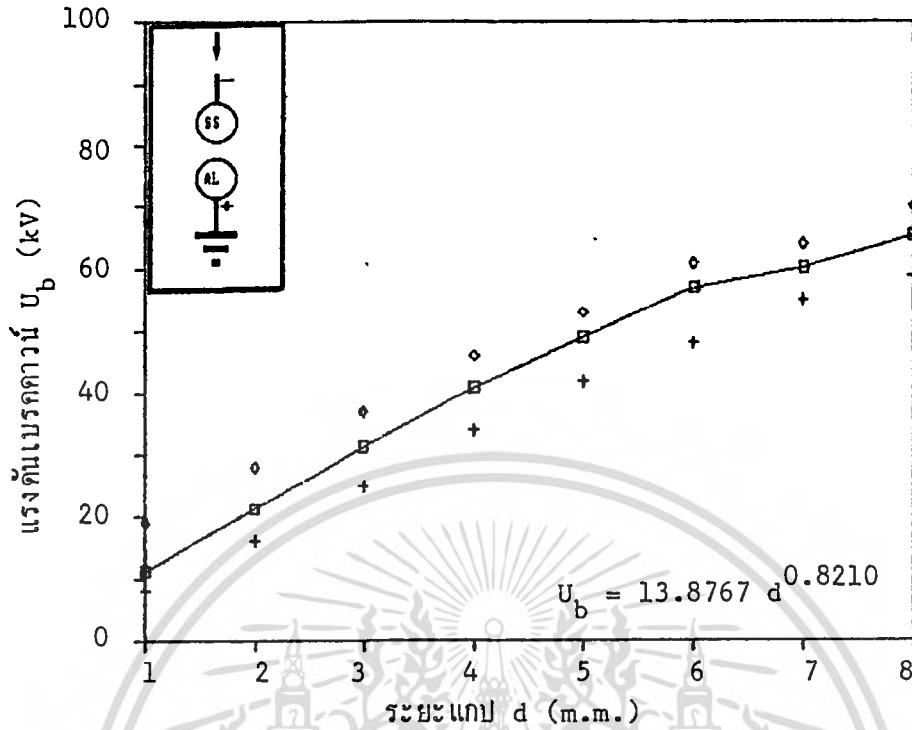
ก) แรงดันเบรคตาวานในเทอมของ ระยะแกป



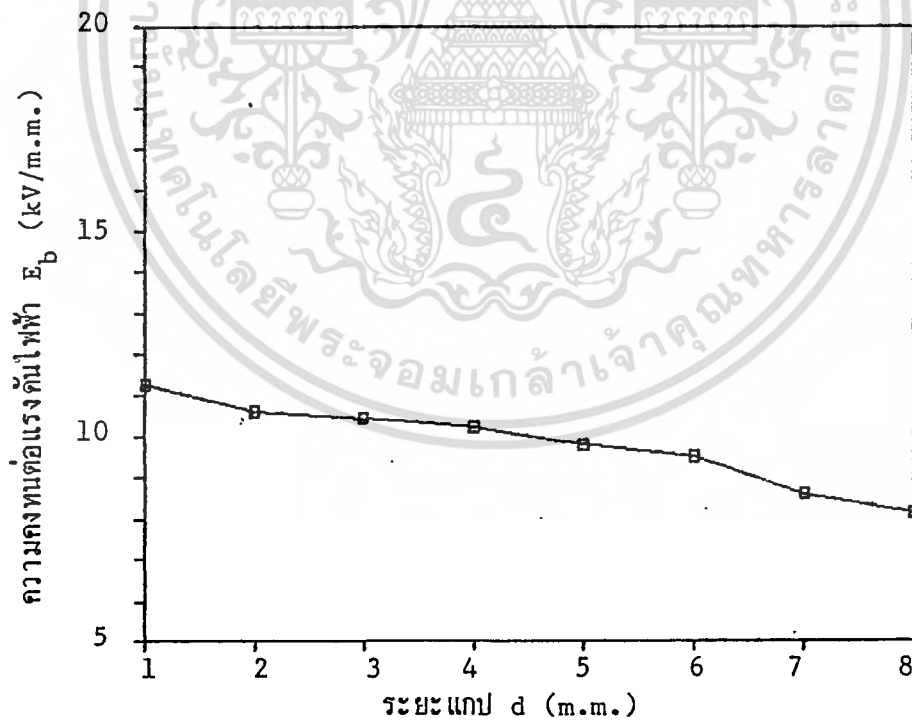
ข) ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในเทอมของ ระยะแกป

รูปที่ 7.7.3 แสดงแรงดันเบรคตาวาน (ก) และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่อยู่ในเทอมของระยะแกป ในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าศาลเท็กซ์โดยอิล็คโตรคด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ที่รังกลม-ทรงกลม ทำจากทองเหลือง อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) แรงดันเบรคความในเทอมของ ระยะแกป

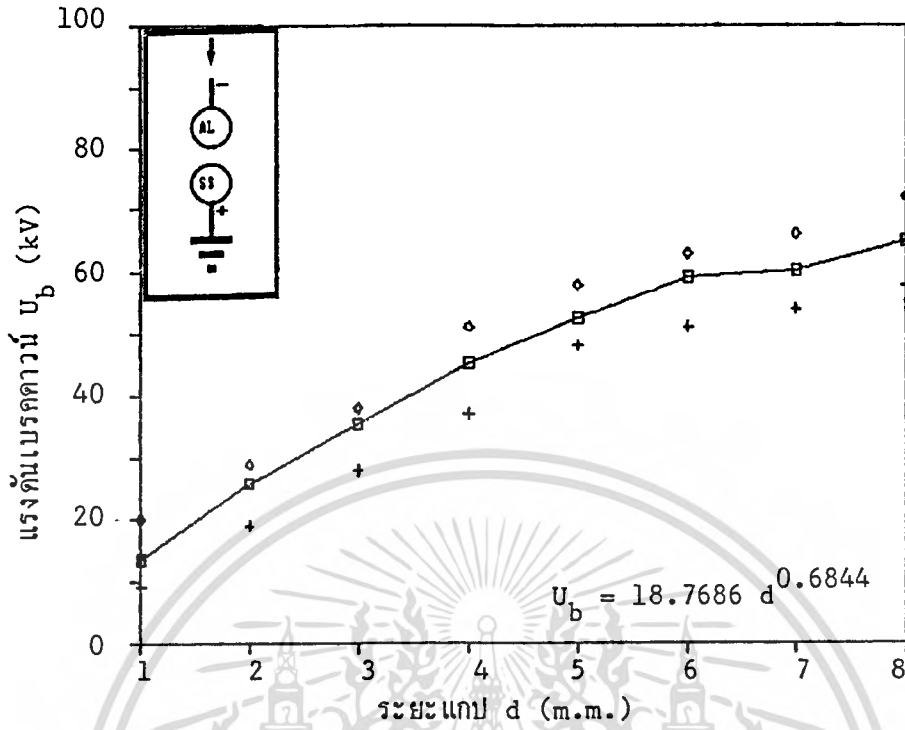


ข) ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในเทอมของ ระยะแกป

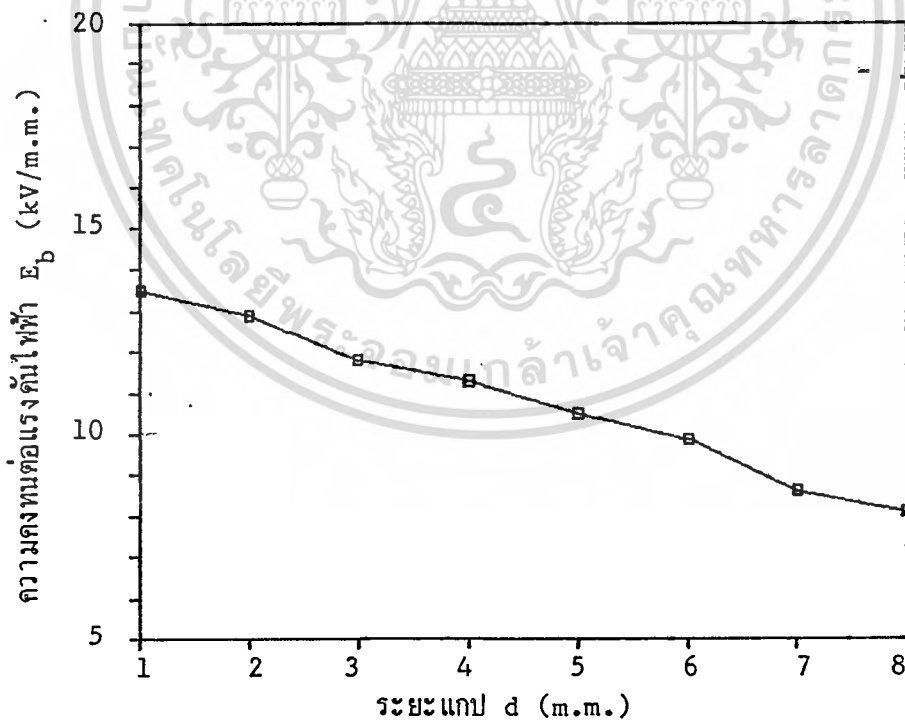
รูปที่ 7.7.4 แสดงแรงดันเบรคความ (ก) และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (ข)

ในเทอมของระยะแกป ในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์โดยอิลีค โดรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ทรงกลม(เหล็กสแตนเลส)-ทรงกลม(อลูมิเนียม) อุณหภูมิ 29 °C
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) แรงดันเบรคดาวน์ในเทอมของระยะแกป

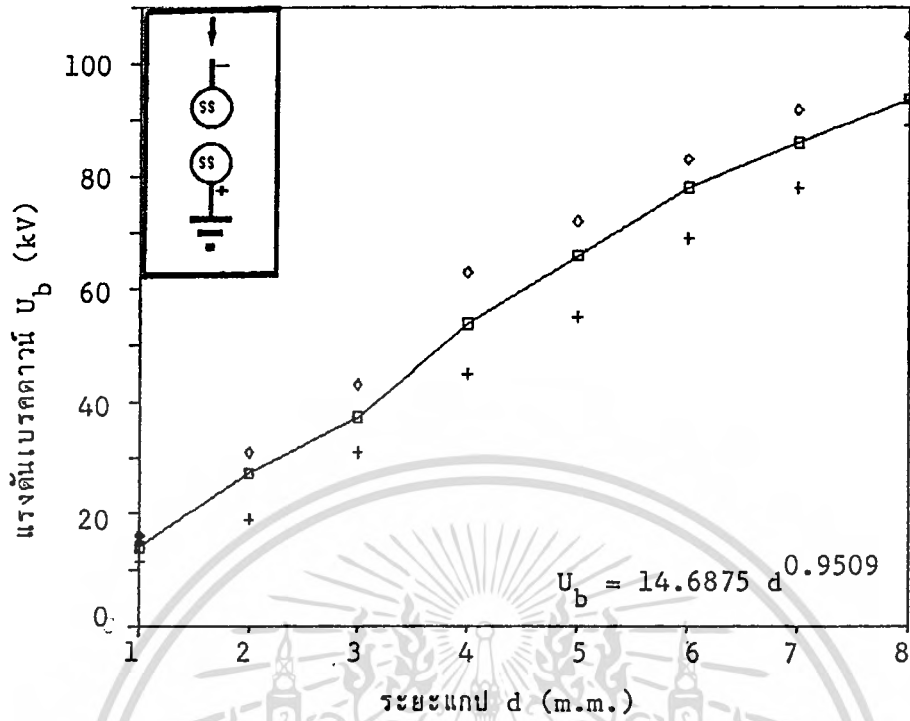


ข) ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในเทอมของระยะแกป

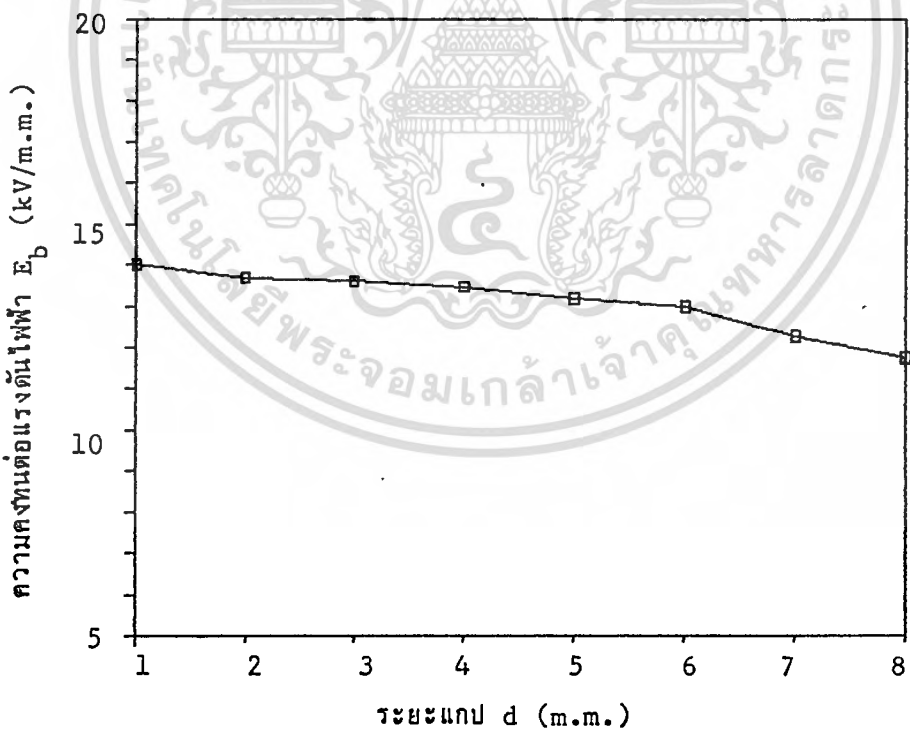
รูปที่ 7.7.5 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ (ก) และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (ข)

ในเทอมของระยะแกป ในน้ำมีหม้อแปลงไฟฟ้าศาลเท็กซ์โดยอิลีคโตรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่...-ทรงกลม (เหล็กแอสตันเลส) อุณหภูมิ 29°C ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้



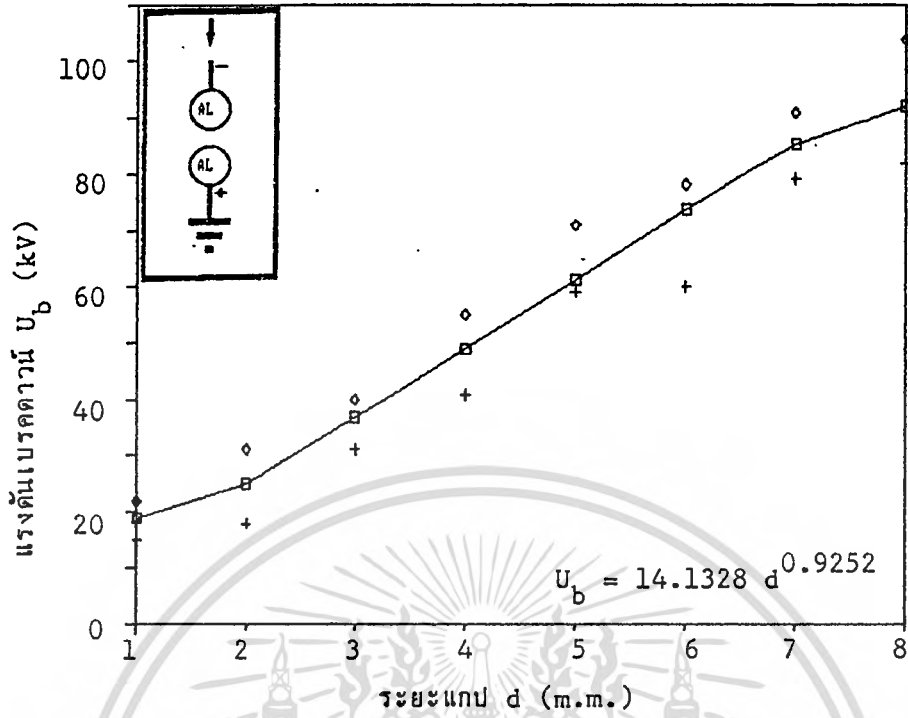
ก) แรงดันเบรคดาวน์ในเทอมของระยะแกป



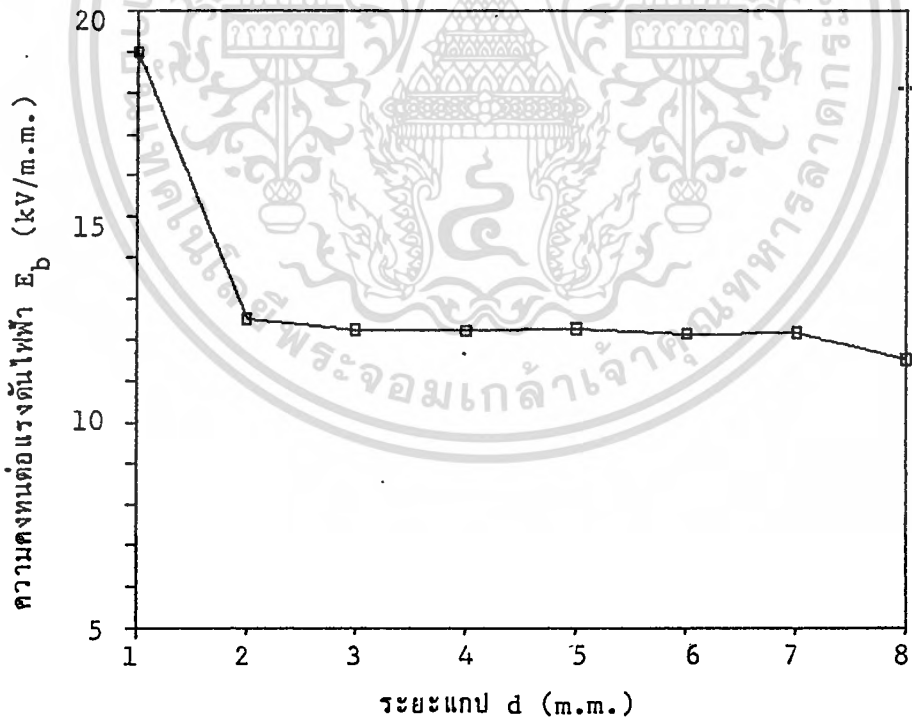
ข) ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในเทอมของระยะแกป

รูปที่ 7.7.6 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ (ก) และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ในเทอมของระยะแกป ในน้ำมันฉนวนหล่อ โดยอิเล็กทรอนิกส์ ใต้รอยขีดข่วน ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อื่นๆทั้งหมดยังคงเป็นของลิขสิทธิ์และสงวนลิขสิทธิ์ไว้ทุกประการเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ทรงกลม-ทรงกลม ทำจากเหล็กสแตนเลส อุณหภูมิ 28 °C



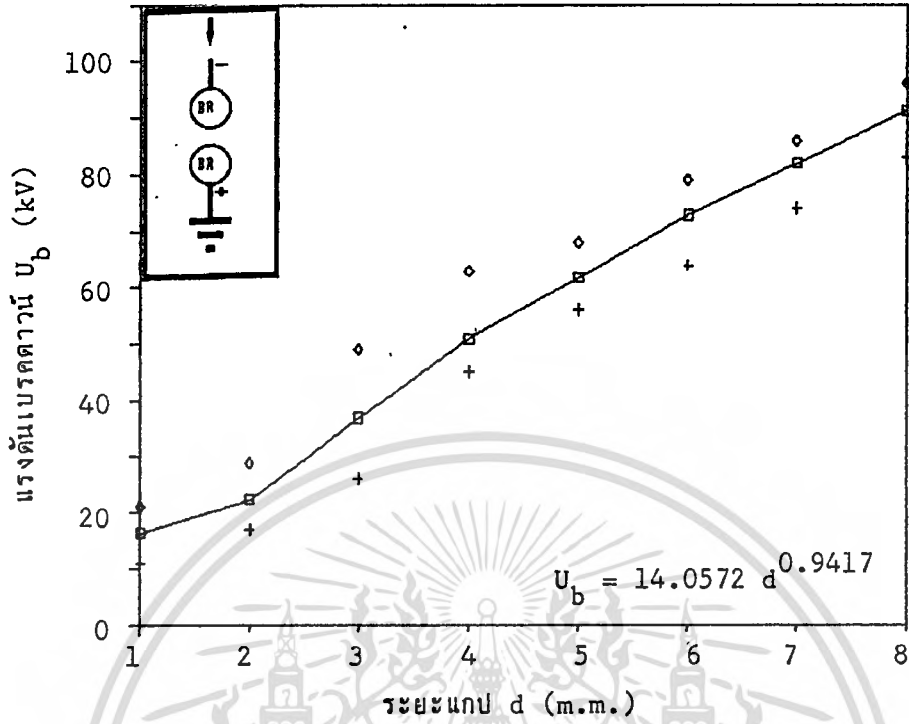
ก) แรงดันเบรคตาวาน์ในเทอมของระยะแกป



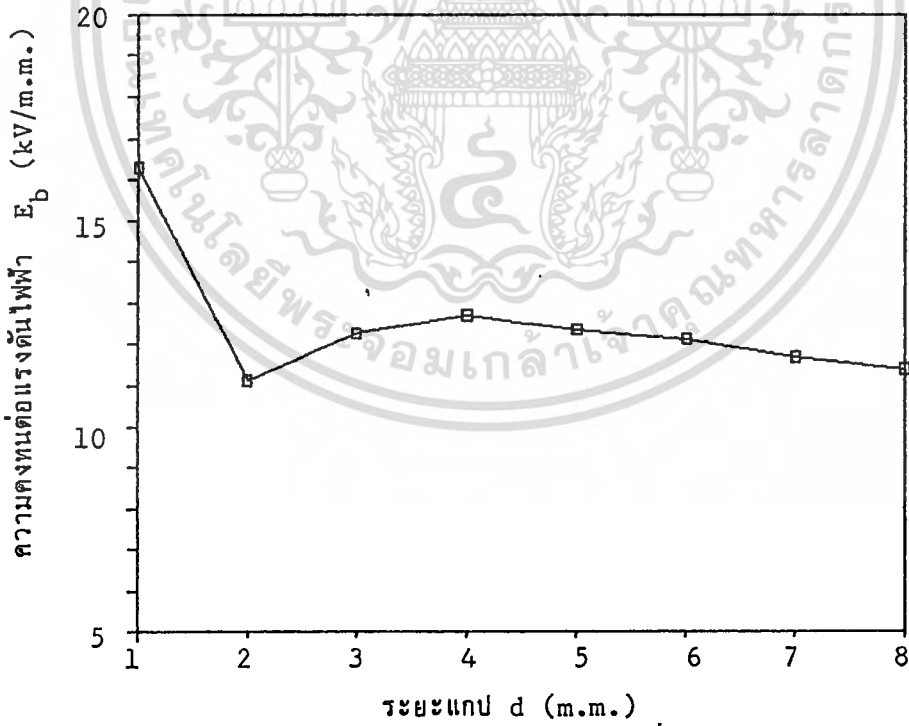
ข) ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในเทอมของระยะแกป

รูปที่ 7.7.7 แสดงแรงดันเบรคตาวาน์ (ก) และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งไว้ในเทอมของระยะแกป ในน้ำมันถั่วเหลือง โดยอิลีคโตรด ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ทรงกลม-ทรงกลม ทำจากอลูมิเนียม อุณหภูมิ 29 °C



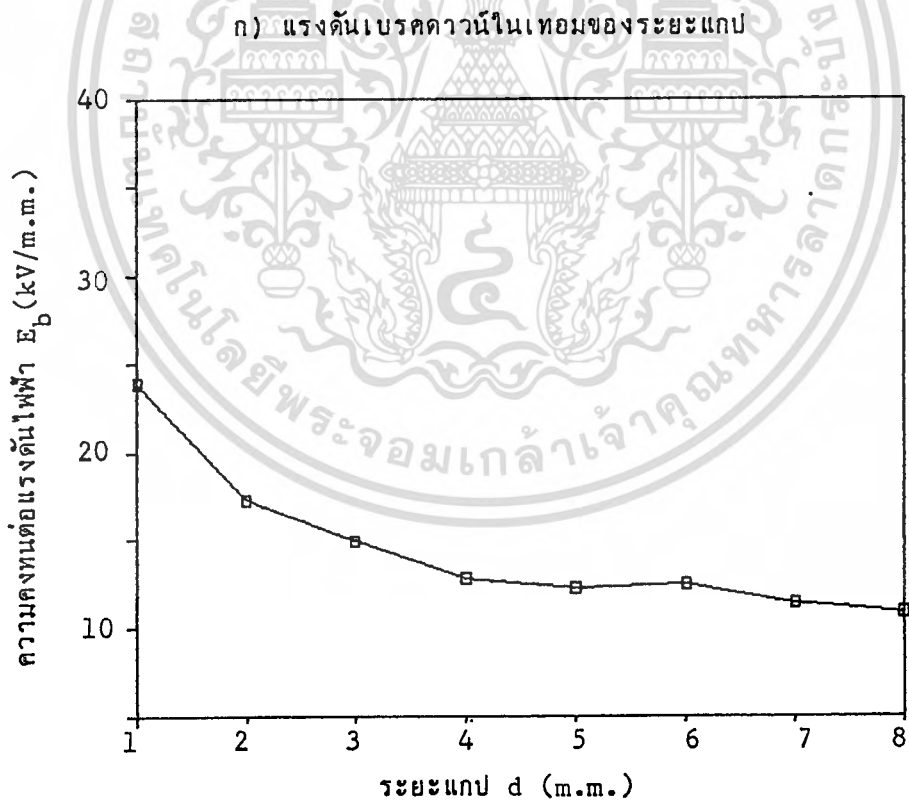
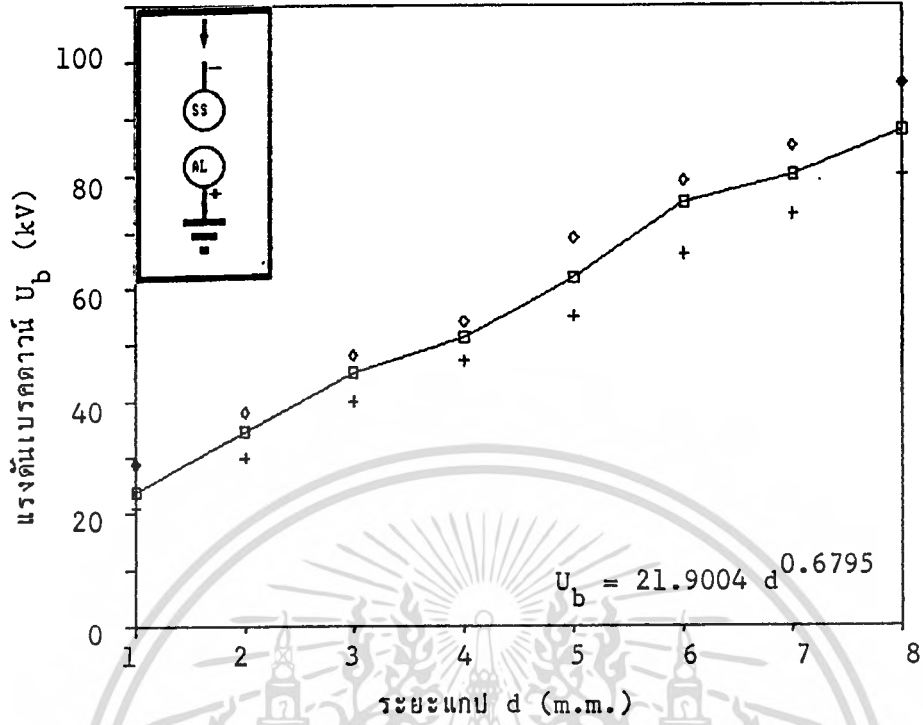
ก) แรงดันเบรคตาวานในเทอมของระยะแกป



ข) ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในเทอมของระยะแกป

รูปที่ 7.7.8 แสดงแรงดันเบรคตาวาน (ก) และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (ข)

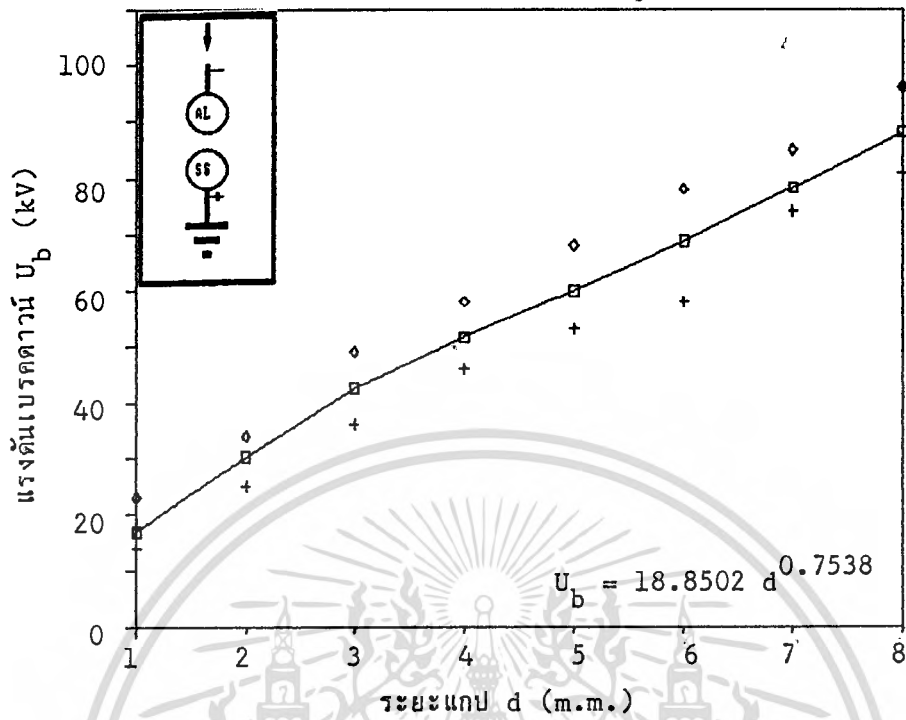
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งในเทอมของระยะแกป ในน้ำมันถั่วเหลือง โดยอิลีคโตรดใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และตัวอ้างอิงถึงเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ทรงกลม-ทรงกลม ทำจากทองเหลือง อุณหภูมิ 28 °C



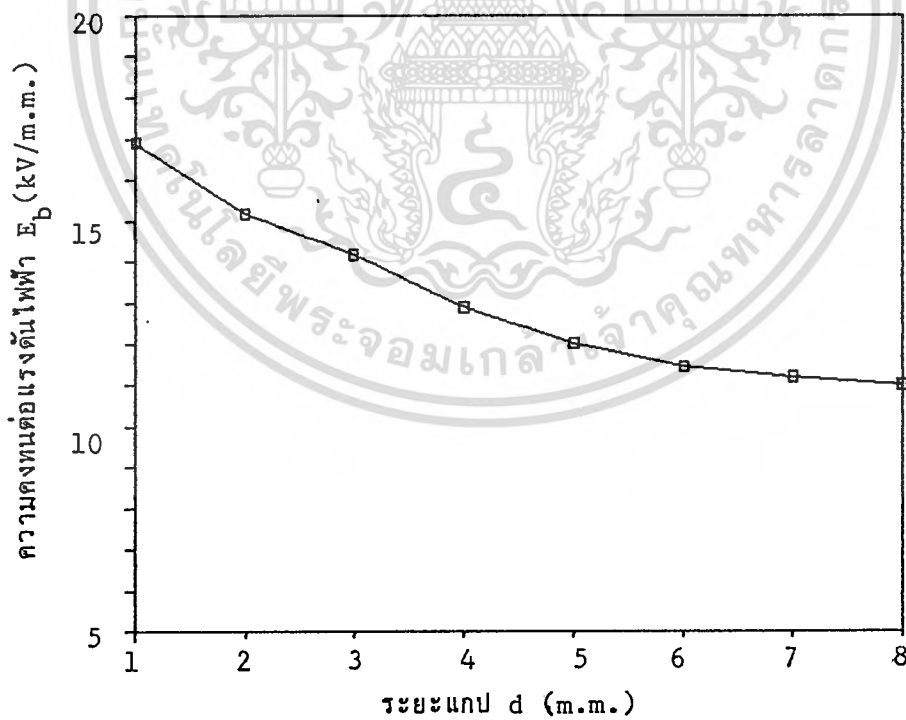
ข) ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในเทอมของระยะแกป

รูปที่ 7.7.9 แสดงแรงดันเบรคตาวาน (ก) และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับวารสารวิชาการในนามของหน่วยงานต้นสังกัด โดยมิได้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ทรงกลม (เหล็กสเตนเลส) - ทรงกลม (อลูมิเนียม) อุณหภูมิ 31 °C



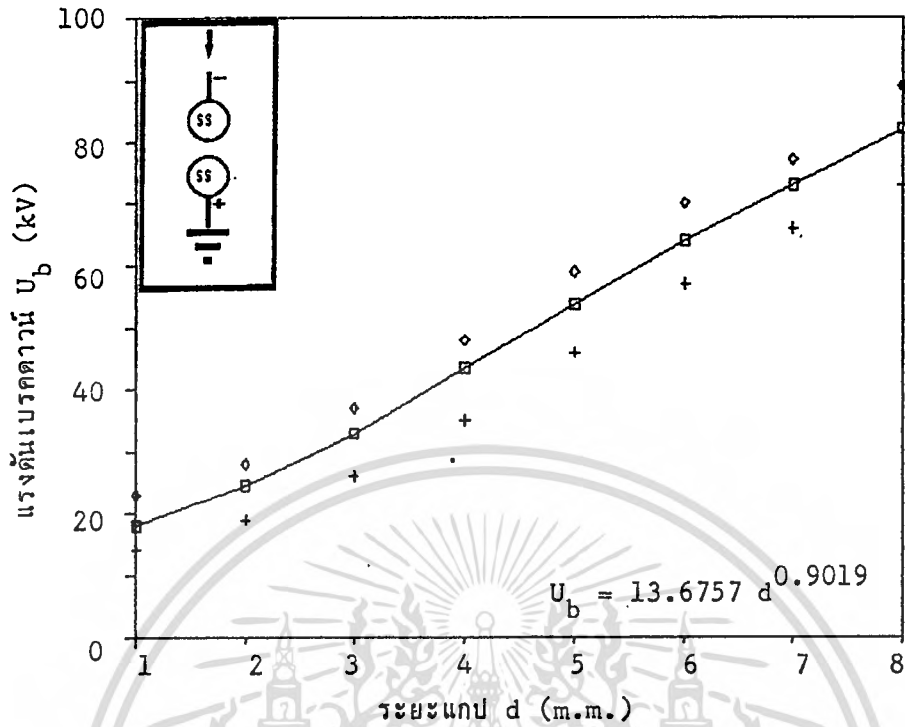
ก) แรงดันเบรคตาวานในเทอมของระยะแกป



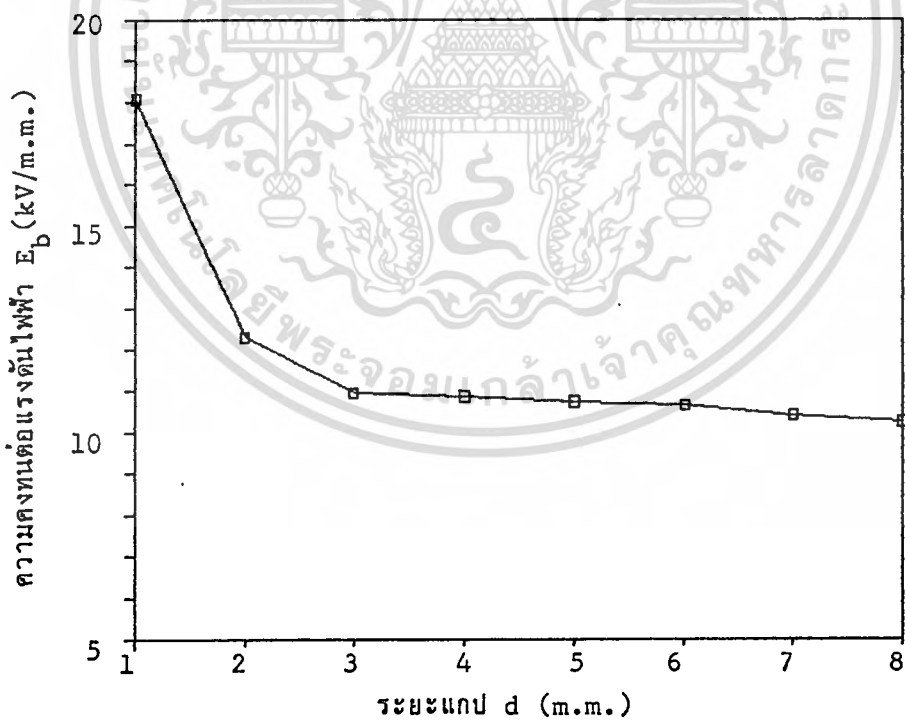
ข) ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในเทอมของระยะแกป

รูปที่ 7.7.10 แสดงแรงดันเบรคตาวาน (ก) และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ในเทอมของระยะแกป ในน้ำมันถั่วเหลือง โดยอิเล็กทรอนิกส์ประชาชนด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ทรงกลม (อลูมิเนียม) - ทรงกลม (เหล็กเสตนเลส) อุณหภูมิ 30 °C



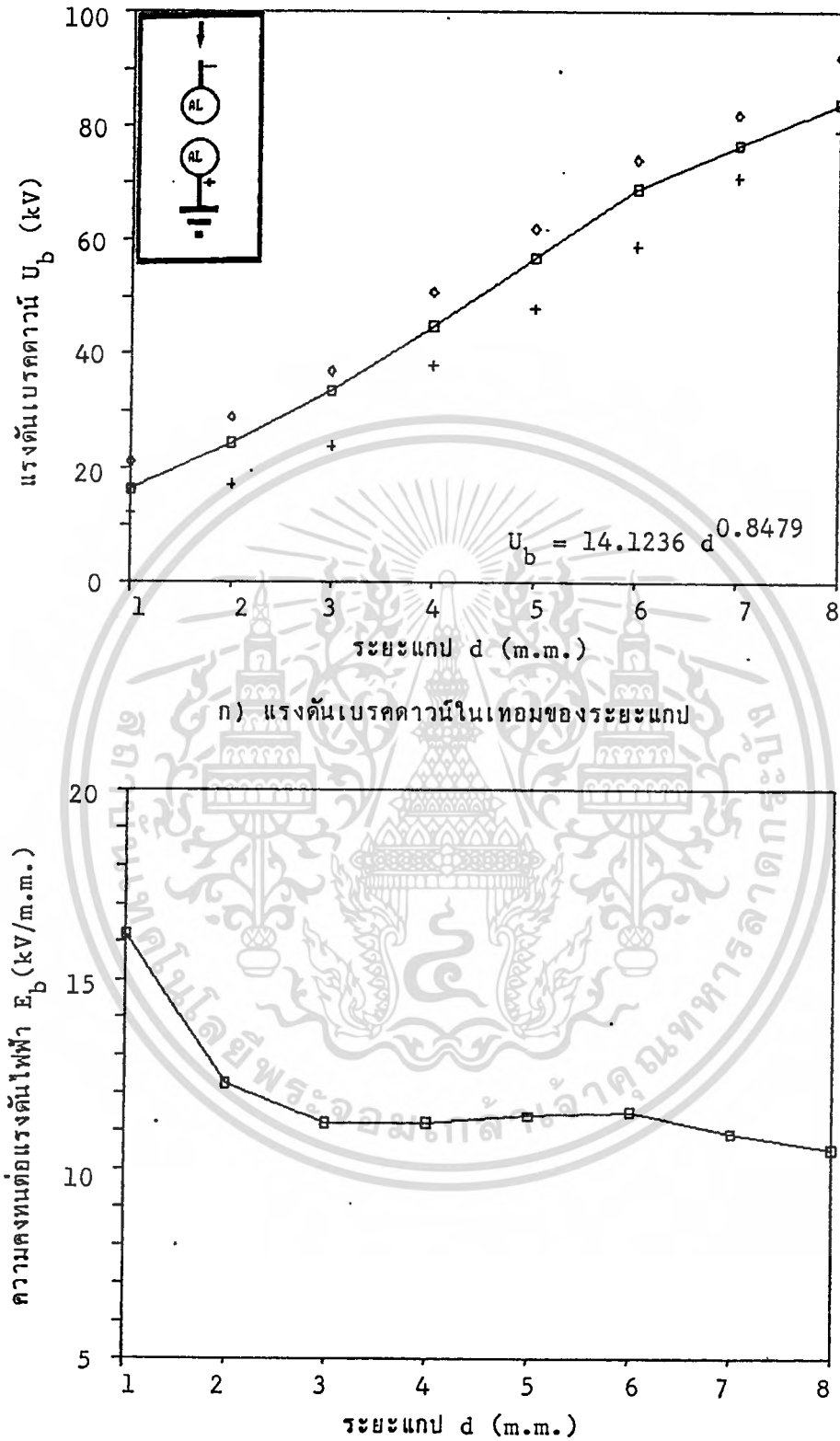
ก) แรงดันเบรคตาวานในเทอมของระยะแกป



ข) ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในเทอมของระยะแกป

รูปที่ 7.7.11 แสดงแรงดันเบรคตาวาน (ก) และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนในเทอมของระยะแกป ในน้ำมันรำข้าว โดยอิเล็กทรอนิกส์ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ทรงกลม-ทรงกลม ทำจากเหล็กสแตนเลส อุณหภูมิ 28 °C

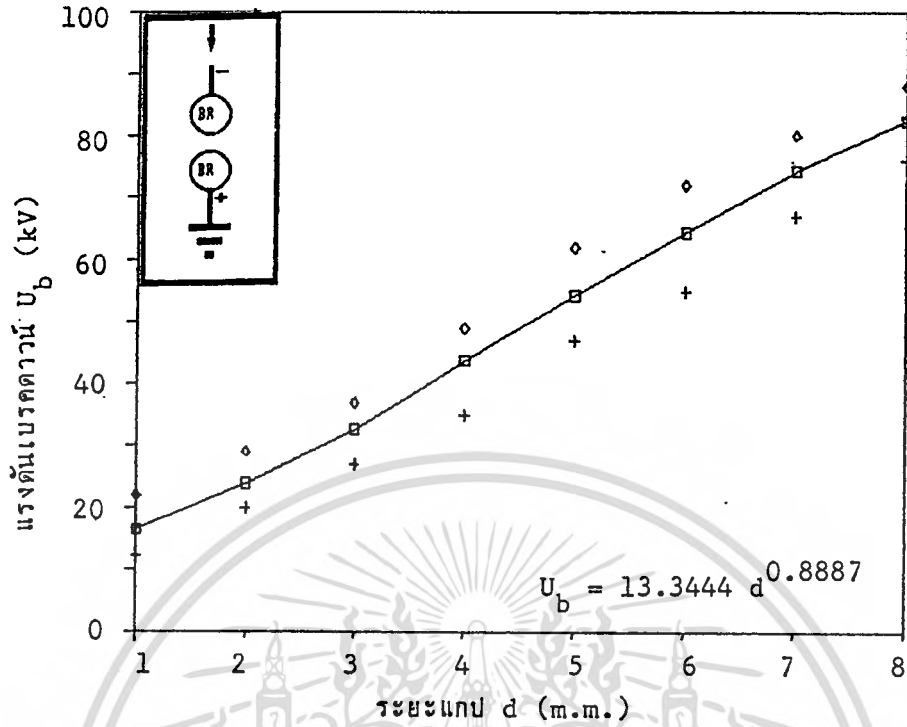


ก) แรงดันเบรคตาวานในเทอมของระยะแกป

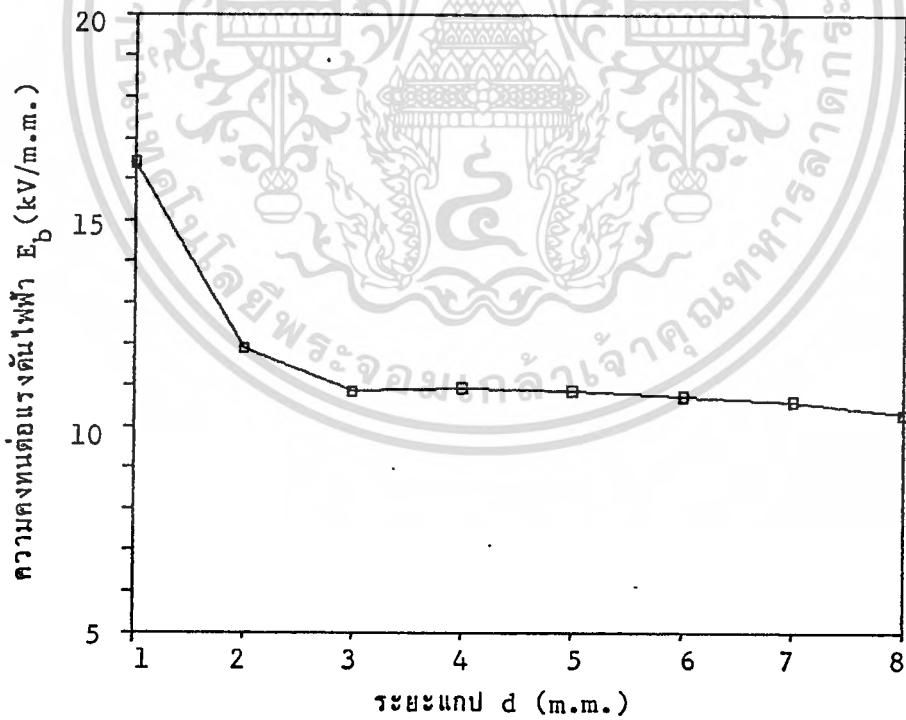
รูปที่ 7.7.12 แสดงแรงดันเบรคตาวาน (ก) และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (ข)

ในเทอมของระยะแกป ในน้ำมันรำข้าว โดยอิเล็คโตรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวทช.ให้การช่างานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ทรงกลม-ทรงกลม ทำจากอลูมิเนียม ออกหมุมิ 29 °C



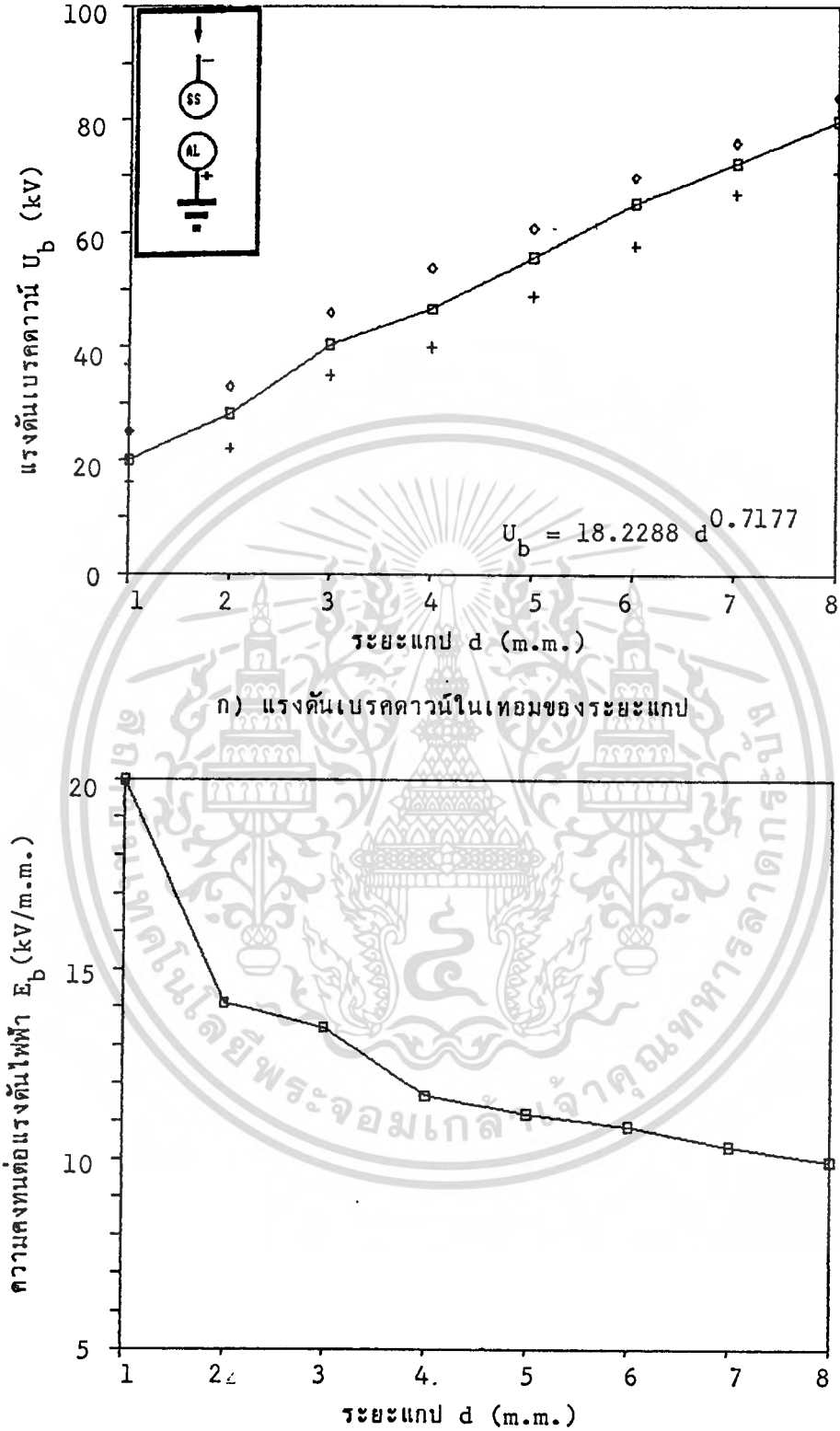
ก) แรงดันเบรคตาวาน์ในทอมของระยะแกป



ข) ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในทอมของระยะแกป

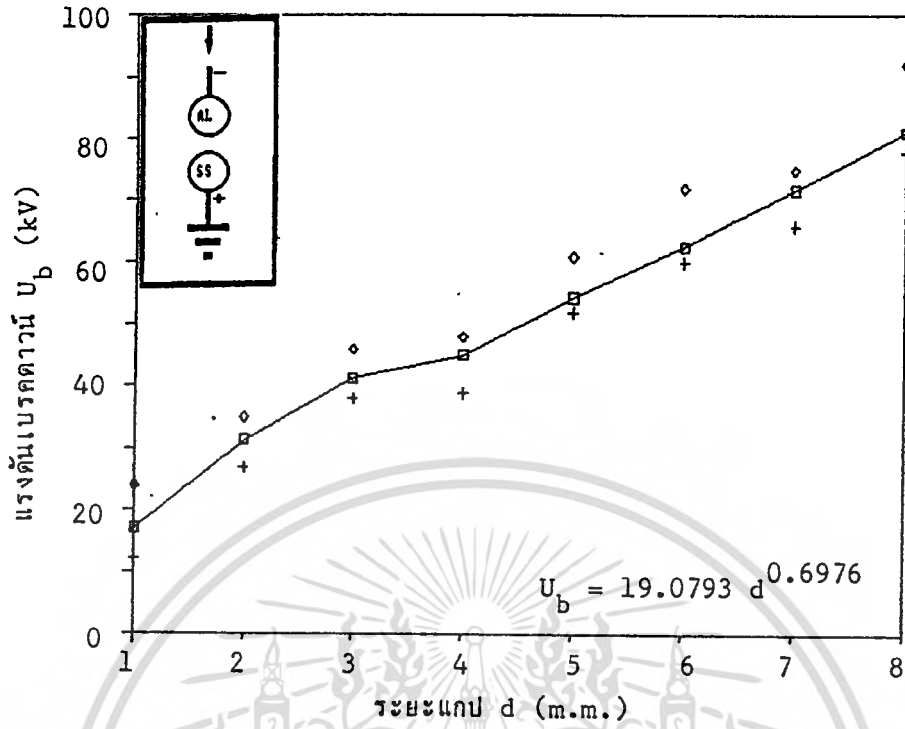
รูปที่ 7.7.13 แสดงแรงดันเบรคตาวาน์ (ก) และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนในทอมของระยะแกปในน้ำมันรำข้าว โดยลิขสิทธิ์ได้ขอไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัดทอนอ้างอิงเนื้อหาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ทรงกลม-ทรงกลม ทำจากทองเหลือง อุณหภูมิ 30 °C

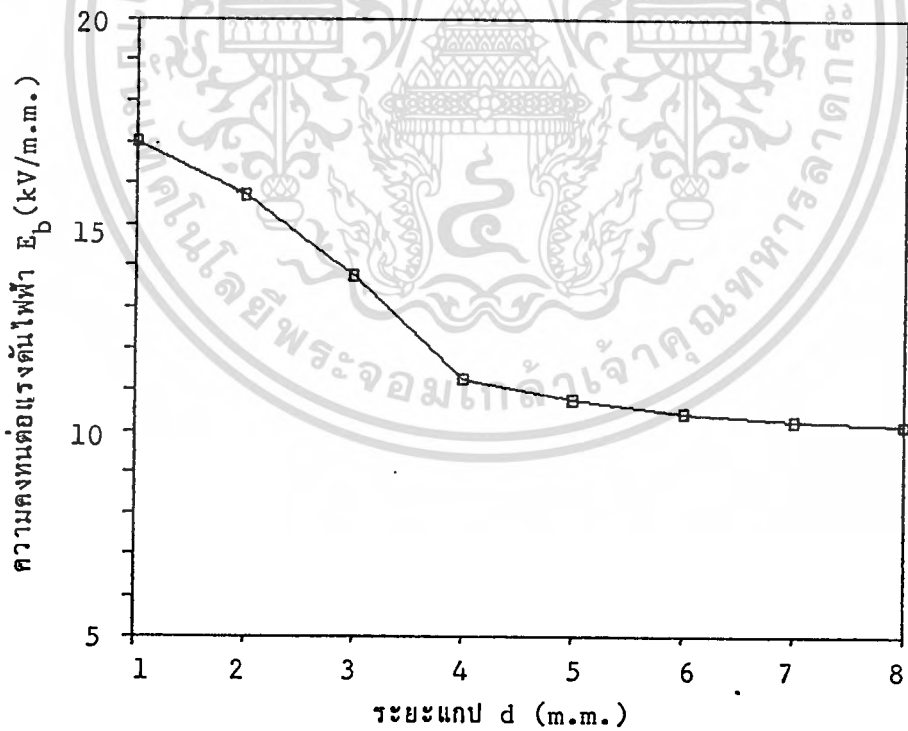


ข) ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในเทอมของระยะแกป

รูปที่ 7.7.14 แสดงแรงดันเบรคตาวาน (ก) และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (ข)



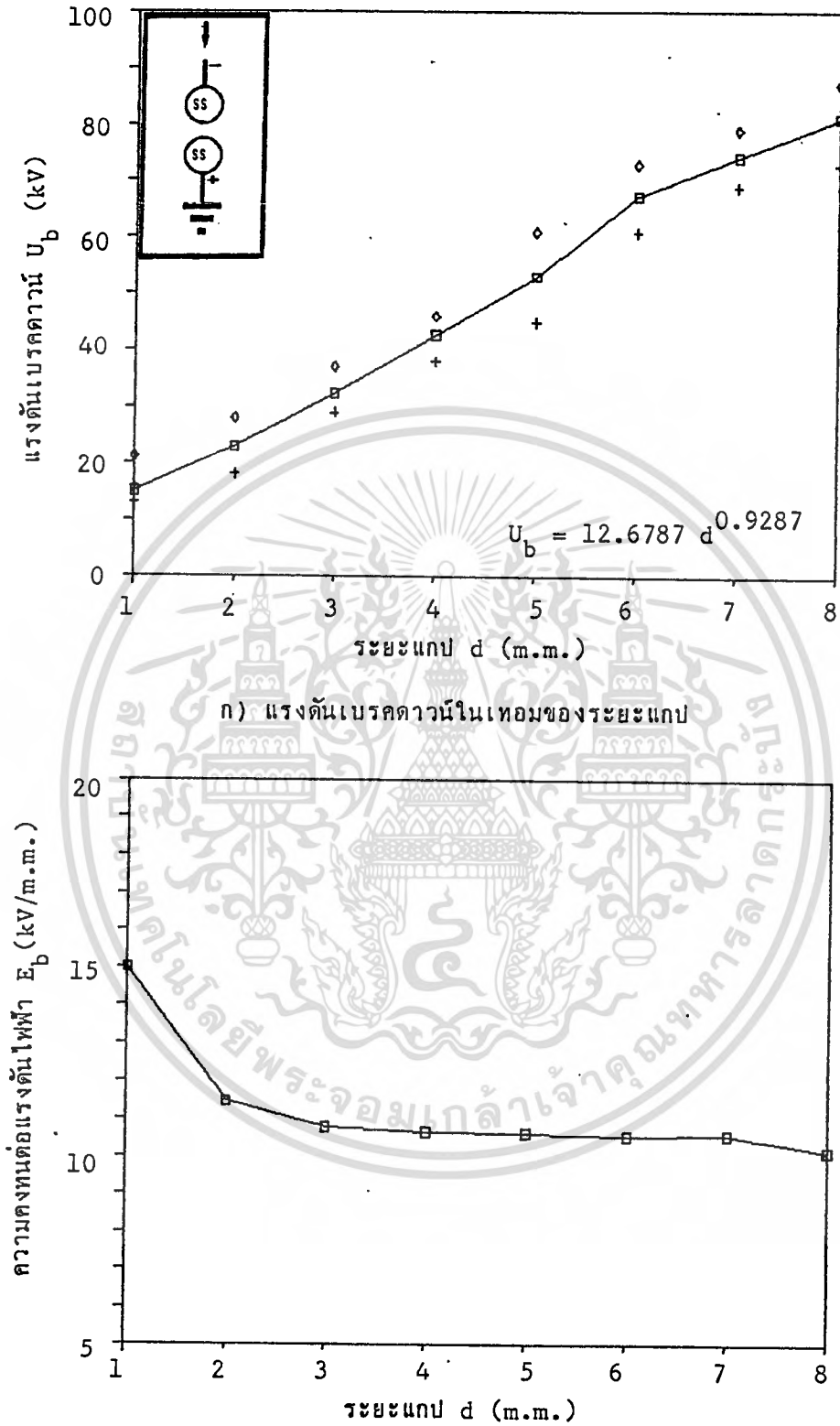
ก) แรงดันเบรคตาวานในเทอมของระยะแกป



ข) ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในเทอมของระยะแกป

รูปที่ 7.7.15 แสดงแรงดันเบรคตาวาน (ก) และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (ข)

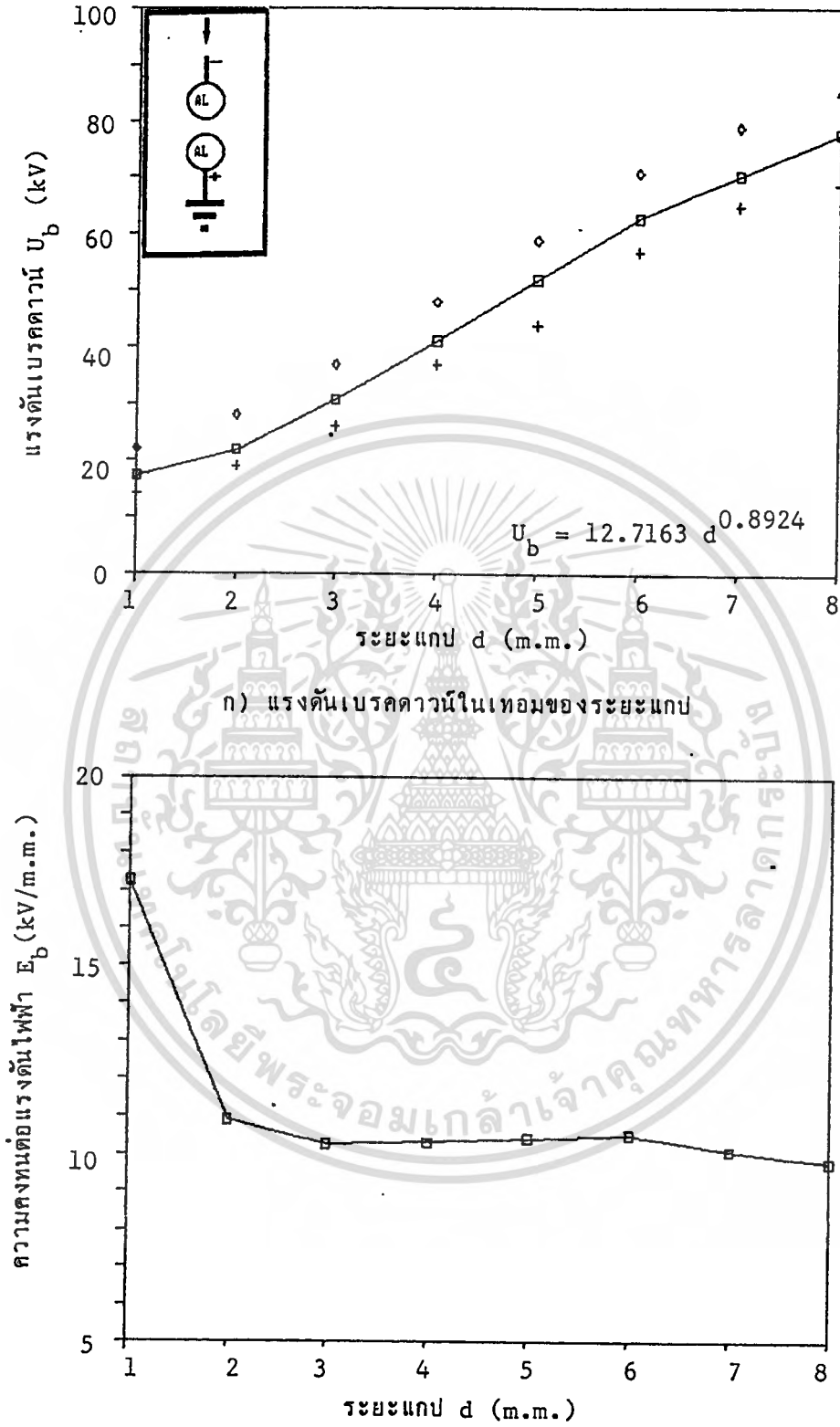
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ในเทอมของระยะแกป ในน้ำมันรำข้าว โดยอิลีคโตรด โดยใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีในเอกสารฉบับอื่น และตั้งชื่อเรื่องเป็นหัวข้อเอกสารที่ผู้ที่มีการนำไปใช้
ทรงกลม(อลูมิเนียม)-ทรงกลม(เหล็กสเตนเลส) อุณหภูมิ 31 °C



ข) ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในเทอมของระยะแกป

รูปที่ 7.7.16 แสดงแรงดันเบรคตาวาน (ก) และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ในเทอมของระยะแกป ในน้ำมันปาล์ม โดยอิลีคโตรด
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังห้ามทำซ้ำและเผยแพร่ข้อมูลนี้ออกสู่สาธารณะทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ทรงกลม-ทรงกลม ทำจากเหล็กแอสแตนเลส อุณหภูมิ 30 °C



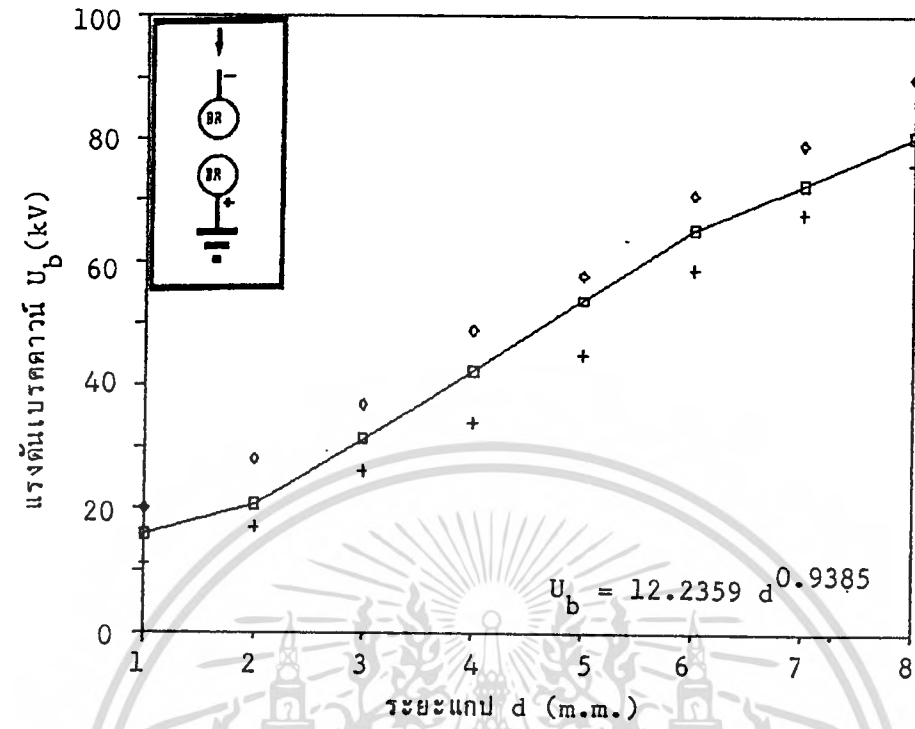
ก) แรงดันเบรคตาวาน์ในเทอมของระยะแกป

ข) ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในเทอมของระยะแกป

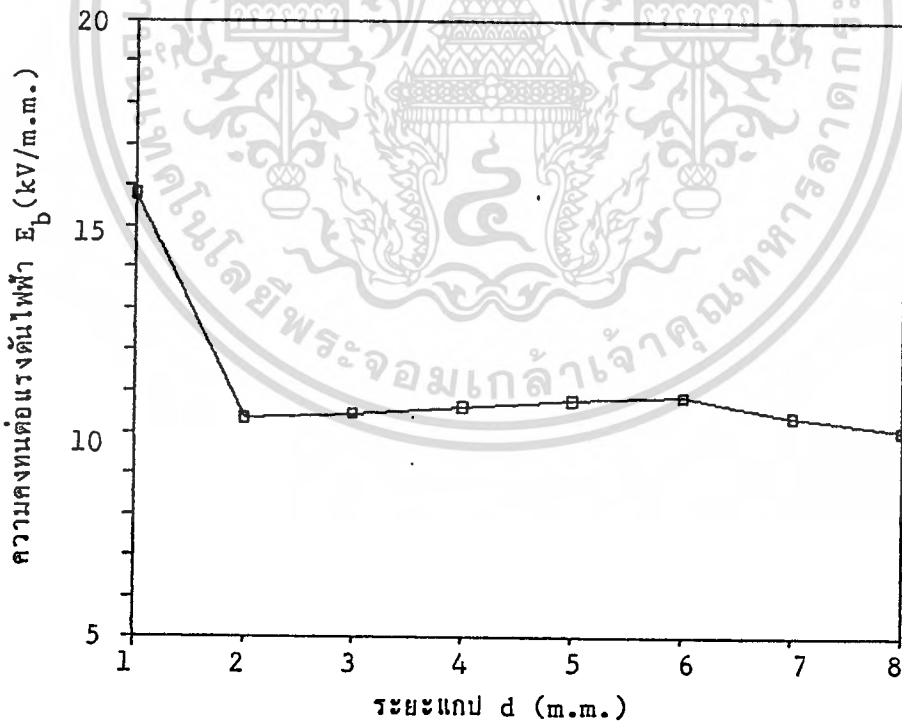
รูปที่ 7.7.17 แสดงแรงดันเบรคตาวาน์ (ก) และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (ข)

ในเทอมของระยะแกป ในน้ำมันปาล์ม โดยอิลีคโตรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนเพื่อการค้าเท่านั้น เมื่อผู้ยืมเห็นจำเป็นต้องไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งทรงกลม-ทรงกลม ทำจากอลูมิเนียม อุกทภูมิ 31 °C เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



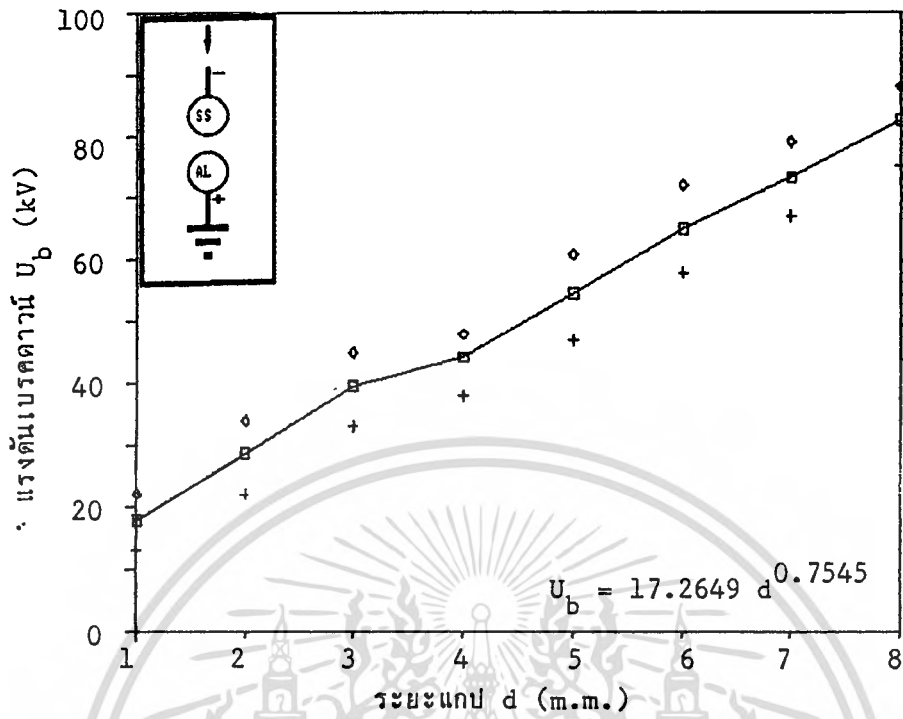
ข) ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในเทอมของระยะแกป



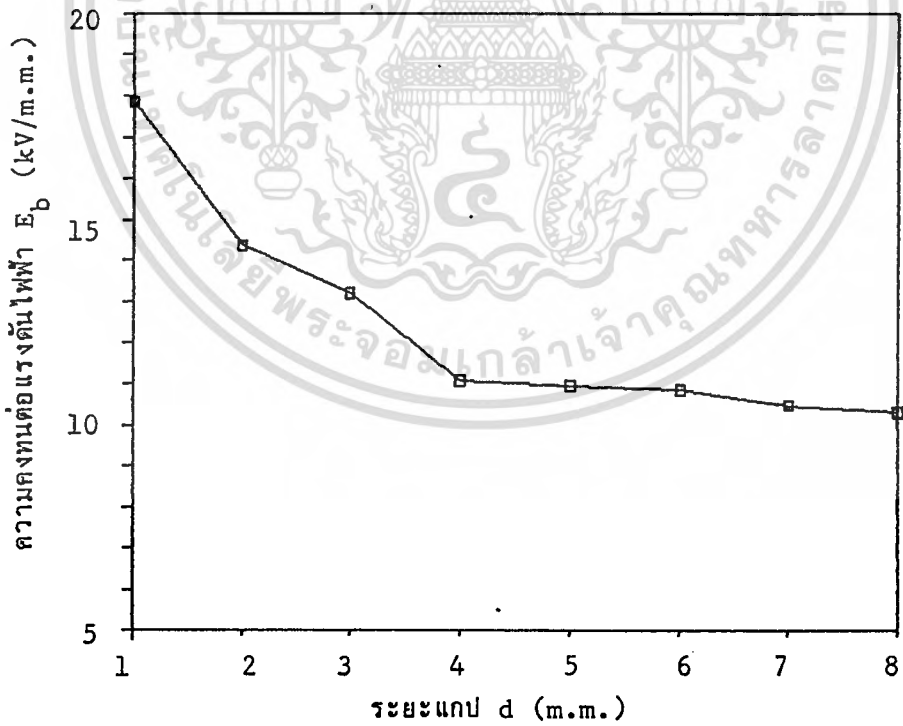
ข) ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในเทอมของระยะแกป

รูปที่ 7.7.18 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ (ก) และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (ข)

ในเทอมของระยะแกป ในน้ำมันพาล์ม โดยอีเล็กโตรด
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการค้าเท่านั้น เมื่อผู้ซื้อได้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังทำจากทองเหลือง อุกฤษณ์ 30 °C การทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



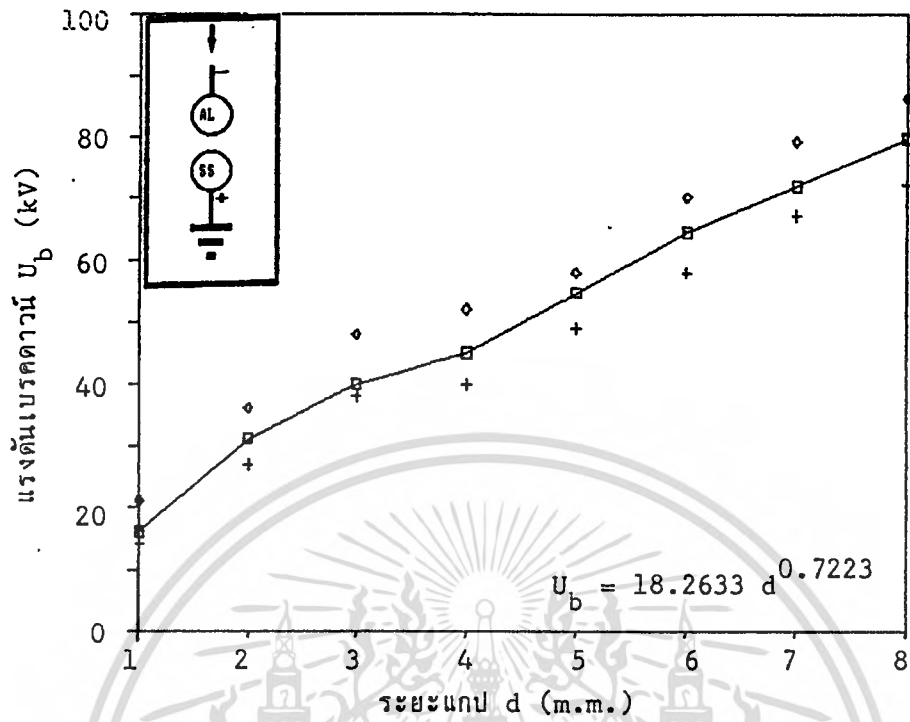
ก) แรงดันเบรคตาวานีในเทอมของระยะแกป



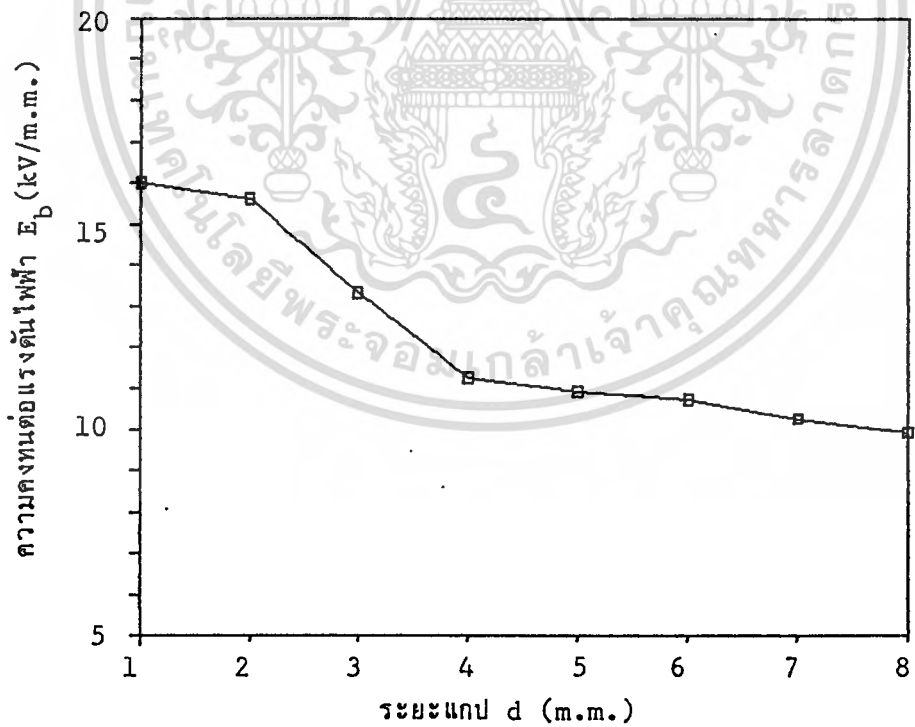
ข) ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในเทอมของระยะแกป

รูปที่ 7.7.19 แสดงแรงดันเบรคตาวานี (ก) และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การซึ่งนั้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังห้ามมิให้นำไปเผยแพร่หรือจำหน่ายโดยไม่ได้รับอนุญาตจากศูนย์ฯ
ทรงกลม (เหล็กแอสตันเลส) - ทรงกลม (อลูมิเนียม) อุณหภูมิ 29 °C ที่มีการนำไปใช้



ก) แรงดันเบรคตาวานในเทอมของระยะแกป



ข) ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในเทอมของระยะแกป

รูปที่ 7.7.20 แสดงแรงดันเบรคตาวาน (ก) และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ในเทอมของระยะแกป ไนน้ำมันปาล์ม โดยอิลีค ไตรด
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรงกลม(อลูมิเนียม)-ทรงกลม(เหล็กแสดนเลส) อุณหภูมิ 29 °C

7.8 การทดลองที่ 5

การทดลองนี้เป็นการศึกษาผลของแผ่นฉนวนกั้นระหว่างอิเล็กโตรด ภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ(ทรงกลม-ทรงกลม) และสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ(จุด-พื้นระนาบ) ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ แผ่นฉนวนเมื่อนำมาใกล้แล้วทำให้แรงดันเบรกดาวน์สูงขึ้น การทดลองแยกออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกใช้แผ่นกระดาษฉนวนกั้นที่มีผิวของคาโธดและอานอดในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอแสดงผลในตารางที่

7.8.1 ส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาค่าผลของแผ่นฉนวนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ โดยใช้กระดาษฉนวนและโพลีเอทิลีน ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 7.8.1 - 7.8.10

ตารางที่ 7.8.1 แสดงผลของกระดาษฉนวนกั้นหนา 0.1 ม.ม. ต่อแรงดันเบรกดาวน์ใน

สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ระยะแคบ 2.5 ม.ม. อิเล็กโตรดทรงกลม-ทรงกลม

ลักษณะการวางกระดาษฉนวน	N	ค่าเฉลี่ย, kv	เพิ่มขึ้น	ถั่วเหลือง, kv	เพิ่มขึ้น
1. ไม่ใช้กระดาษฉนวน	20	20.4	-	26.25	-
2. 1 แผ่นด้านอานอด	5	24.8	4.4	31.4	5.15
3. 1 แผ่นด้านคาโธด	5	23.7	3.3	29.8	3.55
4. 2 แผ่นด้านอานอด	5	25.2	4.8	32.5	6.25
5. 2 แผ่นด้านคาโธด	5	24.4	4.0	30.6	4.35
6. 3 แผ่นด้านอานอด	5	26.8	6.4	34.2	7.95
7. 3 แผ่นด้านคาโธด	5	24.9	4.5	31.4	5.15
8. 1 แผ่นทั้ง 2 ด้าน	5	25.4	5.0	32.8	6.55
9. 2 แผ่นทั้ง 2 ด้าน	5	27.6	7.2	35.5	9.25

พิจารณาการทดลองในส่วนแรกแสดงในตารางที่ 7.8.1 จะเห็นได้ว่าแผ่นกระดาษมีผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำออกให้ผู้อื่นใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต
ต่อแรงดันเบรกดาวน์ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (ในก๊าซไม่มีผล [60]) ถ้านำแผ่นกระดาษฉนวน
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กันทางด้านอานโดจะให้แรงดันเบรคดาวน์สูงกว่าเมื่อกันทางด้านคาโธด เมื่อเพิ่มจำนวนแผ่น กระจกหลายแผ่น แรงดันเบรคดาวน์จะเพิ่มมากขึ้น และจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อใช้กระจกฉนวนกันทั้ง ทางด้านคาโธดและอานโด จากการทดลองแรงดันเบรคดาวน์เมื่อมีกระจกฉนวนกันจะเพิ่มขึ้น ประมาณ 20 % จากความสัมพันธ์ [17] $E_0 = U_p / (d_0 + \epsilon_0 d_p / \epsilon_p)$ ในน้ำมัน คาลเท็กซ์ $E_0 = 8.16 \text{ kV/m.m.}$, $d_p = 0.1$, $d_0 = 2.5$, $\epsilon_0 = 2.5$ และ $\epsilon_p = 3.67$ แทนค่าในสมการจะได้ $U_p = 20.95 \text{ kV}$

จะเห็นได้ว่าสมการข้างบนนี้ใช้ได้ในการนิยามไฟฟ้าสม่าเสมอหรือ f, ส.ป.ส. แพลเตอร์ สนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 1 แต่ในการนิยามไฟฟ้าสม่าน้อยเช่นการทดลองนี้ มีค่า ส.ป.ส. แพล เตอร์สนามไฟฟ้าเท่ากับ 1.133 สมการข้างต้น ต้องมี f คูณในสมการจะได้

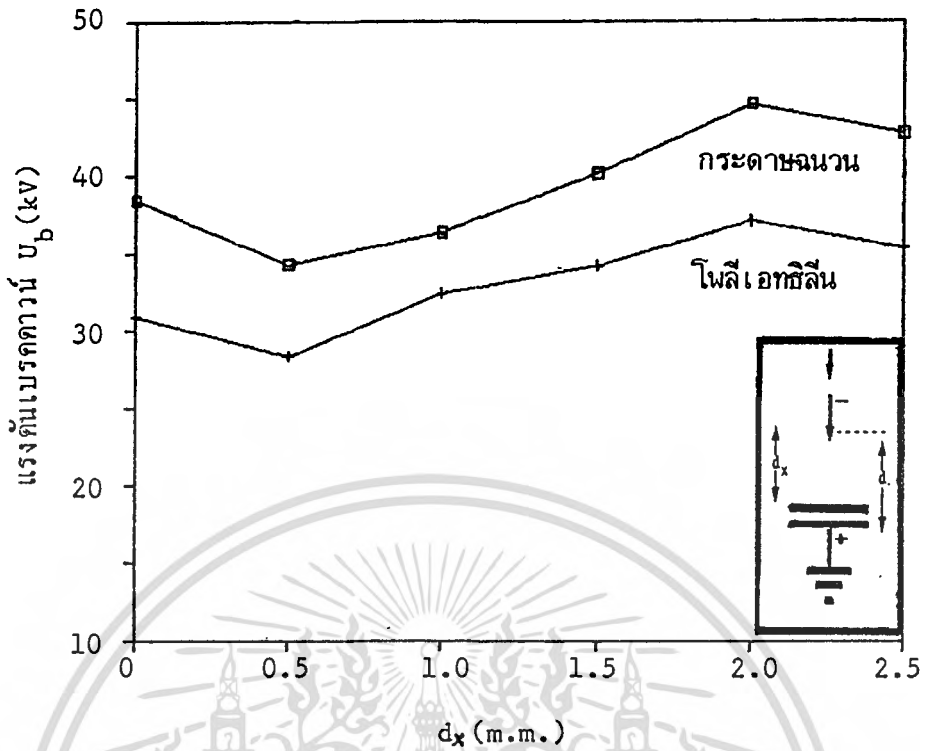
$$f \cdot E_0 = U_p / (d_0 + \epsilon_0 d_p / \epsilon_p)$$

จากสมการใหม่ ถ้าแทนค่าลงไปจะได้ $U_p = 23.74 \text{ kV}$ ทำให้ผลลัพธ์มีค่าใกล้เคียงกับ การทดลองมากขึ้น

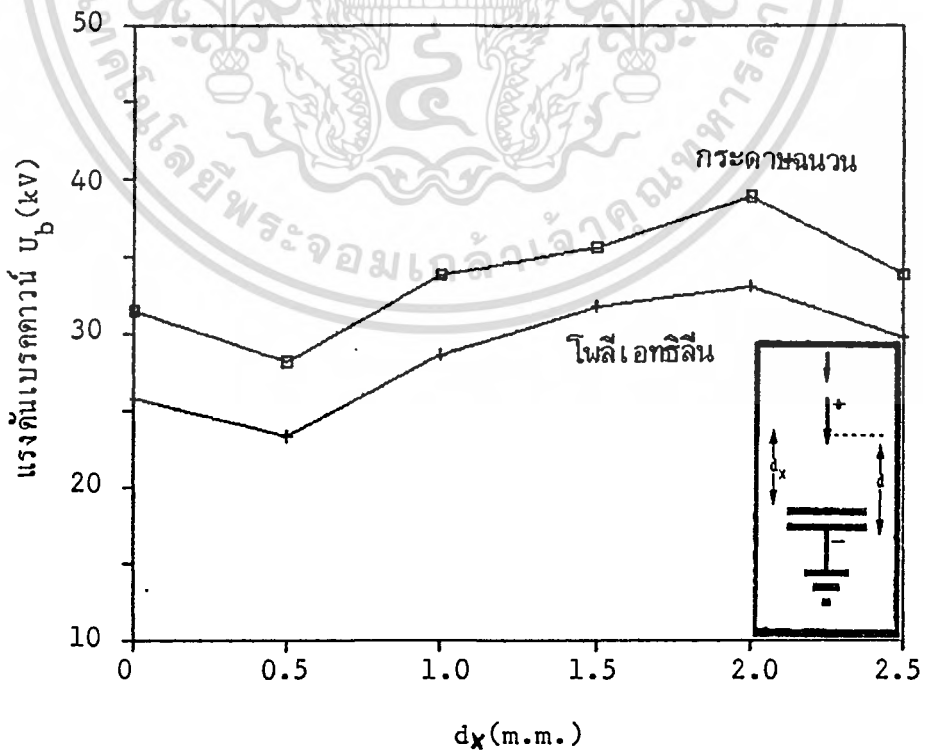
การทดลองในส่วนที่ 2 เป็นการทดลองภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอโดยใช้กระจก ฉนวนหนา 0.1 ม.ม. และโพลีเอทิลีนหนา 0.04 ม.ม. ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 7.8.1 และ 7.8.2 เมื่อเปรียบเทียบแรงดันระหว่างขั้วบวกและขั้วลบ แรงดันที่ขั้วลบจะสูงกว่าขั้วบวก และผลการทดลองในรูปที่ 7.8.3 - 7.8.8 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ในเทอมของจำนวนแผ่น กระจกฉนวนกัน ความสัมพันธ์ของเส้นกราฟจะแปรตรง นั้นหมายถึงเมื่อเพิ่มจำนวนแผ่นกระจก ฉนวนมาก แรงดันเบรคดาวน์สูงขึ้น การนำกระจกฉนวนกันติดปลายแหลม แรงดันเบรคดาวน์ที่ได้ จะต่ำกว่ากันติดกับพื้นระนาบ ทั้งนี้เนื่องจากในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอความเข้มของสนามไฟฟ้าลด ลงมากเมื่อระยะแยกเพิ่มขึ้น(ดูบทที่ 3) เมื่อนำแผ่นกระจกมาขึ้นบริเวณพื้นราบมีผลให้ความคง ท่อแรงดันไฟฟ้าของกระจกฉนวนชุบน้ำมัน(paper impregnated with oil) มีความต้าน ทานมากขึ้น จากการศึกษาคุณสมบัติของกระจกชุบน้ำมัน[17] พบว่าความต้านทานเพิ่มขึ้นเป็น 4 เท่า ดังนั้นเมื่อความเข้มของสนามไฟฟ้าลดลงมากและความต้านทานของฉนวนเพิ่มขึ้น ทำให้แรง ดันเบรคดาวน์สูงกว่า การนำกระจกฉนวนมากันระหว่างอิเล็กโตรดจะเพิ่มความต้านทานและ

เกิดตรี(tree)[35] ในกระดาดชนวน มีผลให้ความชุ่มชื้นของกระแสไหลเนื่องจากการตีสารจลลลง ในรูป 7.8.9 ผลของแผ่นกระดาดชนวนกันด้านหน้าติดกับปลายแหลมจำนวน 3 แผ่นในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอหลังจากเกิดเบรคดาว์แล้ว มีลักษณะเป็นจุดเล็ก ๆ จุดเดียว และรูป 7.8.10 ผลของแผ่นกระดาดชนวนกันด้านหลังติดกับปลายแหลมจำนวน 3 แผ่นในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอหลังจากเกิดเบรคดาว์ มีลักษณะเป็นจุดเล็กๆหลายจุด เนื่องมาจากการเกิดตรีผ่านกระดาดชนวน

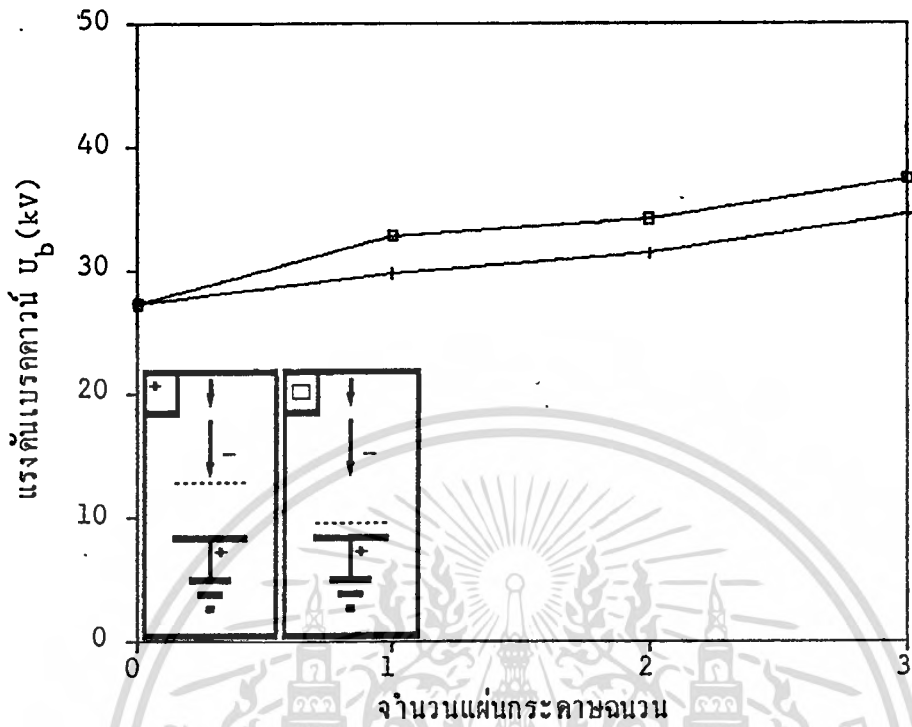




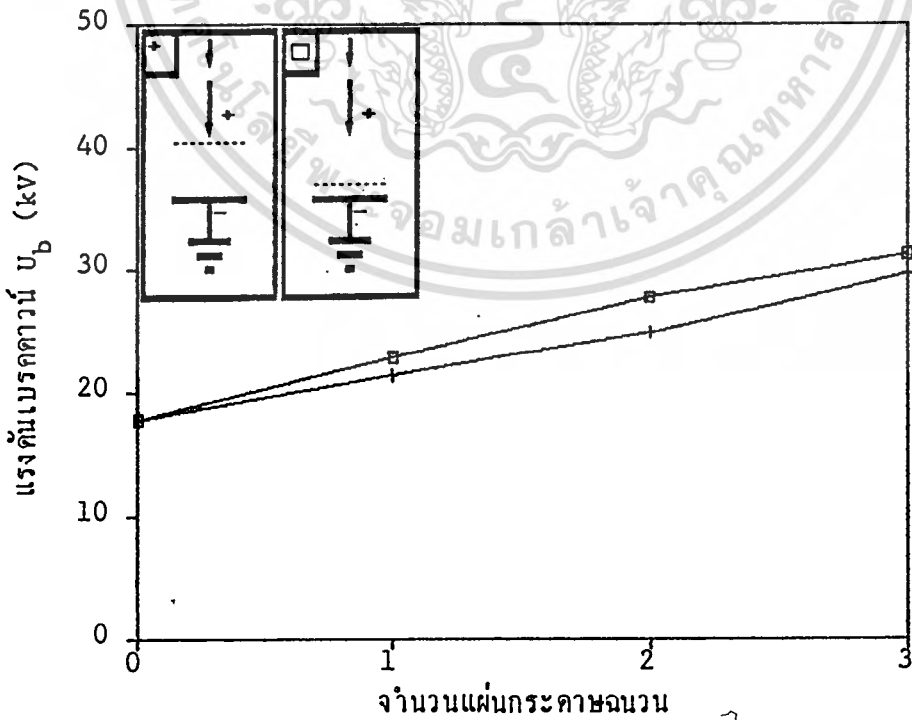
รูปที่ 7.8.1 แสดงผลผลของฉนวนกันต่อแรงดันเบรคตาวานในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอขั้วลบใน ทอมระยะระหว่างอาโนดและคาโทด โดยใช้กระดาษฉนวนและ โพลีเอทิลีนเป็นฉนวนกันในน้ำมันถั่วเหลือง อุณหภูมิ 30 °C



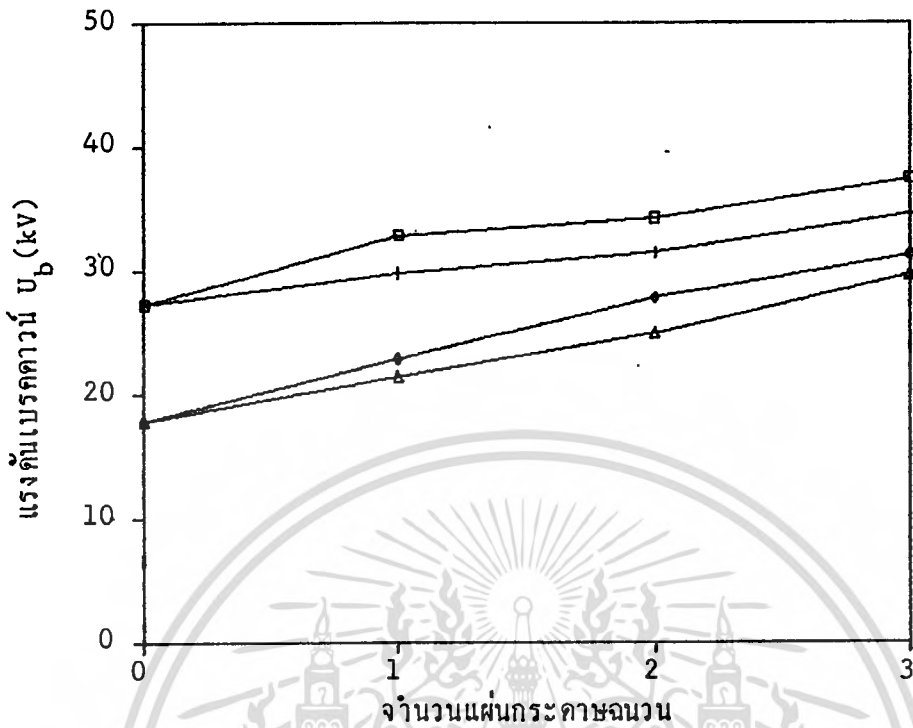
รูปที่ 7.8.2 แสดงผลผลของฉนวนกันต่อแรงดันเบรคตาวานในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอขั้วบวกใน ทอมระยะระหว่างอาโนดและคาโทด โดยใช้กระดาษฉนวนและ โพลีเอทิลีนเป็นฉนวนกันในน้ำมันถั่วเหลือง อุณหภูมิ 30 °C



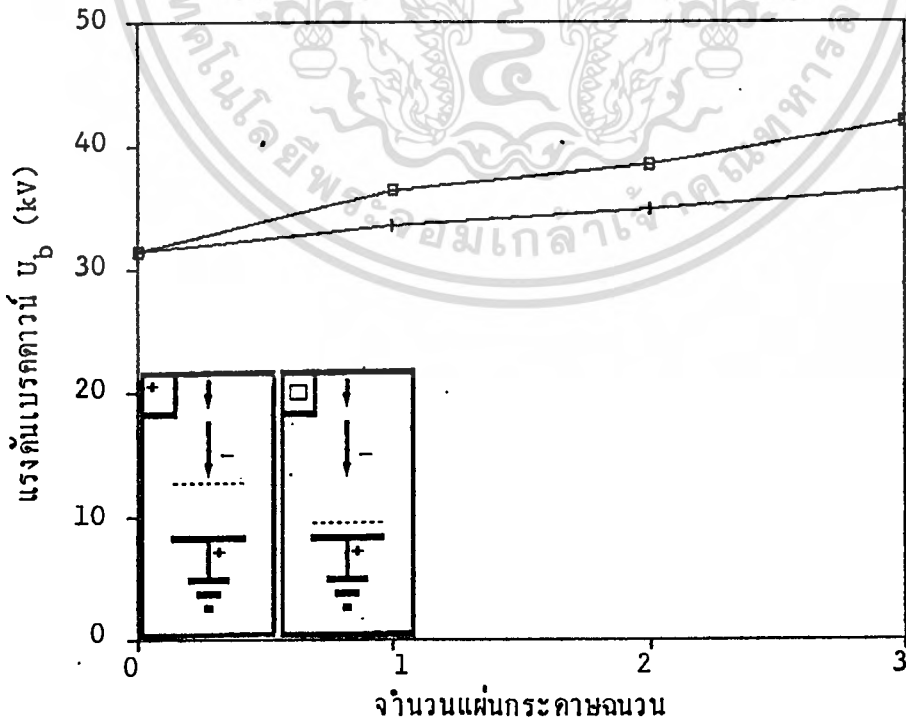
รูปที่ 7.8.3 แสดงผลของแผ่นฉนวนกันต่อแรงดันเบรคดาวน์ ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอขั้วลบใน
เทอมของแผ่นกระดาดชนวน ในน้ำมันคาลเท็กซ์ อุณหภูมิ 29 °C



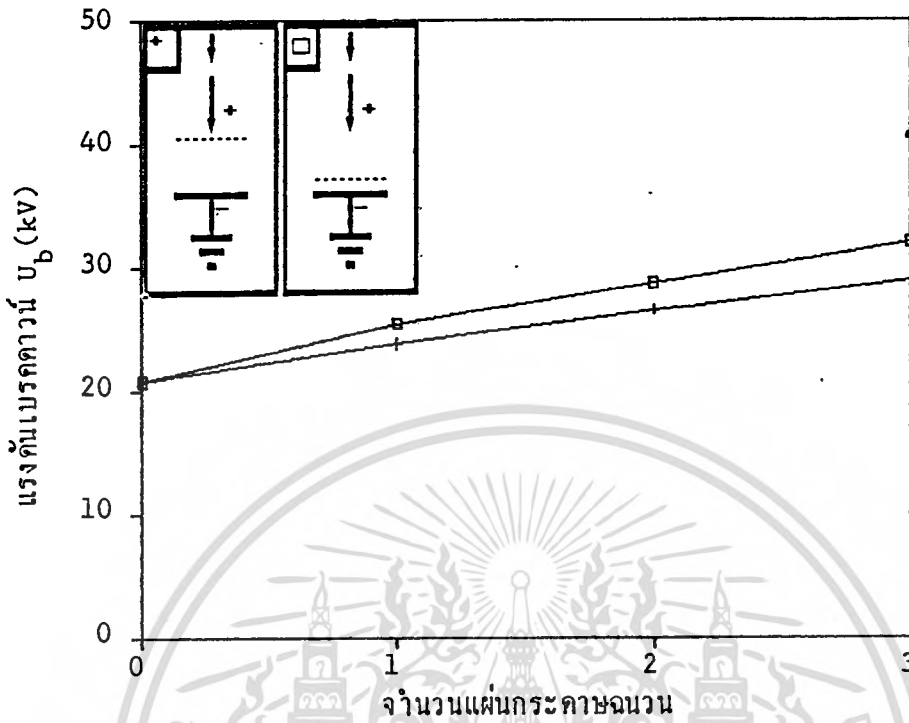
รูปที่ 7.8.4 แสดงผลของแผ่นฉนวนกันต่อแรงดันเบรคดาวน์ ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอขั้วบวกใน
เอกส เป็นเอกสสารที่ส่งแรงเสียดทานการเชิงนี้เพื่อการรักษาสถานที่ เมื่อผู้ยู่ได้เห็นไปเซประโฮงนด้านกรค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนี้ เอมของแผ่นกระดาดชนวน ในน้ำมันคาลเท็กซ์ อุณหภูมิ 30 °C ครั้งที่มีการนำไปใช้



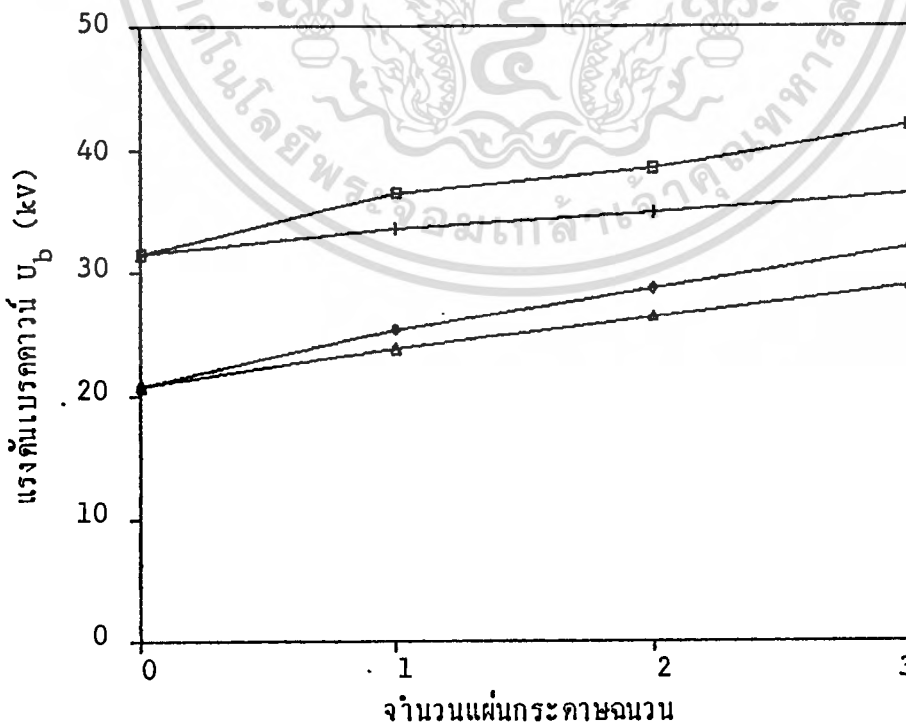
รูปที่ 7.8.5 แสดงผลของแผ่นฉนวนกันต่อแรงดันเบรคตาวาน ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอของน้ำมันและไขวาลบและไขวาลบในเทอมของแผ่นกระดาษฉนวน ในน้ำมันคาลเท็กซ์ อุณหภูมิห้อง



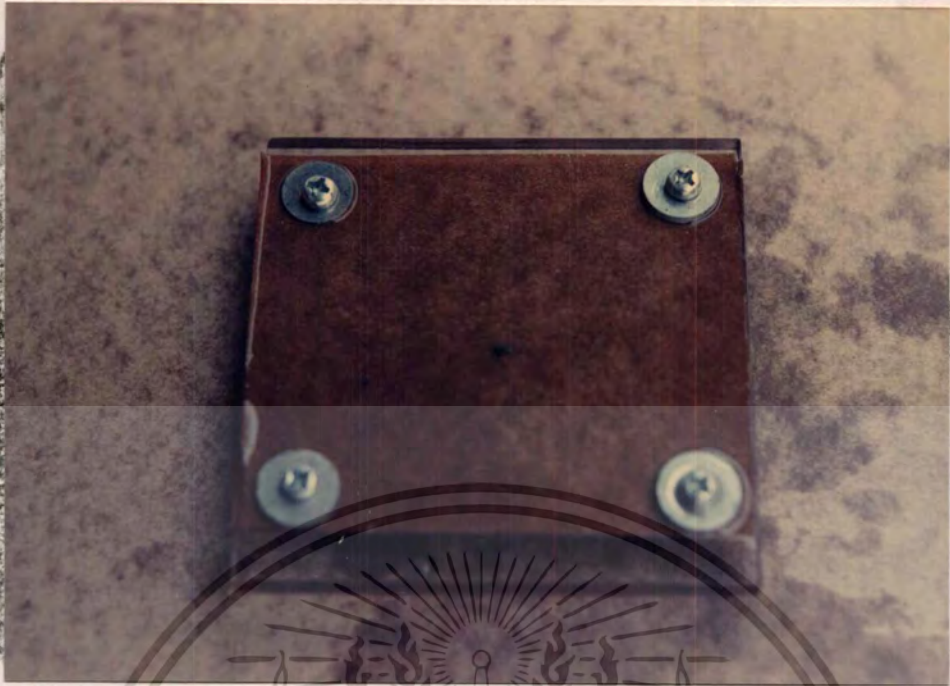
รูปที่ 7.8.6 แสดงผลของแผ่นฉนวนกันต่อแรงดันเบรคตาวาน ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอของไขวาลบในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
เทอมของแผ่นกระดาษฉนวน ในน้ำมันถั่วเหลือง อุณหภูมิ 28 °C



รูปที่ 7.8.7 แสดงผลของแผ่นฉนวนกันต่อแรงดันเบรคตาวาน ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอของแผ่นกระดาดชนวน ในน้ำมันถั่วเหลือง อุณหภูมิ 30 °C



รูปที่ 7.8.8 แสดงผลของแผ่นฉนวนกันต่อแรงดันเบรคตาวาน ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอของแผ่นกระดาดชนวน และเอกสพอนเนนเชียลที่แสดงวิธีหาหรือการเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งนี้ ขั้วบวกรโนเทอมของแผ่นกระดาดชนวน ในน้ำมันถั่วเหลือง อุณหภูมิห้อง ที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.8.9 แสดงผลการเบรคดาวที่ผ่านของแผ่นกระดาษฉนวน 3 แผ่นด้านหน้า
ติดกับปลายแหลม ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ระยะแกป 2.5 มม.
ในน้ำมันฉนวนเหลือง อุณหภูมิ 31 °C



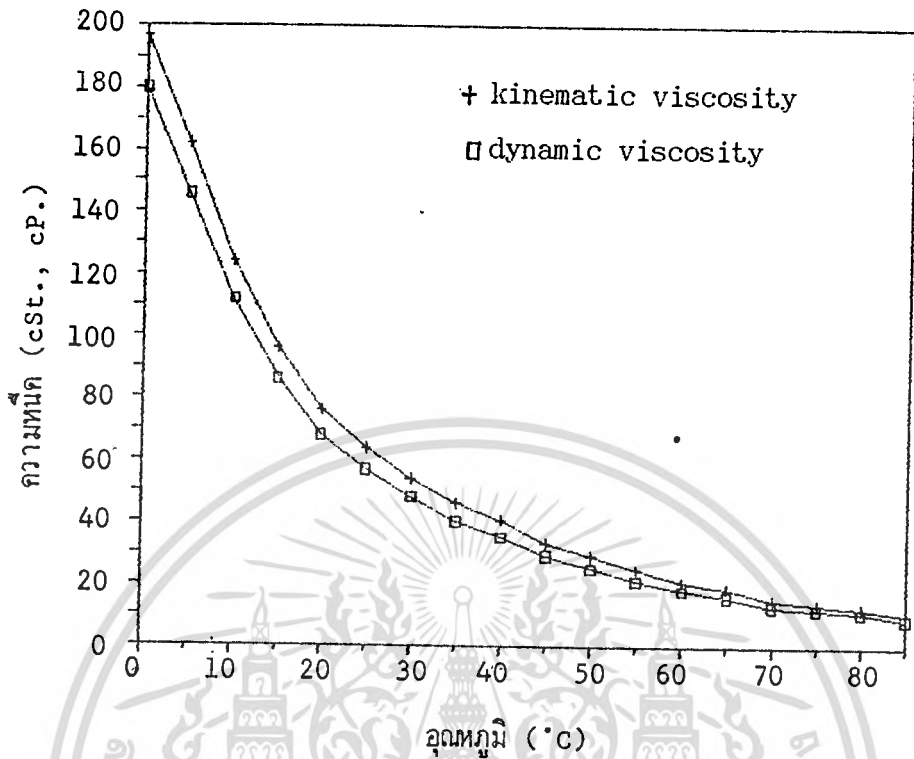
รูปที่ 7.8.10 แสดงผลการเบรคดาวที่ผ่านของแผ่นกระดาษฉนวน 3 แผ่นด้านหลัง
ติดกับปลายแหลม ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ระยะแกป 2.5 มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ในน้ำมันฉนวนเหลือง อุณหภูมิ 31 °C
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

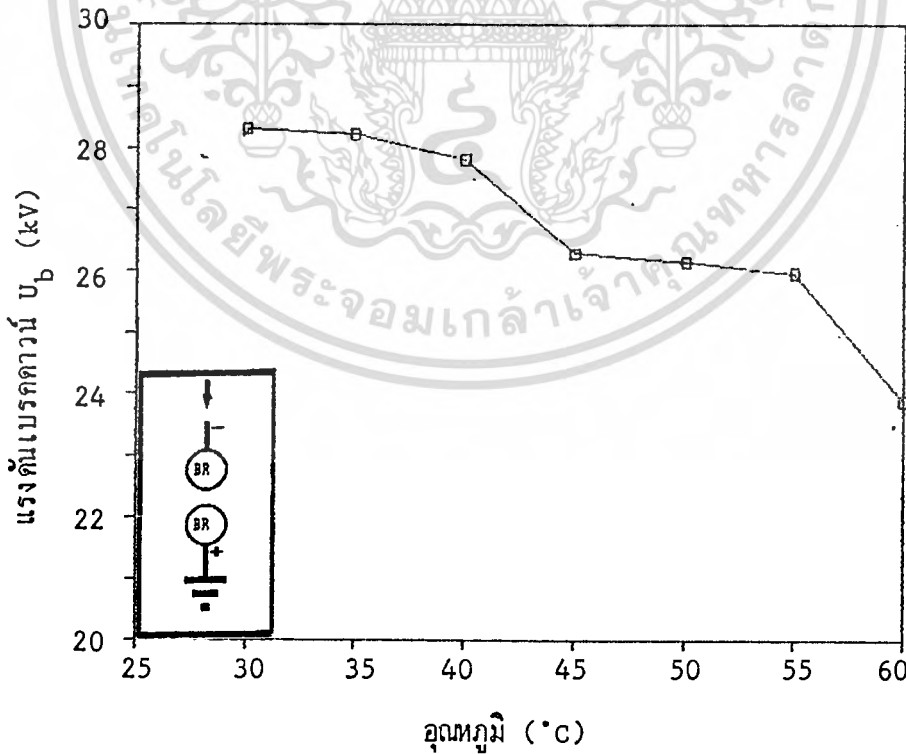
7.9 การทดลองที่ 6

การทดลองนี้ศึกษาผลของความหนืดต่อแรงดันเบรคดาวน์ โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและแรงดันเบรคดาวน์กับอุณหภูมิ จากการทดลองผลของอุณหภูมิมีน้อยมาก ถ้าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิมีน้อยหรือที่ใกล้เคียงกัน แต่จะมีผลต่างกันมากเมื่อความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิมีน้อยมาก เมื่ออุณหภูมิสูงมาก ๆ แรงดันเบรคดาวน์ในน้ำมันพืชจะมีค่าต่ำลง เนื่องจากเมื่อให้พลังงานความร้อนแก่โมเลกุลของฉนวนจะทำให้มีการสั่นสะเทือนภายในมันสะและจะเกิดพลังงานสะสมอยู่ที่มันสะของโมเลกุล เมื่อทำการป้อนแรงดันเข้าไปเพียงพอจะเกิดเบรคดาวน์เร็วกว่าเดิมและใช้แรงดันต่ำกว่าเดิมและง่ายกว่าการเกิดเบรคดาวน์ที่อุณหภูมิห้อง สำหรับการศึกษาที่อุณหภูมิต่ำแรงดันเบรคดาวน์จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการเรียงตัวของโมเลกุลมีระเบียบมากขึ้นเหมือนของแข็งจึงทำให้แรงดันเบรคดาวน์สูงกว่า ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 7.9.2 , 7.9.4 และ 7.9.6 การหาค่าความหนืดที่แปรตามอุณหภูมิต่างๆ โดยการวัดจากเครื่อง Ubbelohde Viscometers สำหรับวัดค่าความหนืดจลน์(kinematic viscosity) และ Brookfield Viscometers สำหรับวัดค่าความหนืดไดนามิก(dynamic viscosity) ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 7.9.1 7.9.3 และ 7.9.5 จากรูปจะเห็นได้ว่า ถ้าอุณหภูมิมเพิ่มขึ้น ความหนืดจะลดลงมีลักษณะคล้ายๆ ฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียล สำหรับความหนืดที่กำหนดตามมาตรฐาน IEC Publ.296 กำหนดความหนืดจลน์มีค่า 40 cSt. ที่อุณหภูมิ 20 แต่ในน้ำมันถั่วเหลืองมีประมาณ 68 cSt. ซึ่งมีค่ามากกว่ามาตรฐานที่กำหนด

ค่าความหนืดมีความสำคัญในขบวนการระบายความร้อนและการไหลวนของฉนวนภายในอุปกรณ์ไฟฟ้า ดังนั้นฉนวนเหลวจึงควรมีค่าความหนืดตามมาตรฐานกำหนด ในการปรับปรุงค่าความหนืดต้องใช้สารละลายที่เป็นตัวทำละลายที่ดี มีจุดติดไฟหรือจุดวาบไฟสูงๆ และต้องละลายเป็นเนื้อเดียวกับน้ำมันพืช(ดูในหัวข้อที่ 7.12)

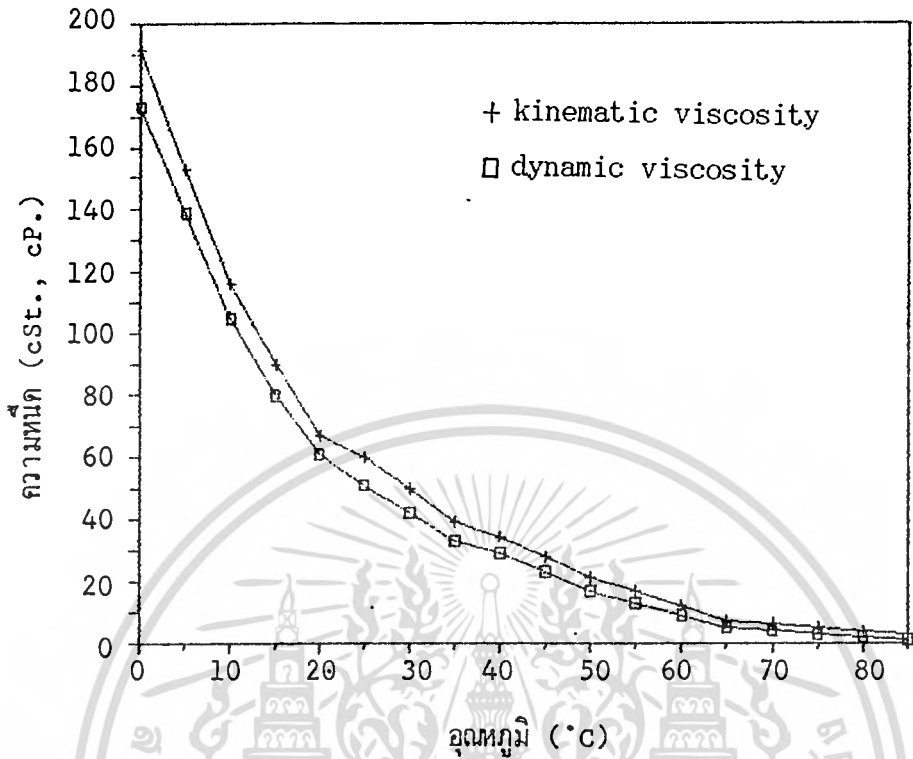


รูปที่ 7.9.1 แสดงผลของความหนืดในเทอมของอุณหภูมิ ในน้ำมันถั่วเหลือง

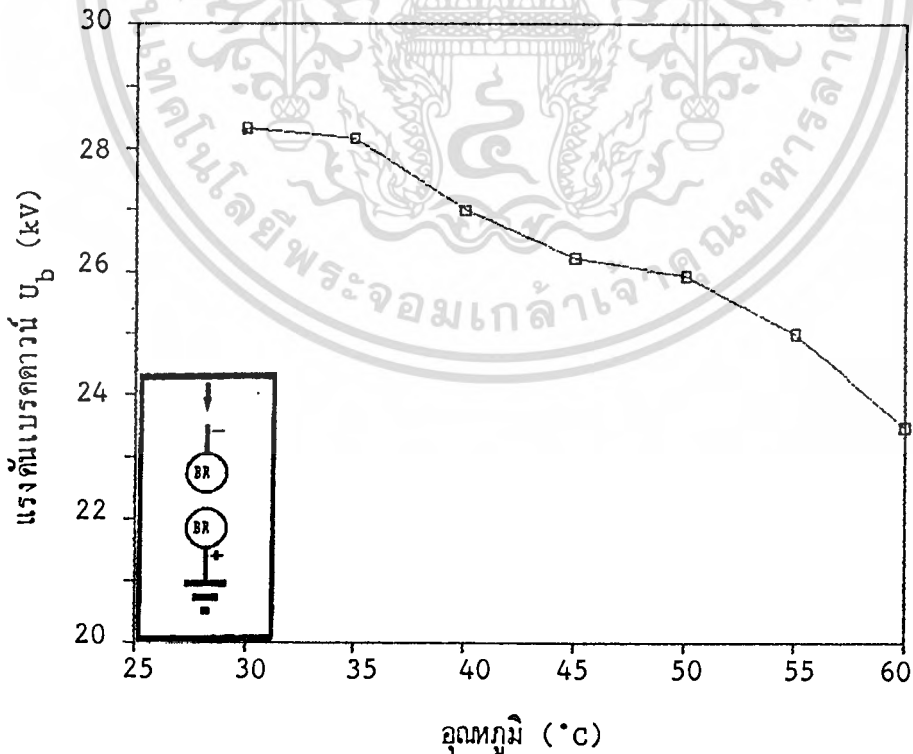


รูปที่ 7.9.2 แรงดันเบรกดาวน์ในเทอมของอุณหภูมิ โดยใช้อิเล็กโตรดทรงกลม-ทรงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ในน้ำมันถั่วเหลือง ระยะแคบ 2.5 ม.ม. นั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

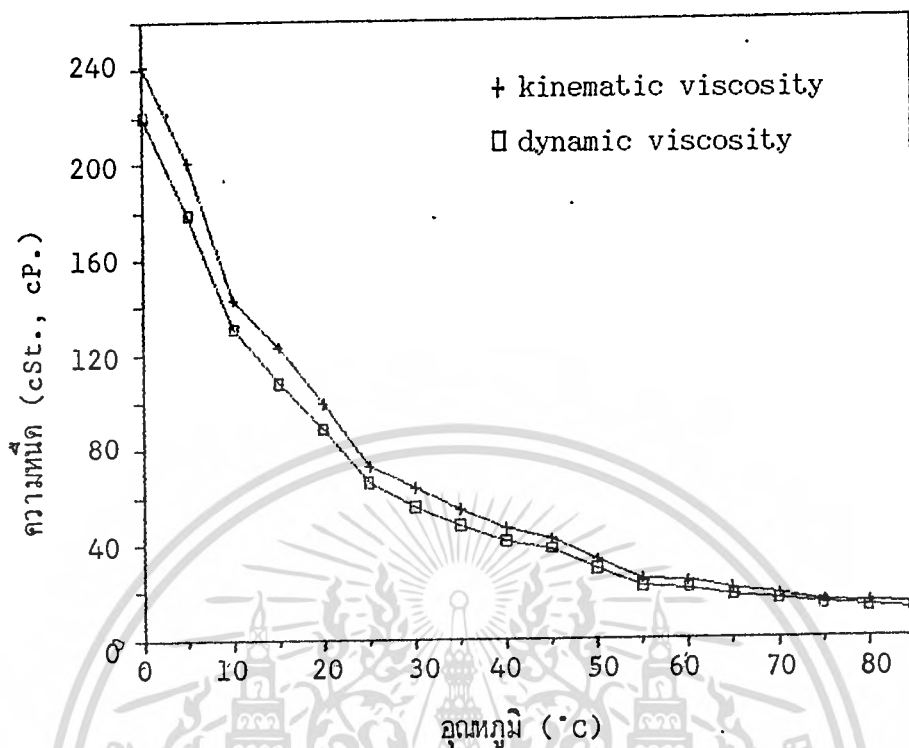


รูปที่ 7.9.3 แสดงผลของความหนืดในเทอมของอุณหภูมิ ในน้ำมันรำข้าว

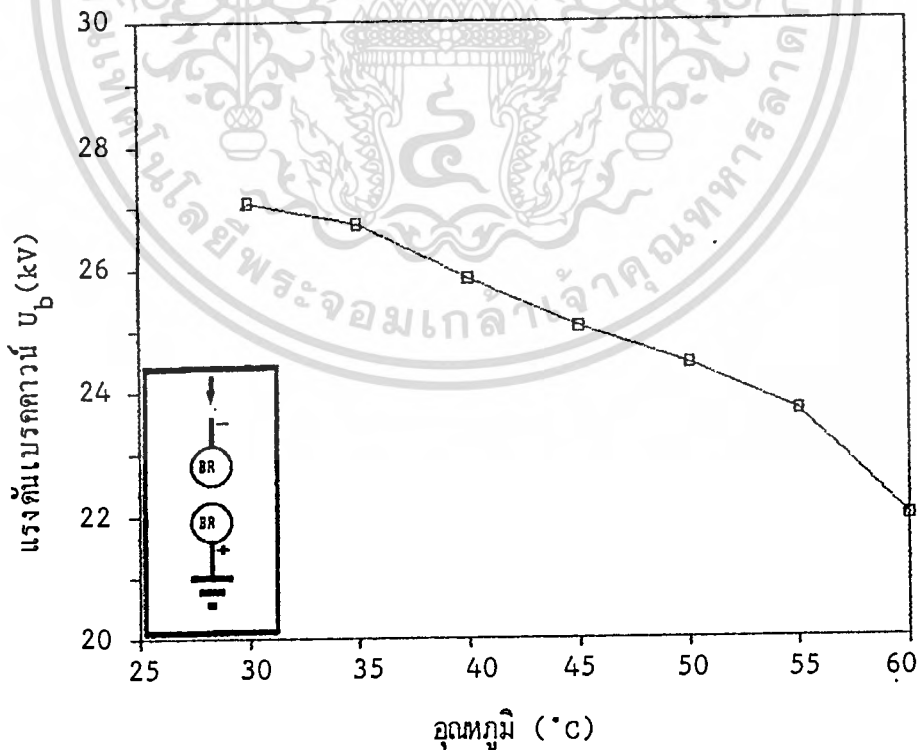


รูปที่ 7.9.4 แรงดันเบรคตาวานในเทอมของอุณหภูมิ โดยใช้โอเล็คโตรดทรงกลม-ทรงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารในน้ำมันรำข้าว ระยะแปก 2.5 ม.ม. เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.9.5 แสดงผลของความหนืดในเทอมของอุณหภูมิ ในน้ำมันปาล์ม

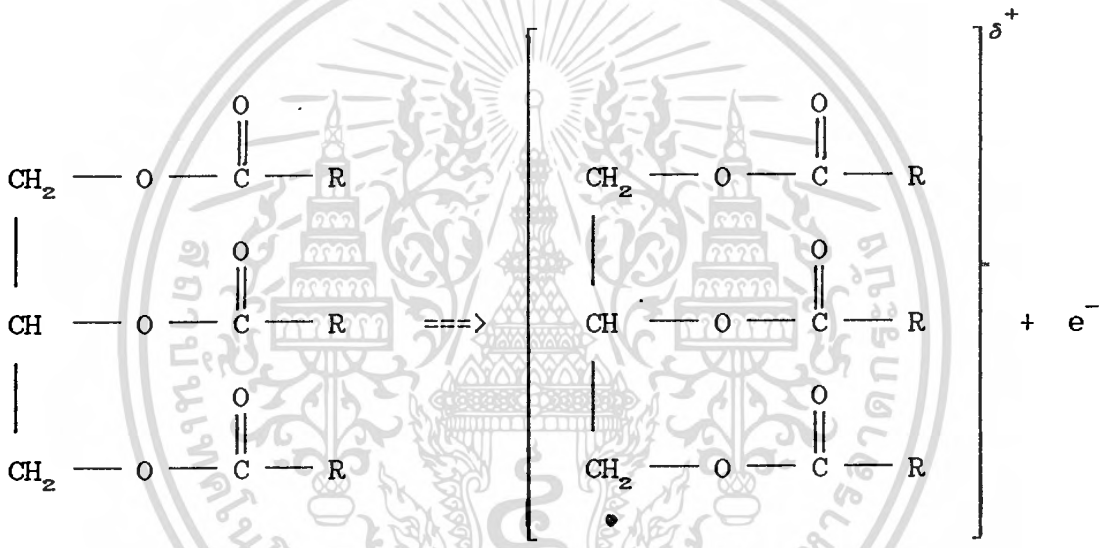


รูปที่ 7.9.6 แรงดันเบรกดาวน์ในเทอมของอุณหภูมิ โดยใช้โอเล็คโตรดทรงกลม-ทรงกลม

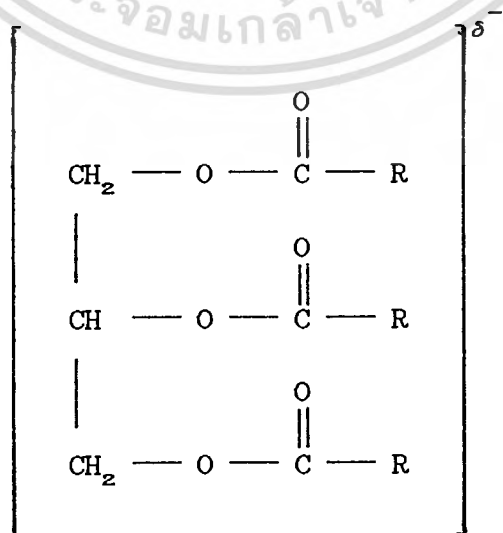
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานนอกกรอบที่อนุญาตไว้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.10 การทดลองที่ 7

การทดลองนี้เป็นการศึกษาโครงสร้างของโมเลกุลและชื่อของโมเลกุลมีผลต่อค่าแรงดันเบรคตาว์น โดยใช้อิเล็กทรอนิกส์แบบจุด-พื้นระนาบ พื้นระนาบ-จุด แบบทรงกลม-ทรงกลม ทรงกลม-พื้นระนาบ และพื้นระนาบ-ทรงกลม จากการทดลองจะเห็นได้ว่าถ้าใช้อิเล็กทรอนิกส์แบบจุด-พื้นระนาบป้อนแรงดันขั้วลบจะมีค่าแรงดันเบรคตาว์นสูงกว่าในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอที่ป้อนด้วยขั้วบวก ทั้งนี้เนื่องมาจากมีการไอออนไนส์เซชันมีอิเล็กตรอนและไอออนบวก จะมีไฟฟ้าต่างไปจากเดิมดังรูป



ก) สภาพปกติของโมเลกุลในน้ำมันพืช ข) สภาพของโมเลกุลหลังการไอออนไนส์เซชัน



เมื่อโมเลกุลแตกตัวเป็นไอออนบวกและอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าสูงตามทฤษฎีการเบรคดาวน์ในก๊าซ[37] ไอออนบวกเหล่านี้จะเคลื่อนที่ไปยังคาโธด การเคลื่อนที่เข้าหาคาโธดจะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของขั้วโมเลกุลและองค์ประกอบภายในโมเลกุลยิ่งไอออนบวกเคลื่อนที่ได้ช้าแรงดันเบรคดาวน์ที่ได้จากขั้วลบจะสูงมาก ในรูปที่ 7.10.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรคดาวน์ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ และ ไม่สม่ำเสมอทั้งขั้วบวกและขั้วลบ ในรูปที่ 7.10.2 แสดงผลของโครงสร้างโมเลกุลและขั้วโมเลกุลโดยใช้อิเล็กทรอนิกส์ทรานสมิชั่น-พื้นระนาบ โดยทำการโคตติงทางด้านพื้นระนาบด้วยแผ่นโพลีเอทิลีน (PE) หนา 0.04 m.m.

จากรูปที่ 7.10.1 จะเห็นได้ว่าแรงดันขั้วลบมีค่าสูงกว่าขั้วบวกและมีค่าต่ำกว่าแรงดันเบรคดาวน์ของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ จากงานวิจัยของ Y. Nitta และ Y. Aihara ที่บอกว่าโมเลกุลที่มีกลุ่มเมทิล (CH_3) จะทำให้แรงดันขั้วลบสูงกว่าขั้วบวก สำหรับโมเลกุลของน้ำมันถั่วเหลืองก็ประกอบด้วยกลุ่มเมทิลเหมือนกัน ทำให้แรงดันขั้วลบสูงกว่า

เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าขั้วลบที่ปลายแหลม ฉนวนเหลวบริเวณปลายแหลมตกอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าที่มีความเครียดสูงเกิดขั้วไฟฟ้าปรากฏภายในโมเลกุลเป็น δ^+ หรือ \oplus กับ δ^- ในขณะนั้นยังไม่เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอน เมื่อเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้นจนมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนและเกิดการไอออนไนส์เซชันบริเวณปลายแหลม ขณะนี้ความเครียดของสนามไฟฟ้าลดลง[4] อิเล็กตรอนที่หลุดออกมานี้จะวิ่งไปชนกับขั้วบวกและจับกับโมเลกุลทำให้สภาพของโมเลกุลหลังชนวนการต้านการเกิดไอออนไนส์เซชันเกิดไอออนลบ เมื่อเพิ่มแรงดันให้สูงมากขึ้นชนวนการต้านการเกิดไอออนไนส์เซชันจะมีมากกว่าการไอออนไนส์เซชัน ทำให้มีไอออนมากขึ้น ไอออนลบที่เกิดขึ้นนี้เดินทางไปคาโธดแต่เคลื่อนที่ได้ช้ามากเมื่อเทียบกับไอออนบวก[13] ขณะนี้ความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้ามีมากขึ้น[4] เนื่องจากประจุค้างและในขณะเดียวกันจะมีประจุบวกจากคาโธดจะวิ่งไปคาโธด โดยต้องรวบรวมประจุบวกให้มากพอเพื่อสร้างกลุ่มประจุบวกข้ามระยะแกปตามทฤษฎีของสตรีมเมอร์ (streamer theory) และเนื่องจากมีชนวนการต่อต้านการเกิดไอออนไนส์เซชันในฉนวนเหลว ดังนั้นกลุ่มประจุบวกจึงเกิดได้ยาก จึงต้องเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้น เป็นเหตุให้การเบรคดาวน์สูงมากกว่า

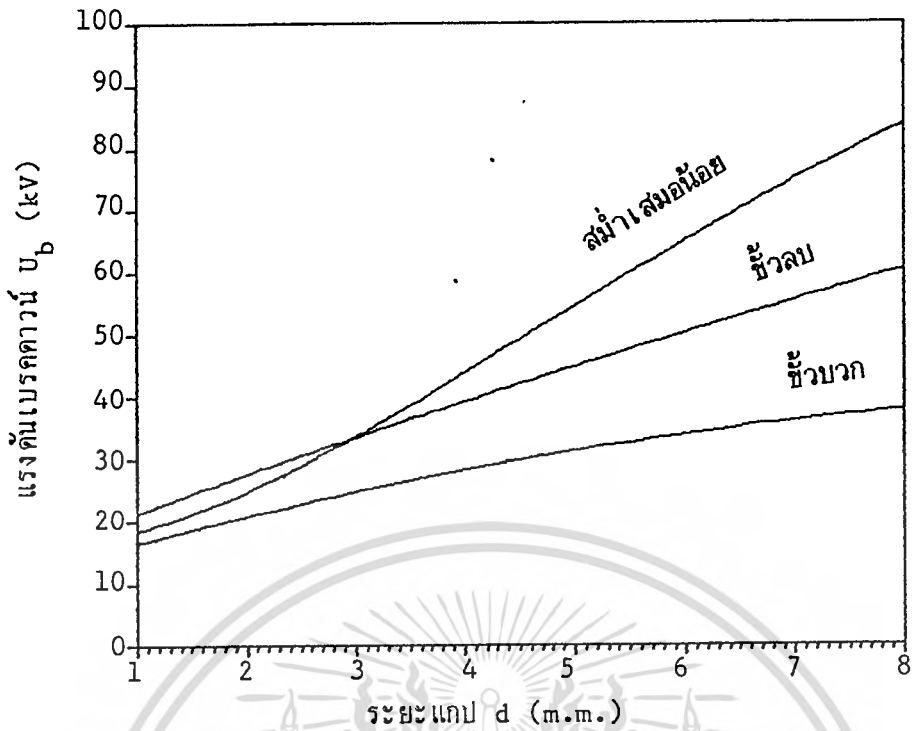
เมื่อป้อนแรงดันขั้วบวกที่ปลายแหลม ฉนวนเหลวบริเวณปลายแหลมตกอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าที่มีความเครียดสูงเกิดขั้วไฟฟ้าปรากฏภายในโมเลกุลเป็น δ^+ หรือ \oplus กับ δ^- เมื่อเพิ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อเผยแพร่ความรู้แก่สาธารณชนโดยไม่เป็นอันขาดและไม่เป็นประโยชน์ต่อใครก็ตาม
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

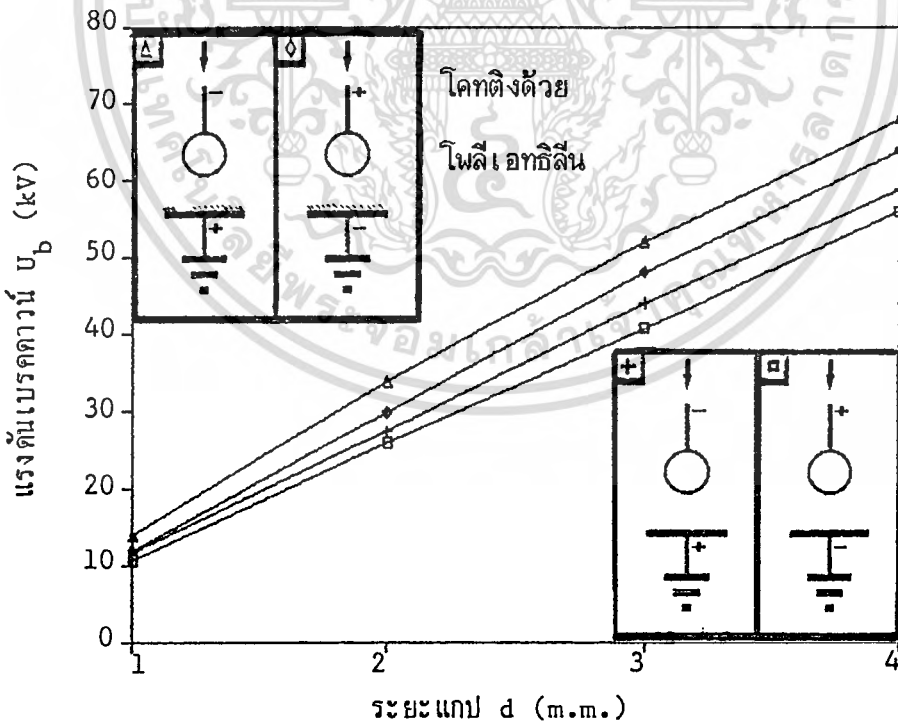
แรงดันให้สูงพอ เกิดการไอออนไนส์เซชันมีไอออนบวกและลบเกิดขึ้น ประจุลบหรืออิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นนี้เคลื่อนที่ได้เร็วกว่าเข้าหาปลายแหลม และรวมตัวกับปลายแหลมทำให้ความเครียดลดลง แต่ประจุบวกเพิ่มขึ้นอย่างมาก บริเวณปลายแหลมเปรียบเสมือนว่าไอออนบวก ทำให้อิเล็กโตรดยาวขึ้นและระยะแกปสั้นลง มีการเติบโตของสตรึมเมอร์เร็วขึ้น มีผลให้แรงดันเบรกดาวมีค่าต่ำกว่าชั่วพล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.10.1 แสดงการเปรียบเทียบแรงดันเบรคตาวาน์ในสนามไฟฟ้าลวดลวดเล็ก และลวดลวดใหญ่ทั้งลวดเล็กและลวดใหญ่ ในน้ำมันถั่วเหลือง อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 7.10.2 แสดงผลของโครงสร้างและลวดโมเลกุล โดยใช้ไอเล็กโตรดทรงกลม-พื้นราบ

โดยทำการโคทติงทางด้านพื้นราบด้วยไฟลิ่งเอทิลีน หนา 0.05 ม.ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ในน้ำมันถั่วเหลือง อุณหภูมิห้อง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.11 การทดลองที่ 8

การทดลองนี้ศึกษาผลของประจุค้างในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ โดยใช้อิเล็กทรอนิกส์แบบจุด-พื้นระนาบ ประจุค้างนี้เกิดจากการดีสชาร์จของฉนวนเหลวภายใต้สนามไฟฟ้าที่มีความเครียดสูงมากๆ เช่น บริเวณปลายแหลม ตามมุมต่างๆของอิเล็กทรอนิกส์ และวิธีการศึกษาในการทดลองนี้มีลักษณะคล้ายการสอบสวนการเกิดโคโรน่าดีสชาร์จ(external partial discharge) ทำให้เกิดประจุค้างบริเวณสนามไฟฟ้าที่มีความเครียดสูง Hickson กับ Mc-clintock [27] และ Metzler และ Schmidt [28] ได้สมมุติให้พลังงานที่เกิดจากการสูญเสียจากโคโรน่าว่าเกิดโดยประจุพาหะใกล้กับปลายแหลม ในขณะที่เกิดประจุพาหะจะมีฟองก๊าซที่ปลายแหลม แสดงให้เห็นว่ามีปรากฏการณ์โคโรน่าเกิดในฉนวนเหลวด้วย จากการนำรูปภาพที่บันทึกได้จากการเกิดโคโรน่าในฉนวนเหลว ปรากฏว่ามีแสงเกิดขึ้นมีรัศมีประมาณ 0.1 มม. ในฉนวนเหลวไฮโดรคาร์บอน

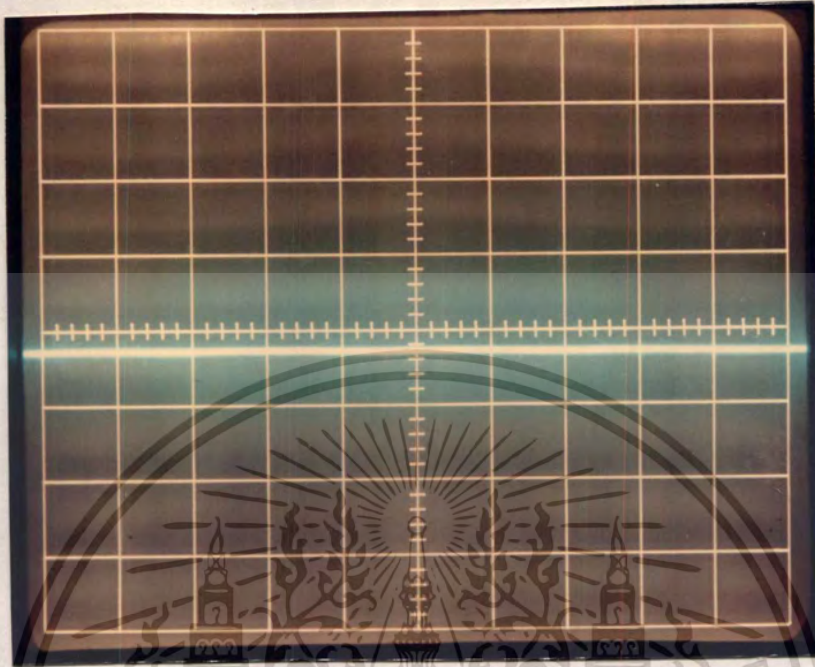
O. Lesaint และ R. Tobazeon [52] สังเกตพบว่า เมื่อฉนวนเหลวน้ำมันเหนียวแปลงไฟฟ้าอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ จะมีขบวนการเกิดฟองอากาศ(bubble generation) ที่มีขนาดเล็กมาก มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 μm และฟองอากาศนี้จะถูกยึดออกก้อให้เกิดสตรีมเมอร์(streamer onset) จากนั้นจะมีการพัฒนาของสตรีมเมอร์มีกระแสไหลเพิ่มจากเดิม มีลักษณะเป็นพัลส์ที่สม่ำเสมอ ในช่วงนี้ถ้าเทียบกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในอากาศเรียกว่าการเกิดโคโรน่าที่สม่ำเสมอ[47] จากนั้นถ้าเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นจะเกิดเบรคดาวน์ในฉนวนเหลว การเปลี่ยนแปลงจากเกิดฟองอากาศเป็น เริ่มต้นสตรีมเมอร์มีขบวนการเกิดที่รวดเร็วและซับซ้อนมากยิ่งขึ้นที่จะตรวจจับในการบันทึกภาพ

ในการทดลองได้ศึกษาขั้นตอนในการเกิดประจุค้างหรือการเกิดโคโรน่าได้ดังนี้

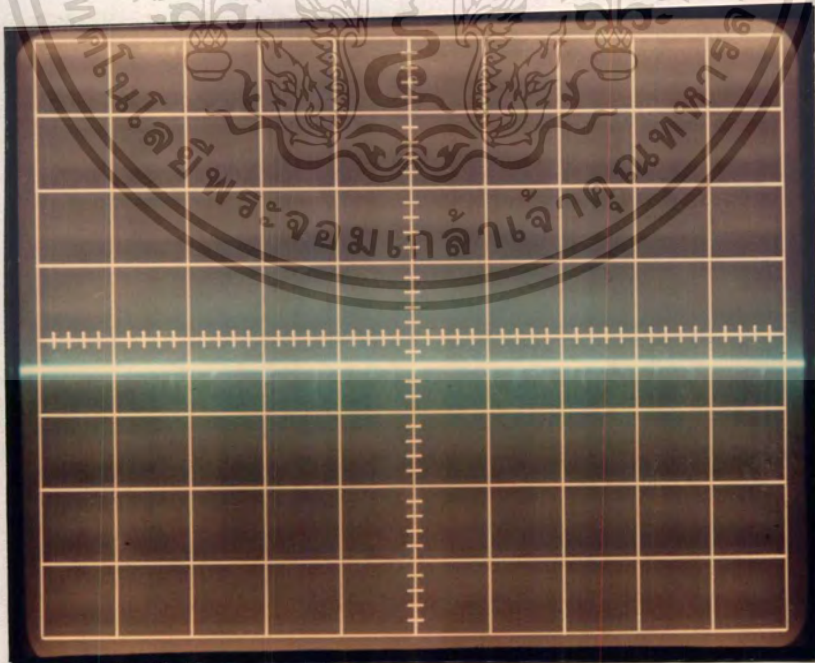
- 1 การเกิดฟองอากาศ
- 2 เริ่มต้นของสตรีมเมอร์
- 3 การพัฒนาของสตรีมเมอร์
- 4 การเริ่มต้นของโคโรน่า
- 5 การเกิดเบรคดาวน์ข้ามช่องแกบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าชั่วพลเริ่มตันจากศูนย์ด้วยอัตราเร็ว 2 kV/sec. จนถึงระดับแรงดัน 26 kV สามารถสังเกตุงการเกิดฟองอากาศจากสโคป ตำแหน่งที่เกิดฟองอากาศแอมปริจูดของพัลล์สูงสุดประมาณ 16 mV ปรากฏดังรูปที่ 7.11.2 ในขณะที่ที่หน้าปัดแวงควบคุมอำนกระแสไฟฟ้าได้ 0.02 mA เมื่อเพิ่มระดับแรงดันให้สูงขึ้น ฟองอากาศจะมีมากและเติบโตมากขึ้นทำให้มีพัลล์เกิดถี่ขึ้นและแอมปริจูดของพัลล์สูงสุดประมาณ 32 mV กระแสไฟฟ้าในช่องแกปจะมีมากขึ้นเราเรียกกระษะนี้ว่าสตรีมเมอร์เริ่มต้น ดังในรูปที่ 7.11.3 จากนั้นถ้าเพิ่มแรงดันไฟฟ้าอีกเล็กน้อยจะสังเกตว่ามีพัลล์เกิดถี่ขึ้นแต่ไม่สม่ำเสมอ แอมปริจูดสูงสุดประมาณ 40 mV ในช่วงนี้เป็นการเติบโตของสตรีมเมอร์ ดังในรูปที่ 7.11.4 จากนั้นเพิ่มแรงดันถึง 29 kV ในขณะเกิดการเกิดพัลล์เริ่มสม่ำเสมอสลับกับไม่สม่ำเสมอ แอมปริจูดสูงสุดในช่วง 36 - 48 mV เราเรียกช่วงนี้ว่าการเริ่มต้นของโคโรน่า ดังในรูปที่ 4.11.5 เมื่อเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้นเล็กน้อยจะสังเกตพัลล์เริ่มสม่ำเสมอและแอมปริจูดในช่วงนี้สูงสุดประมาณ 50 mV ดังในรูปที่ 7.11.6 จากนั้นเมื่อเราเพิ่มแรงดันให้สูงอีกเล็กน้อยจะปรากฏผลในรูปที่ 7.11.7 จะเกิดโคโรน่าอย่างสม่ำเสมอก่อนเกิดเบรคดาวนซ์ข้ามแกป

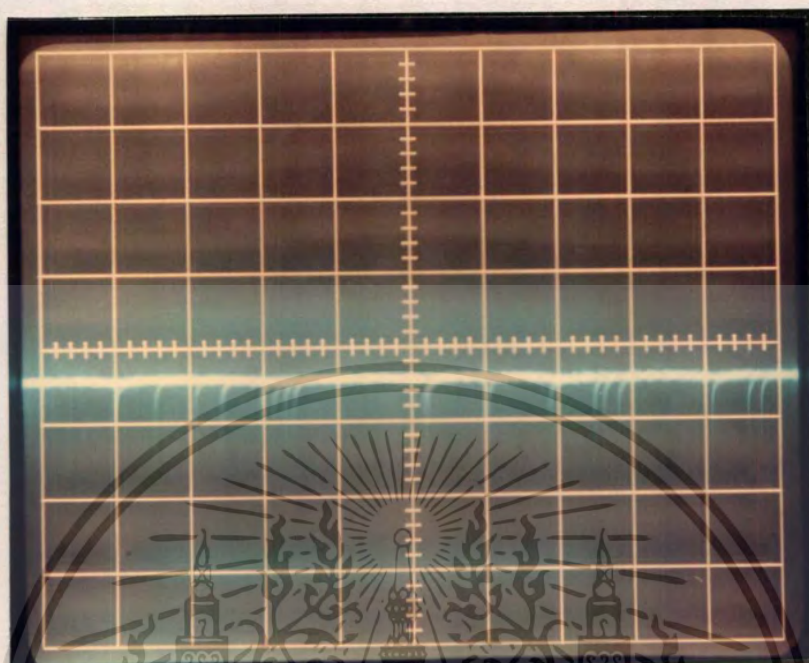


รูปที่ 7.11.1 แสดงลักษณะเริ่มต้นก่อนเกิดฟองอากาศ ในน้ำมันถั่วเหลือง
สเกล 20 mV/div , 5 mSec/div ความต้านทาน 30 K-ohm
กระแสในช่องว่าง 0.02 mA แรงดันไฟฟ้า 26 kV ระยะแกป 2.5 ม.ม.

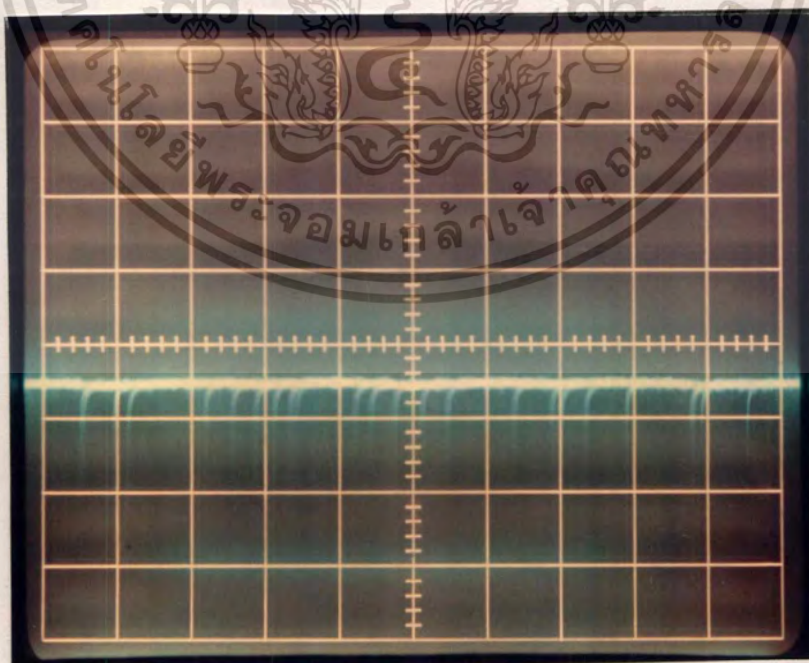


รูปที่ 7.11.2 แสดงลักษณะของระยะการเกิดฟองอากาศ ในน้ำมันถั่วเหลือง

สเกล 20 mV/div , 5 mSec/div ความต้านทาน 30 K-ohm
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
กระแสในช่องว่าง 0.02 mA แรงดันไฟฟ้า 26 kV ระยะแกป 2.5 ม.ม.
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

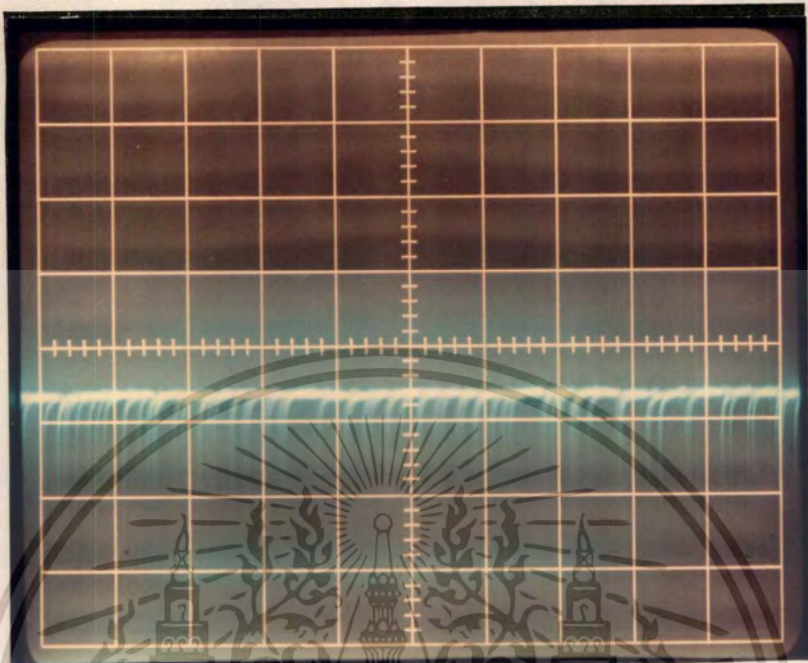


รูปที่ 7.11.3 แสดงลักษณะของระยะการเกิดสตรีมเมอร์ เริ่มต้น ในน้ำมันถั่วเหลือง
สเกล 20 mV/div , 5 mSec/div ความต้านทาน 30 K-ohm
กระแสในช่องว่าง 0.03 mA แรงดันไฟฟ้า 28.4 kV ระยะแกป 2.5 ม.ม.

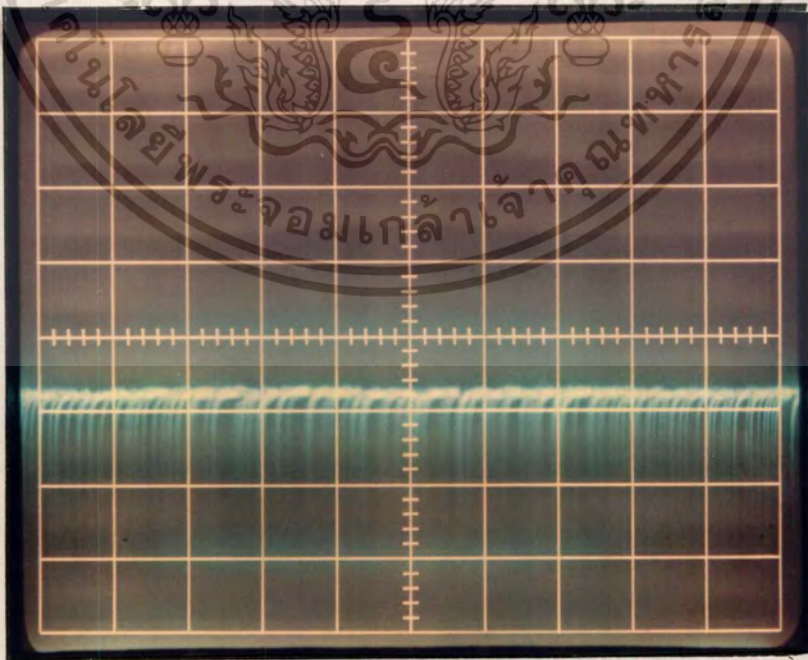


รูปที่ 7.11.4 แสดงลักษณะการเติบโตของสตรีมเมอร์ ในน้ำมันถั่วเหลือง

สเกล 20 mV/div , 5 mSec/div ความต้านทาน 30 K-ohm
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปตีพิมพ์หรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
กระแสในช่องว่าง 0.033 mA แรงดันไฟฟ้า 29 kV ระยะแกป 2.5 ม.ม.
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

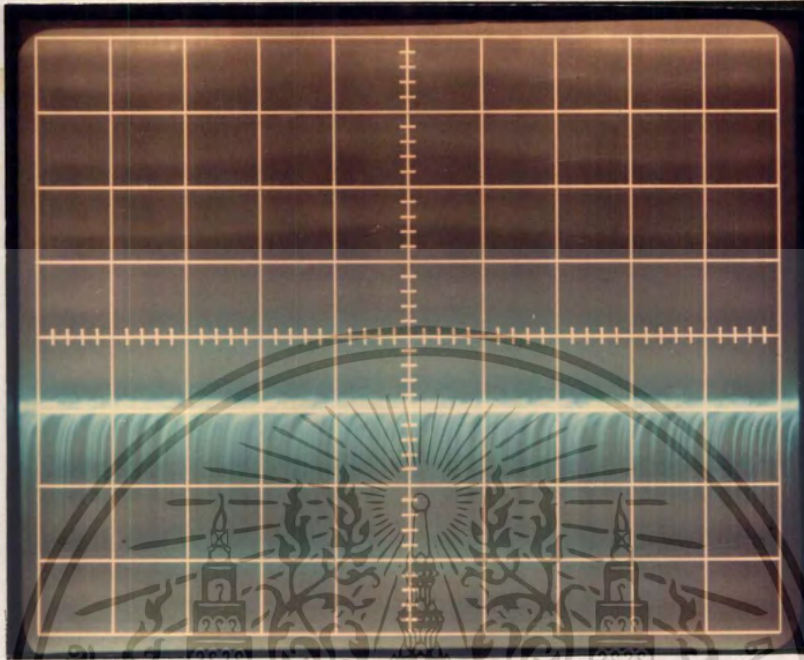


รูปที่ 7.11.5 แสดงลักษณะการเริ่มต้นของโคโรนา ในน้ำมันถั่วเหลือง
สเกล 20 mV/div , 5 mSec/div ความต้านทาน 30 K-ohm
กระแสในช่องว่าง 0.04 mA แรงดันไฟฟ้า 31 kV ระยะแกป 2.5 ม.ม.



รูปที่ 7.11.6 แสดงลักษณะการเกิดโคโรนาสม่ำเสมอ ในน้ำมันถั่วเหลือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
สเกล 20 mV/div , 5 mSec/div ความต้านทาน 30 K-ohm
กระแสในช่องว่าง 0.042 mA แรงดันไฟฟ้า 32 kV ระยะแกป 2.5 ม.ม.
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.11.7 แสดงลักษณะการเกิดโคโรนาก่อนเกิดเบรคดาวน์ ในน้ำมันถั่วเหลือง
สเกล 20 mV/div , 5 mSec/div ความต้านทาน 30 K-ohm
กระแสในช่องว่าง 0.053 mA แรงดันไฟฟ้า 32 kV ระยะแกป 2.5 ม.ม.

7.12 การปรับปรุงแรงดันเบรคดาวน

การปรับปรุงแรงดันเบรคดาวนในน้ำมันพืช โดยการเติมสารเคมีที่มีคุณสมบัติเป็นตัวเป็นตัวทำละลายได้ดี และไม่ติดไฟหรือมีจุดวาบไฟสูง ทั้งนี้เพื่อให้ความหนืดมีค่าลดลง การระบายความร้อนจะดีขึ้น[23] นอกจากนี้แรงดันเบรคดาวนจะต้องอยู่ในช่วงที่ใช้งานได้

ตารางที่ 7.12 แสดงสารประกอบไฮโดรคาร์บอนต่อแรงดันเบรคดาวน

ในน้ำมันถั่วเหลือง โดยใช้โอเล็คโตรดทรงกลม-ทรงกลม
ทำจากทองเหลือง ระยะแก๊ป 2.5 มม. อุณหภูมิห้อง

สารเคมี	แรงดันเบรคดาวน(kV)	เพิ่มขึ้น %	ความหนืด (cSt)	ลดลง %
1 ไม่เติมสาร	26.25	-	55.32	-
2 CCl ₄ 5 %	26.65	1.52	48.30	12.68
3 CCl ₄ 10 %	25.60	-2.47	43.71	20.09
4 CCl ₄ 15 %	23.40	-10.85	39.21	29.12
5 สาร A 5 %	28.27	7.69	47.40	14.31
6 สาร A 10 %	27.20	3.62	42.20	23.71
7 สาร A 15 %	25.60	-2.47	38.49	30.42

สาร A = CCl₄ + Naphthalene

การผสมสารที่มีคุณสมบัติเป็นตัวทำละลายลงไปน้ำมันพืช เพื่อให้มีคุณสมบัติเทียบเคียงกับน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้ามากขึ้น จากการทดลองผสมสาร CCl₄ 5% , 10% และ 15% จะทำให้ความหนืดลดลง โดยแรงดันเบรคดาวนยังอยู่ในช่วงที่ใช้งานได้ เนื่องจาก CCl₄ มีอัตราการระเหยมากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น หลังจากผสมแทนทาลีนลงไปประมาณ 10 % โดยปริมาตร อัตรา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับวิชาการ เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า การระเหยลดลง เมื่อนำมาผสมกับน้ำมันถั่วเหลือง 5% แรงดันเบรคดาวนสูงขึ้น 7.69 % และไม่วางกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าผสม 15% แรงดันเบรคดาวนั้นจะลดลง 2.47 % ซึ่งอยู่ในช่วงที่ใช้งานได้ จากมาตรฐาน IEC Publ. 296 ได้กำหนดความหนืดจลน์ที่อุณหภูมิ 20 ° C ประมาณ 40 cSt. สำหรับ Class I และ ประมาณ 25 cSt. สำหรับ Class II จะเห็นได้ว่าความหนืดลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับ น้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์ที่ 27° C ประมาณ 21 cSt. ความหนืดของน้ำมันพีชที่ 4 และ 7 มีค่าสูงกว่าน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์มาก ซึ่งค่าความหนืดที่ได้ยังไม่น่าพอใจ ซึ่งจะต้องมีการปรับปรุงต่อไป ตามปกติอุณหภูมิของฉนวนเหลวในหม้อแปลงไฟฟ้าประมาณ 40-60 ° C ที่อุณหภูมิ ฉนวนเหลวจะมีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า

จากการทดลองทั้ง 7 การทดลองพบว่า หลังจากการเบรคดาวนั้นประมาณ 4-10 ครั้ง ภายในช่องว่างระหว่างอิเล็คโตรด มีสะเก็ดที่เกิดจากการเรียงตัวของคาร์บอนตามแนวทิศทางการเบรคดาวนั้น เมื่อผสมสาร CCl_4 และสาร A ลงไป เมื่อตรวจสอบการเบรคดาวนั้นจะไม่พบสะเก็ดของคาร์บอนระหว่างอิเล็คโตรด จนกระทั่งเบรคดาวนั้นไปประมาณครั้งที่ 20 ไปแล้วจึงเริ่มมีสะเก็ดคาร์บอน จะเห็นได้ว่าเมื่อผสมสารที่เป็นตัวทำลายที่เหมาะสม สามารถปรับปรุงแรงดันเบรคดาวนั้นให้มีค่าสูงขึ้น

บทที่ 8

สรุปผลการทดลอง

จากการตรวจสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันพืชผ่านกรรมวิธี ด้วยอิเล็กทรอนิกส์ ทรานซิมิตเตอร์-ทรานสคอนเวอร์เตอร์ ทำมาจากทองเหลืองภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับ[1] พบว่าคุณลักษณะของน้ำมันพืช (ถั่วเหลืองและรำข้าว) บางอย่างเช่น ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า จุดวาบไฟ และความชื้นปะปน มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันหม้อแปลงคุณภาพดี ดังนั้นเพื่อให้แน่ใจว่าน้ำมันพืชมีคุณสมบัติพอที่จะนำมาปรับปรุงเป็นฉนวนไฟฟ้า จึงตรวจสอบปัจจัยที่มีผลกระทบต่อแรงดันเบรคดาวน์ในน้ำมันพืชภายใต้กระแสตรง เพื่อศึกษาโครงสร้างของโมเลกุลและชีวโมเลกุล และจำลองเหตุการณ์ต่างๆ ที่เป็นสาเหตุให้เกิดการดีสชาร์จภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงซึ่งประสบปัญหาตลอดมา จากการตรวจสอบปัจจัยต่างๆที่มีต่อแรงดันเบรคดาวน์ สามารถสรุปได้ดังนี้

8.1 การทดลองตรวจสอบแรงดันเบรคดาวน์ในน้ำมันพืชทดลองที่อุณหภูมิ 29 ± 2 °C ความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 55 - 75 % ณ ความดันบรรยากาศ 760 ± 0.5 ม.ม.ปรอท ความผิดพลาดในการทดลองประมาณ 3.45 % ซึ่งความผิดพลาดส่วนใหญ่เกิดมาจากการวัดแรงดันไฟฟ้าและการตั้งระยะแกป

8.2 การปรับตัวของน้ำมันพืชให้ผลแตกต่างจากน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของน้ำมันทั้งสองไม่เหมือนกัน การปรับตัวของน้ำมันพืชมีแนวโน้มสูงขึ้นในช่วงกลางของการทดลองและลดต่ำลงในช่วงท้ายๆของการทดลอง ซึ่งจะแตกต่างกับน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีแนวโน้มการปรับตัวค่อนข้างคงที่และลดลงในช่วงท้ายๆ

8.3 การกระจายของแรงดันเบรคดาวน์ของน้ำมันพืชภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรงชั่วเวลาทดลอง 20 ครั้งมีประมาณ 2.11 kV ซึ่งน้อยกว่าการกระจายของแรงดันเบรคดาวน์ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับ[1] มีประมาณ 4.17 kV และค่าแรงดันเบรคดาวน์กระแสตรงน้อยกว่าแรงดันเบรคดาวน์กระแสสลับประมาณ 1.95-2 เท่า แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างโมเลกุลและชีวโมเลกุลมีผลต่อแรงดันเบรคดาวน์ ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลน้ำมันพืชเป็นโมเลกุลใหญ่ ซับซ้อน

Hz ทำให้โมเลกุลพันกันยากที่จะแตกตัวหรือไอออนไนส์เซชัน แรงดันเบรกดาวนิงสูง ส่วนในสนามไฟฟ้ากระแสตรง โมเลกุลไม่มีการสลับขั้ว แต่การมีวางตัวในตำแหน่งตามค่าโพลาริซ์(ขั้วบวกของโมเลกุลหันขั้วเข้าหาคาโธด ส่วนขั้วลบหันขั้วเข้าหาอโนด) การแตกตัวหรือไอออนไนส์เซชันของโมเลกุลจึงง่ายกว่า จึงทำให้แรงดันเบรกดาวนิงต่ำกว่า

8.4 เมื่อเปรียบเทียบแรงดันเบรกดาวนิงระหว่างน้ำมันพืชทั้ง 3 ชนิดกับน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า แรงดันเบรกดาวนิงของน้ำมันถั่วเหลืองสูงสุด และน้ำมันรำข้าว น้ำมันปาล์ม น้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาเลเท็กซ์ ตามลำดับ จะเห็นว่าน้ำมันพืชมีแรงดันเบรกดาวนิงสูงกว่าประมาณ 7-8 kV

8.5 เมื่อเปรียบเทียบแรงดันเบรกดาวนิงในน้ำมันพืชโดยใช้อิเล็กโตรดทำจากสารต่างชนิดกัน แรงดันเบรกดาวนิงที่ได้จากอิเล็กโตรดเหล็กแอสเทนเลส มีค่าสูงสุด และทองเหลืองอลูมิเนียม ตามลำดับ สามารถสรุปได้ว่า อิเล็กโตรดที่ทำมาจากสารโลหะที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวของโลหะสูงจะให้ค่าแรงดันเบรกดาวนิงสูงกว่าโลหะที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวต่ำ ในนวนานเหลวชนิดเดียวกัน ซึ่งคุณสมบัตินี้เหมือนกับการเบรกดาวนิงในก๊าซ[49, 60]

8.6 การศึกษาผลของขนาดพื้นที่ผิวอิเล็กโตรดต่อแรงดันเบรกดาวนิงในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาเลเท็กซ์และน้ำมันถั่วเหลือง พบว่าพื้นที่ผิวลดลงแต่แรงดันเบรกดาวนิงจะสูงขึ้นแต่ไม่มากนัก จากการทดลองลดพื้นที่ลง 43.74 % แรงดันเพิ่มขึ้น 3.846 % และ 5.59 % ในน้ำมันถั่วเหลืองและน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาเลเท็กซ์ตามลำดับ

8.7 การศึกษาผลของรูปร่างเรขาคณิตต่อแรงดันเบรกดาวนิงในนวนานเหลว พบว่าแรงดันเบรกดาวนิงขั้วลบของน้ำมันพืชและน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาเลเท็กซ์จะเพิ่มขึ้นเมื่อส.ป.ส. แพลเตอร์สนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จากความสัมพันธ์ระหว่าง ส.ป.ส. แพลเตอร์สนามไฟฟ้ากับลักษณะรูปร่างเรขาคณิตของอิเล็กโตรด ถ้ารูปร่างเรขาคณิตเปลี่ยนไป รูปแบบของสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดและส.ป.ส. แพลเตอร์สนามไฟฟ้าเปลี่ยนไปด้วย และรูปแบบอิเล็กโตรดที่มีค่า ส.ป.ส. แพลเตอร์สนามไฟฟ้าสูง จะมีค่าแรงดันเบรกดาวนิงสูงกว่าอิเล็กโตรดที่มีค่า ส.ป.ส. แพลเตอร์สนามไฟฟ้าต่ำ

8.8 จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรกดาวนิงกับระยะแคปในน้ำมันพืชทั้ง 3

ชนิดเปรียบเทียบกับแรงดันเบรกดาวนิงของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า จะได้ผลเทียบเคียงกันแต่น้ำมันพืชไม่วาร์ณิใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะสูงกว่าเล็กน้อย ซึ่งลักษณะกราฟแรงดันไฟฟ้า-ระยะแกปในน้ำมันจะมีแรงดันเบรคดาวน์เพิ่มขึ้น แต่อัตราการเพิ่มลดลงเมื่อระยะแกปเพิ่มขึ้น หรือความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าหรือความเข้มของสนามไฟฟ้าจะลดลงเมื่อระยะแกปเพิ่มขึ้น มีลักษณะเช่นเดียวกับการเบรคดาวน์ในอากาศ[47-50] สำหรับผลของการสลัปชั้วอิเล็กโตรด โดยใช้อิเล็กโตรดต่างกันทำจากเหล็กแอสตันเลสกับอลูมิเนียมพบว่าที่ระยะแกปในช่วง 1 - 3 มม. มีแรงดันเบรคดาวน์สูงกว่าในช่วงเดียวกันกับที่ใช้อิเล็กโตรดชนิดเดียวกันประมาณ 6 - 7% และ 4 - 6% สำหรับอลูมิเนียมและเหล็กแอสตันเลสตามลำดับ

8.9 การศึกษาผลของแผ่นฉนวนกั้นระหว่างอิเล็กโตรด ทำให้แรงดันเบรคดาวน์เพิ่มขึ้นจากเดิม(เมื่อไม่ได้กั้นแผ่นฉนวน)ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ และตำแหน่งของแผ่นฉนวนกั้นมีผลน้อยมากเนื่องจากอยู่ในสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ ในอากาศจะไม่มีผล[60] การกั้นแผ่นฉนวนที่ด้านอานโอดจะทำให้แรงดันสูงกว่าเล็กน้อย และเมื่อความหนาของแผ่นฉนวนเพิ่มขึ้นแรงดันเบรคดาวน์จะสูงขึ้นด้วย เช่น ความหนาของแผ่นฉนวนเพิ่มขึ้น 2 และ 3 เท่า แรงดันเบรคดาวน์จะสูงเป็น 0.4 และ 2 kV เมื่อกั้นทางด้านอานโอด กับ 0.7 และ 1.2 kV เมื่อกั้นด้านคาโทดตามลำดับ สำหรับในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ พบว่าแรงดันเบรคดาวน์สูงขึ้นกว่าเดิมมากและขึ้นอยู่กับตำแหน่งการวางตัวของแผ่นฉนวนเหมือนในอากาศ[49,60] และการนำแผ่นฉนวนกั้นติดด้านคาโทด แรงดันเบรคดาวน์จะต่ำกว่าเมื่อกั้นที่อานโอดหรือติดกับพื้นระนาบ

8.10 จากการศึกษาผลของความหนืดต่อแรงดันเบรคดาวน์ พบว่าความหนืดลดลง มีผลให้แรงดันเบรคดาวน์ลดลงด้วย ทั้งนี้เนื่องจากความหนืดลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น[23] การสั่นของพันธะไนโมเลกุล ทำให้เกิดความคล่องตัว แรงยึดเหนี่ยวไนโมเลกุลลดลง เมื่อเกิดการไอออนไนส์เซชันหรือการต่อต้านการเกิดไอออนไนส์เซชัน การเคลื่อนที่ของประจุลบเร็วกว่าเดิม แรงดันเบรคดาวน์จึงลดลงแต่ เนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่อแรงดันเบรคดาวน์น้อยมาก ดังนั้นความหนืดจึงมีผลไม่มากนัก แต่จะมีความสำคัญในการระบายความร้อนมากกว่า

8.11 จากการศึกษาผลของโครงสร้างโมเลกุลและชั้วโมเลกุลต่อแรงดันเบรคดาวน์พบว่าโครงสร้างของโมเลกุลที่มีกลุ่มเมซิล(CH₃) เป็นองค์ประกอบ[10] เช่น ส่วนประกอบแนพทาลีน พาราฟิน สารประกอบของอะโรมาติก น้ำมันซิลิโคน น้ำมันคาสเตอร์ จะมีแรงดันเบรคดาวน์ที่ป้อนแรงดันไฟฟ้าด้วยชั้วลบสูงกว่าที่ป้อนด้วยแรงดันไฟฟ้าชั้วบวก ในโมเลกุลของน้ำมันเพชก็มีกลุ่มเมซิล

ประกอบอยู่ ดังนั้นแรงดันเบรคดาวน์ของน้ำมันถั่วเหลืองที่ป้อนด้วยแรงดันไฟฟ้าชั่วพลสูงกว่าชั่วบวก และคุณสมบัติอันนี้เองที่ทำให้น้ำมันพืชเทียบเคียงกับน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าหรือฉนวนเหลวได้ สำหรับการโคตติงเป็นการศึกษาชั่วโมเลกุลอีกอย่างหนึ่ง สามารถบอกว่าโมเลกุลมีชั่วมากน้อยขนาดไหน ถ้ามีชั่วไฟฟ้าต่างกันมากแรงดันเบรคดาวน์จากการไม่โคตติงจะแตกต่างกับที่โคตติงมาก ในน้ำมันพืชพบว่าแรงดันเบรคดาวน์ต่างกันประมาณ 25 % ที่ระยะแกป 2 ม.ม.

8.12 เนื่องจากมีกลุ่มเมซิลประกอบอยู่ เมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงๆ จะเกิดปรากฏการณ์โคโรน่า เกิดประจุลบค้างอยู่ในสนามไฟฟ้า เป็นสาเหตุทำให้แรงดันเบรคดาวน์ที่ป้อนด้วยแรงดันไฟฟ้าชั่วพลสูงกว่าชั่วบวก เมื่อใช้สโคปตรวจดูแรงดันไฟฟ้าคร่อมความต้านทานขนาด 30 k-ohm พบว่ามีพัลส์เกิดขึ้นเนื่องจากไอออนลบ ลักษณะพัลส์เริ่มต้นจากการเกิดฟองอากาศและเติบโตเป็นสตรีมเมอร์ เมื่อดูในสโคปจะเริ่มมีพัลส์ถี่ขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งการเกิดพัลส์จะคงที่ซึ่งเรียกว่าการเกิดโคโรน่าในฉนวนเหลว ในช่วงนี้พัลส์สูงชันและมีระเบียบขึ้นเป็นระยะของโคโรน่าสม่ำเสมอ จากนั้นถ้าเพิ่มแรงดันมากพอกระแสในช่องว่างไหลมากขึ้นเป็นสาเหตุการเบรคดาวน์ในที่สุด

8.13 ในขณะที่เกิดโคโรน่าสม่ำเสมอ พัลส์จะมีความถี่ที่เนื่องมาจากมีไอออนบวกเกิดขึ้นจากขบวนการไอออนไนส์เซชัน ไอออนลบเกิดจากขบวนการต่อต้านไอออนไนส์เซชันมีอัตราการเกิดและการรวมตัวใกล้เคียงกัน เมื่อเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าให้มากจนอัตราการเกิดไอออนลบจากขบวนการต่อต้านการเกิดไอออนไนส์เซชันมีมากกว่า ไอออนบวกจะเห็นแอมปริจูดสูงเป็นช่วงๆ จากนั้นจะมีการพัฒนาสตรีมเมอร์ข้ามช่องว่าง และเกิดการเบรคดาวน์ในที่สุด

8.14 จากผลการปรับปรุงค่าแรงดันเบรคดาวน์ในน้ำมันถั่วเหลือง โดยเติมสาร CCl_4 เป็นตัวทำลายที่ดี ตามปกติความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของ CCl_4 มีประมาณ 14-16 kV/m.m. เมื่อนำมาผสมสาร CCl_4 5 % กับน้ำมันพืชแรงดันเบรคดาวน์ของน้ำมันจะเพิ่มขึ้น ถ้าอัตราส่วนมากกว่านั้นแรงดันเบรคดาวน์จะลดลง จากการทดลองสังเกตได้ว่าสาร CCl_4 มีอัตราการกลายเป็นไอสูง จึงต้องผสมแทนพาทาลีนลงไปเพื่อลดอัตราการกลายเป็นไอ เมื่อนำสาร CCl_4 กับแทนพาทาลีน ประมาณ 15% ผสมกับน้ำมันพืชแรงดันเบรคดาวน์จะลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการศึกษาเรื่องการเบรคดาวน์ในฉนวนน้ำมันพืช เป็นการเริ่มต้นพัฒนาคุณสมบัติของฉนวนไฟฟ้า ยังมีคุณสมบัติของฉนวนไฟฟ้าอีกหลายอย่างที่ขังไม่ได้ทดลอง ซึ่งจะมีผลต่อเสถียรภาพของน้ำมันพืชทั้งทางไฟฟ้า ทางกายภาพ และทางเคมี เช่น นกิตความต้านทาน พลังงานสูญเสียไปค่าไดอิเล็กตริก(dielectric loss) อัตราการกลายเป็นไอ จุดวาบไฟ ค่าความเป็นกรด การสึกกร่อนของโลหะ และนำน้ำมันไปใช้ในงานจริงภายใต้แรงดันไฟฟ้าสูง มีความร้อนต่อเนื่องจากการศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันพืชเบื้องต้น ผู้เขียนคิดว่ามีความเป็นไปได้ที่จะนำน้ำมันพืชมาพัฒนาเป็นฉนวนไฟฟ้าได้ หวังว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นแหล่งความรู้ในการพัฒนาต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Kumpurk, " Study of the Dielectric Strength of Vegetable oils Under A.C. Voltage", Master Thesis in KMITL , 1985
- [2] N. Nikuln , "Fundamentals of electrical Materials", Mir Pulishers Moscow , 1984
- [3] K. Yoshino , S. H. Kim , K. Kaneto and Y. Inuishi, " Dielectric Breakdown of Liquid Helium and Influence of Electrode Coating", IEEE Trans. Elect. Insul. Vol. EI-20 No. 2 , April 1985
- [4] Katsumi Yoshino , "Dependence of Dielectric Breakdown of Liquids on Molecular Structure", IEEE Trans. Elect. Insul. Vol. EI-15 , No. 3 , June 1980
- [5] E. O. Forster, "Research in Dynamics of Electrical Breakdown in Liquids Dielectric", IEEE Trans. Elect. Insul. Vol. EI-15 No. 3, June 1980
- [6] E. O. Forster , "The Reseach for Universal Features of Electrical Breakdown in Solid , Liquids and Gases ", IEEE Trans. Elect. Insul. Vol. EI-17 No. 6 , December 1982
- [7] J. Perret , " Study of the Dielectric Breakdown of Insulating Mineral Oils Under Impulse Voltages ", IEEE Trans. Elect. Insul. Vol. EI-16 No. 4 , August 1981
- [8] S. Kim , M. Terauchi , K. Yochino and Y. Isuishi, " Conditioning Effect of Dielectric Breakdown in Liquids Helium", Japanese Journal of Appl. Phys. Vol. 22 No. 6 , June 1983
- [9] H. Yamashita and H. Amano , " The Effect of Space Charge on DC Breakdown and Light Emission in Dielectric Liquids Under Non-Uniform Fields", IEEE Trans. Elect. Insul. Vol. EI-20 No. 2, April 1985
- [10] Yoshitaka Nitta and Yoshinori Aihara , "Polarity Effect on Breakdown Voltage in Organic Liquids ", IEEE Trans. Elect. Insul. Vol. EI-11 No.3 , September 1976

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] R. Ishibashi and R. Hanaoka, "High-Field Electronic Conduction in Liquid Nitrogen", IEEE Trans. Elect. Insul. Vol. EI-17 No. 6, December 1982
- [12] A. A. Zaky, I. Y. Megahed and S.A. Yehia, "The Direct Breakdown Voltage of Silicone Oil Under Uniform Fields", IEEE Trans. Elect. Insul. Vol. EI-20 No. 2, April 1985
- [13] Y. Inuishi, "Effect of Space charge and Structure of Breakdown of Liquids and Solid", IEEE Trans. Elect. Insul. Vol. EI-17 No. 4, December 1982
- [14] K. C. Kao, "Theory of High-Field Electric Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids", IEEE Trans. Elect. Insul. Vol. EI-11 No. 4, December 1976
- [15] S. Theoley and R. Tobazeon, "Ion Injection by Metallic Electrode in Highly Polar Liquids of Controlled Conductivity", IEEE Trans. Elect. Insul. Vol. EI-20 No. 2, April 1985
- [16] A. H. Sharbaugh, J. C. Devins and S. J. Rzed, "Progress in the Field of Electric Breakdown in Dielectric Liquids", IEEE Trans. Elect. Insul. Vol. EI-13 No. 4, August 1978
- [17] C. Hosticka, "Dependence of Uniform/Nonuniform Field Transformer Oil Breakdown on Oil Composition", IEEE Trans. Elect. Insul. Vol. EI-14 No. 1, February 1979
- [18] S. Sakamoto and H. Yamada, "Optical Study of Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids", IEEE Trans. Elect. Insul. Vol. EI-15 No. 3, June 1980
- [19] T. Umemura, K. Akiyama, T. Kawasaki and T. Kashiwasaki, "Electrical Conduction in Synthetic Insulating Liquids", IEEE Trans. Elect. Insul. Vol. EI-17 No. 6, December 1982
- [20] W. F. Schmidt, "Elementary Process in the Development of the Electrical Breakdown of Liquids", IEEE Trans. Elect. Insul. Vol. EI-17 No. 6, December 1982
- [21] S. Yasufuku, "A Fundamental Study of Flammability of Aromatic Base Electrical Insulating Oils", IEEE Trans. Elect. Insul.

- [22] M. Khalifa and A .R. Nosseir , "Temporal Variation of Conduction Current in Liquid Insulant Under High Direct Voltages", IEEE Trans. Elect. Insul. Vol. EI-11 No. 2 , June 1976
- [23] R. M. Kakim, " The Properties of an Insulating Oil and Its Fractoins at Low Temperature", IEEE Trans. Elect. Insul. Vol. EI-10 No. 4 , December 1975
- [24] P. Girdnio ,G. Liberti , P. Molfino ,G. Molinari and A. Viviani, " A New Class of Uniform-Field Electrode for Dielectric Strength Test in Liquids", IEEE Trans. Elect. Insul. Vol. EI-20 No. 2 , April 1985
- [25] S. Yasufuku , T. Umemura and T. Tanii , " Electric Conduction Phenomena and Carrier Mobility Bahavior in Dielectric Fluids", IEEE Trans. Elect. Insul. Vol. EI-14 No. 1 , February 1979
- [26] B.Halpern and R. Gomer , J. Chem.Phys. 51, 1969
- [27] A. Hickso and P. V. E. McClintock , Phys. Letters 34A, 424 1971
- [28] H. Metzter and W. E. Schmidt , J. Phys. ,D9 ,L199 1976
- [29] D. W. Swan and T. J. Lewis , J.Electrochem. Soc., 107,180 1960.
- [30] A. H. Sharbaugh and P. K. Waston , J. Appl. Phys., 40 ,328 1960
- [31] A. H. Sharbough ,R. W. Crowe and E. B. Cos , J. Appl. Phys.,27, 806 1965
- [32] I. Adamczewski ,: Ionization ,Conductivity and Breakdown in Dielectric Liquids, Taylor and Francis , London 1969
- [33] P. B. McGrath and J. K. Nelson ,Proc. IEE. 124 ,183 1977
- [34] R. W. Crowe ,A. H. Sharbaugh and J. K. Bragg, J. Appl. Phys., 25 1480 1985
- [35] M. S. Naidu and V. Kamaraju : High Voltage Engineering ,Tata McGraw-Hill. Publshing Comparny Limited , New Delhi 1982
- [36] E. Kuffel and M. Abdullah :High Voltage Engineering ,Pergamon Press Ltd., Headington Hill Hall, Oxford, 1970
- [37] E. Kuffel and W. S. Zaengl : High Voltage Engineering ,Pergamon Press Ltd., Headington Hill Hall, Oxford, 1980
- [38] T. J. Gallagher and A. J. Pearmain : High Voltage Measurement Testing and Design , JOHN WILEY & SONS , 1983

- [39] L. L. Alson : High Voltage Technology , Oxford University Press ,1968
- [40] D. V. Raeevig : High Voltage Engineering , Khanna Publishers ,1978
- [41] R. S. Jha : High Voltage Engineering , Dhanpat Ral & Sons , 1977
- [42] M. S. Naidu and V. N. Maller : SF6 and Vacuum Insulation For High Voltage Application , Khanna Publishers , 1977
- [43] N. P. Bogoroditsky , V. V. Pasyukov and B. M. Tareev : Electrical Engineering Materials , Mir Publishers ,Moscow , 1979
- [44] B. Tareev : Physics of Dielectric Materials Mir Publishers , Moscow , 1979
- [45] V. Maslov : Moisture and Water Resistance of Electrical Insulation , Mir Publishers ,Moscow , 1979
- [46] G. K. Mithal : Electrical Engineering Materials ,Khanna Publishers New , Delhi 1980
- [47] J. M. Meek and J. D. Craggs : Electrical Breakdown of Gases. JOHN WILEY & SONS ,1978
- [48] J. A. Kok : Electrical Breakdown of Insulating Liquids, N. V. Philips , GuTechnical Library ,Natherland 1961
- [49] D. Kind : An Introduction to High Voltage Experimental Tecnique, WILEY EASTERN LIMITED ,New Delhi 1978
- [50] T. J. Gallagher:Simple Dielectric Liquids ,Mobility , Conduction and Breakdown ,Clarendon Press ,Oxford 1975
- [51] T. S. Ramu , " On the High Frequency Dielectric Behavior of Castor Oil", IEEE Trans. Elect. Insul. Vol.EI-14 No. 3 , June 1979
- [52] O. Lesaint and R. Tobazeon "Streamer Generation and Propagation in Transformer Oil Under AC Divergent Field Conditions",IEEE Trans. Elect. Insul. Vol 23 No. 6 , Dcember 1988
- [53] ASTM Standard Designation D 445-83
- [54] ASTM Standard Designation D 3300-85
- [56] IEC Publication 156
- [57] IEEE Stardard Techique for High-Voltage Testing

- [58] จงรักษ์ บุญเสียงและนิทัศน์ กฤษณจินดา : การศึกษาผลของความชื้นที่มีต่อแรงดันเบรคดาวน์ในน้ำมันพืช , การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 10 , 2530
- [59] จงรักษ์ บุญเสียงและนิทัศน์ กฤษณจินดา : แรงดันเบรคดาวน์กระแสตรงของน้ำมันพืชภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ , การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 11 , 2531
- [60] รศ.ดร. สำราญ สังข์สะอาด : วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง , ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [61] รศ.ดร. ชำนาญ ห่อเกียรติ : วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง , ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ , มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [62] รศ.ดร. นิพนธ์ สุขุม : เอกสารประกอบวิชา Advanced High Voltage Technology I,II ,ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [63] รศ.ดร. นิพนธ์ สุขุม : Kinetic Theory of Gases and Gas Discharge , ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

กิติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณท่านอาจารย์ นิตศน์ กฤษณจินดา ที่เป็นผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงให้แก่ผู้เขียนด้วยดีตลอดมา และท่านอาจารย์ รัช.ดร.นิพนธ์ สุขุม กับท่านอาจารย์ สมเจตต์ เทียมเมือง ที่ช่วยเหลือและให้คำแนะนำทางวิชาการและปฏิบัติ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลงได้ ขอขอบคุณท่านอาจารย์ ดร.รัตติกร วรากุลศิริพันธุ์ ที่กรุณาให้ยืมเครื่องคอมพิวเตอร์ในการทำวิจัยและคำแนะนำต่างๆ ตลอดจนเพื่อนๆ

ขอขอบคุณนิสิตชั้นที่ วรากุลศิริพันธุ์ มีส่วนในการผลักดันให้ผู้เขียนมีความพยายามในการเรียนด้วยดีจนสำเร็จการศึกษา

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ คุณพ่อหยวก และคุณแม่แม่ฉวี บุญเลี้ยง และคุณพี่อริชัย คุณพี่ไพศาล และคุณพี่โอภาส บุญเลี้ยง ตลอดจนญาติพี่น้องทุกคน ที่ให้กำลังใจด้วยดีตลอดมา

จงรักษ์ บุญเลี้ยง

24 / 4 / 89



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 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 % ยกเว้นจะมีการกำหนดตามมาตรฐานของอุปกรณ์ทดสอบต่างหากและจะต้องคำนึงด้วยว่าเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบในวงจรทดสอบแล้ว 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 ซึ่งจะต้องผิดพลาดไม่เกิน 10 % ของขนาด ripple จริง หรือไม่เกิน 1 % ของค่าเฉลี่ยของแรงดันทดสอบ

ส่วนรายละเอียดของการวัดจะขึ้นอยู่กับระบบที่ทดสอบ โดยในตอนติดตั้งระบบการวัดจะต้องแสดงถึงรายละเอียดต่อไปนี้ของระบบคือ

- 1) ค่าสเกลแฟคเตอร์และช่วงการใช้งานอย่างถูกต้องของค่าดังกล่าว ค่าสเกลแฟคเตอร์ (Scale factors) ของระบบคือ ค่าแฟคเตอร์ตัวคูณซึ่งใช้คูณกับค่าเอาท์พุทที่อ่านได้ เพื่อแสดงให้ทราบถึงอินพุทที่ป้อนให้แก่ระบบ โดยค่าแฟคเตอร์นี้อาจเป็นค่าคงที่ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
หนึ่งหรือแสดงเป็นช่วงของความถี่ก็ได้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) คุณสมบัติการตอบสนองของระบบ (Response characteristics) ซึ่งจะขึ้นกับชนิดของแรงดันหรือกระแสที่จะทำการวัด

3) อิทธิพลของวัตถุข้างเคียงต่อสเกลแฉดเตอร์และต่อระบบการตอบสนองไม่ว่าวัตถุข้างเคียงจะอยู่ในสภาพที่ถูกราวน (grounded) หรือถูก energized หรือกำลังนำกระแสค่าสูงๆอยู่ก็ตาม ทั้งนี้ระบบการวัดยังต้องบ่งบอกถึงระยะปลอดภัยต่ำสุด (minimum clearance) ของวัตถุข้างเคียงด้วย

4) ผลของขนาดและช่วงการทำงานของแรงดันและกระแสที่ป้อนให้แก่ระบบรวมทั้งสภาวะแวดล้อมขณะทำการทดลองและความสกปรกของผิวหน้าวัสดุทดสอบ (surface contamination) ต่อคุณสมบัติที่วัดได้ของระบบ

5) ความสามารถของระบบการวัดในการทำงานที่ค่ากระแสและแรงดันชนิดสูงสุด 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 โดยค่าแรงดันเริ่มแรกที่ป้อนจะต้องมี

ค่าต่ำเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดแรงดันเกิน (overvoltage) อันเนื่องมาจากการเอกซาร์ชันเป็นเอกซาร์ชันที่ส่งวนไวด์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า switching transients หลังจากนั้นจึงค่อยๆเพิ่มแรงดันขึ้นอย่างช้าๆขนาดที่ทำให้ไม่มีการฉีกตัวทิ้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปรงเนื้อที่ และต้องยังอิงถึงใจของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 โดยขบวนการทดสอบก็เช่นเดียวกับการทดสอบช่วงระยะสั้น แต่ทำการเพิ่มแรงดันจนกระทั่งเกิดการดีสชาร์จแบบ disruptive ขึ้นที่วัสดุทดสอบ ก็จะได้แรงดันที่ทำให้เกิดการดีสชาร์จแบบ disruptive ที่แน่นอนตามต้องการ

2.4 ข้อควรระวังและที่อาจทำให้เกิดความผิดพลาดในการทดสอบ

(Precautions and possible source of error)

1) เมื่อทำการทดสอบด้วยความต้านทานสูงๆโดยใช้แรงดันกระแสตรงควรระวังข้อผิดพลาดอันเนื่องมาจากกระแสโคโรน่า หรือกระแสลัดเกจ(leakage currents) ที่เกิดคร่อมผิวหน้าฉนวนที่สกปรกหรือขึ้นได้ ดังนั้นในการทดลองจึงควรใช้อิเล็กโตรดที่กลมมนที่สุด และผิวหน้าราบเรียบที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

2) ข้อผิดพลาดในการทดสอบอาจจะมีผลเนื่องมาจากคุณสมบัติของตัวต้านทาน ซึ่งมักจะมีค่าผิดพลาด ไปบ้างที่ระดับแรงดันหรืออุณหภูมิทดสอบสูงๆ หรือเนื่องมาจากเครื่องมือที่ใช้วัดเมื่อมีกระแสสูงๆไหลผ่าน

3) สำหรับ Generating voltmeter และ Electrostatic voltmeter นั้นอาจจะมีค่าผิดพลาดอันเนื่องมาจากการ distortion ของสนามไฟฟ้าไปในอากาศ หรือไปตามผิวหน้าของวัตถุฉนวน ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามประจุไฟฟ้าสถิตย์ที่เกิดขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

มาตรฐาน ASTM และ IEC



Designation: D 877 - 84a

Method 5702—Federal Test
Method Standard No. 791b

Standard Test Method for
DIELECTRIC BREAKDOWN VOLTAGE OF INSULATING
LIQUIDS USING DISK ELECTRODES¹

This standard is issued under the fixed designation D 877; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This method has been approved for use by agencies of the Department of Defense and for listing in the DoD Index of Specifications and Standards.

1. Scope

1.1 This test method covers a referee and a routine procedure for determining the dielectric breakdown voltage of insulating liquids. These procedures are applicable to liquid petroleum oils, hydrocarbons, and askarels commonly used as insulating and cooling mediums in cables, transformers, oil circuit breakers, and similar apparatus. The referee procedure, with modifications, is suitable for testing silicone fluids (see Methods D 2225). The referee procedure is also suitable for testing alkylbenzenes. The suitability of either the referee or the routine procedure for testing liquids having viscosities exceeding 900 cSt (mm^2/s) (5000 SUS) at 40°C (104°F) has not been determined.

1.2 This test method is recommended for acceptance tests on unprocessed insulating liquids received from vendors in tank cars, tank trucks, and drums. It may also be used for the routine testing of liquids from power systems apparatus rated 230 kV and below.

1.3 This test method is not recommended for testing filtered, degassed, and dehydrated oil prior to and during the filling of power systems apparatus rated above 230 kV, or for testing samples of such oil from apparatus after filling. Test Method D 1816 is more suitable for, and is recommended for, testing such oils.

1.4 Both the SI and inch-pound units are equally acceptable.

1.5 *This standard may involve hazardous materials, operations, and equipment. This standard does not purport to address all of the safety problems associated with its use. It is the responsibility*

of whoever uses this standard to consult and establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.

2. Applicable Documents

2.1 *ASTM Standards:*

D484 Specification for Hydrocarbon Dry-cleaning Solvents²

D923 Methods of Sampling Electrical Insulating Liquids³

D1816 Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Oils of Petroleum Origin Using VDE Electrodes³

D2225 Methods of Testing Silicone Fluids Used for Electrical Insulation³

2.2 *Institute of Electrical and Electronics Engineers Standard:*

No. 4 Measurement of Voltage in Dielectric Test⁴

3. Significance and Use

3.1 The dielectric breakdown voltage of an insulating liquid is of importance as a measure of the liquid's ability to withstand electric stress without failure. It serves to indicate the pres-

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D-27 on Electrical Insulating Liquids and Gases and is the direct responsibility of Subcommittee D27.05 on Electrical Test.

Current edition approved July 27, 1984. Published September 1984. Originally published as D 877 - 46 T. Last previous edition D 877 - 84.

² *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 05.01.

³ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 10.03.

⁴ Available from The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 345 E. 47th St, New York, NY 10017.

ence of contaminating agents, such as water, dirt, moist cellulosic fibers, or conducting particles in the liquid, one or more of which may be present in significant concentrations when low dielectric breakdown values are found by test. However, a high dielectric breakdown voltage does not indicate the absence of all contaminants; it may merely indicate that the concentrations of contaminants that are present in the liquid between the electrodes are not large enough to deleteriously affect the average breakdown voltage of the liquid when tested by this method. See Appendix XI.

4. Apparatus

4.1 *Transformer*—The desired test voltage may be most readily obtained by a step-up transformer energized from a variable low-voltage commercial power frequency source. The transformer and controlling element shall be of such size and design that, with the test specimen in the circuit, the crest factor (ratio of maximum to mean effective) of the 60-Hz test voltage shall not differ by more than $\pm 5\%$ from that of a sinusoidal wave over the upper half of the range of test voltage. The crest factor may be checked by means of an oscilloscope, a sphere-gap, or a peak-reading voltmeter in conjunction with a root-mean-square voltmeter. Where the wave form cannot be determined conveniently, a transformer having a rating of not less than $\frac{1}{2}$ kVA at the usual breakdown voltage shall be used. Transformers of larger kilovolt-ampere capacity may be used, but in no case should the short-circuit current in the specimen circuit be outside the range of 1 to 10 mA/kV of applied voltage. This limitation of current may be accomplished by the use of a suitable external series resistor or by the designed reactance of the transformer.

4.2 *Circuit-Interrupting Equipment*—The test transformer primary circuit shall be protected by an automatic circuit-breaking device capable of opening in 3 cycles or less on the current produced by breakdown of the test specimen. A 5-cycle breaker may be used if the short-circuit current as described in 4.1 does not exceed 0.2 A. The current-sensing element that trips the circuit breaker should operate when the specimen-circuit current is in the range of 2 to 20 mA. A prolonged flow of current at the time of breakdown causes carbonization of the liquid and pitting and heating of the electrodes, and thereby increases the electrode and test cup

maintenance and time of testing.

4.3 *Voltage-Control Equipment*—The rate of voltage rise shall be $3 \text{ kV/s} \pm 20\%$. Voltage control may be secured by a motor-driven variable-ratio-autotransformer. Preference should be given to equipment having an approximately straight-line voltage-time curve over the desired operating range. Motor drive is preferred to manual drive because of the difficulty of maintaining a reasonably uniform rate-of-voltage rise with the latter. The rate-of-voltage rise may be calculated from measurements of the time required to raise the voltage between two prescribed values. When motor-driven equipment is used, the speed control rheostat should be calibrated in terms of rate-of-voltage rise for the test transformer used.

4.4 *Voltmeter*—The voltage shall be measured by a method that fulfills the requirements of IEEE Standard No. 4, giving rms values, preferably by means of:

4.4.1 A voltmeter connected to the secondary of a separate potential transformer, or

4.4.2 A voltmeter connected to a well-designed tertiary coil in the test transformer, or

4.4.3 A voltmeter connected to the low-voltage side of the testing transformer if the measurement error can be maintained within the limit specified in 4.5.

4.5 *Accuracy*—The combined accuracy of the voltmeter and voltage divider circuit should be such that measurement error does not exceed 5% at the rate-of-voltage rise specified in 4.3.

5. Electrodes

5.1 The electrodes shall be polished brass disks 25 mm or 1 in. in diameter, and at least 3 mm or $\frac{1}{8}$ in. thick, with square edges.

6. Test Cup

6.1 A test cup having rigidly mounted electrodes with parallel faces and axes in a coincident horizontal line shall be used. The cup shall be constructed so that no part of it is less than 13 mm or $\frac{1}{2}$ in. from any part of the test electrode disk. The total leakage and charging current of the cup, when filled with a good grade of oil, shall be less than $200 \mu\text{A}$ at 20 kV, 60 Hz. It shall be made of a material of high dielectric strength, and shall not be attacked by any of the cleaning or test liquids. It shall not absorb moisture or the cleaning and test liquids. The top of the cup should be about 32 mm or $1\frac{1}{4}$ in. above the top of the electrodes. The cup



shall be designed to permit easy removal of the electrodes for cleaning and polishing, and to permit easy adjustment of the gap spacing.

7. Adjustment and Care of Electrodes and Test Cup

7.1 *Electrode Spacing*—The spacing of the electrodes during tests shall be 2.5 mm or 0.100 in. This shall be determined with a standard round gage of 2.5 ± 0.01 mm or 0.100 ± 0.0005 in., or flat steel “go” and “no-go” gages having thicknesses of 2.49 and 2.51 mm or 0.0995 and 0.1005 in., respectively. The spacing shall be rechecked following any polishing, wiping, or cleaning operation in which the cup is disassembled or the electrodes disturbed, and at the beginning of each day’s testing.

7.2 *Cleaning*—The electrodes and the cup shall be wiped clean with dry, lint-free tissue paper or a clean dry chamois. It is important to avoid touching the electrodes or the cleaned gage with the fingers or with portions of the tissue paper or chamois that have been in contact with the hands. After adjustment of the gap spacing, the cup shall be rinsed with a dry hydrocarbon solvent, such as kerosine or Standard solvent.⁵ A low-boiling solvent should not be used as its rapid evaporation may cool the cup, causing moisture condensation. If this occurs, the cup should be warmed slightly to evaporate the moisture before using it. Care shall be taken to avoid touching the electrodes or the inside of the cup after cleaning. After thorough cleaning, the cup shall be flushed with new, dry, filtered liquid of the type being tested, (preferably degassed oil if the cup is being used for testing oils). A voltage breakdown test shall be made on a sample of this liquid in the manner specified in this method. If the breakdown voltage is in the proper range for liquid in this good condition, the test cup shall be considered as properly prepared for testing other samples. If a lower value is obtained, the cup shall again be thoroughly cleaned and the test repeated with a clean dry liquid.

7.3 *Daily Use*—At the beginning of each day’s testing, the electrodes shall be examined for pitting and contamination. They should be repolished if pitting is severe. Carbon or dirt should be wiped off, and the gap setting checked. The cup shall be flushed, and tested with a clean dry liquid as described in 7.2.

7.4 *Polishing of Electrodes*—When examination of electrodes shows minor scratching or pitting, the electrodes should be removed from the test cup and polished by buffing with jeweler’s rouge using a soft cloth or soft buffing wheel. (Resurfacing may be necessary in order to remove deep pit marks or edge damage.) Care must be taken in resurfacing or in polishing to ensure that the electrode faces remain perpendicular to the axis and that the edges do not become rounded. All residue from the buffing must be removed before the electrodes are reinstalled in the test cup. This can be accomplished by repeated wiping with lint-free tissue paper saturated with a suitable solvent (such as petroleum ether), followed by solvent rinsing or ultrasonic cleaning. After the electrodes have been reinstalled in the test cup, clean and adjust spacing in accordance with 7.1 and 7.2.

7.5 *Storage of Test Cup*—When not in use, the cup, if used for referee tests, shall be stored filled with a new, dry, filtered liquid of the type being tested, and tightly covered.

8. Sampling

8.1 A sample of the liquid to be tested shall be obtained with the sampling apparatus applicable to the type of liquid as specified in accordance with Methods D923. The sample shall be taken in a dry, clean bottle that shall be tightly sealed and shielded from light until ready to be tested (Note 1). Prior to starting the test, the sample shall be inspected for the presence of moisture, sludge, metallic particles, or other foreign matter. If the sample shows evidence of free water, the dielectric breakdown test may be waived, and the sample shall be reported as unsatisfactory.

NOTE 1—It is suggested that 2 L of sample be made available when referee tests are to be made, and 1 L of sample be made available when routine tests are to be made.

8.2 The dielectric breakdown voltage of liquids may be seriously impaired by the migration of impurities through the liquid. In order that a representative test specimen containing the impurities may be obtained, the sample container shall be gently inverted and swirled several times before filling the test cup. Rapid agitation is undesirable, since an excessive

⁵ See ASTM Specification D484, for Hydrocarbon Drycleaning Solvents, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 05.01.

amount of air may be introduced into the liquid. Immediately after agitation, a small portion of the sample shall be used to rinse the test cup. The cup shall then be filled slowly with the liquid to be tested in a manner that will avoid entrapment of air. It should be filled to a level not less than 20 mm or 0.8 in. above the top of the electrodes. In order to permit the escape of air, the liquid shall be allowed to stand in the cup for not less than 2 min and not more than 3 min before voltage is applied.

NOTE 2—It is impractical to handle liquids having viscosities ranging between 10 and 22 cSt (mm²/s) (60 and 100 SUS) at 100°C (212°F) in the manner outlined in 8.2. When testing high-viscosity liquids in this range, the sample should be allowed to stand until it reaches room temperature, which should not be less than 20°C (68°F). The sample container should not be swirled as prescribed in 8.2, but should be inverted for at least 30 min before the test, and then reinverted and opened just prior to filling the test cup.

9. Test Temperature

9.1 The temperature of the specimen when tested shall be the same as that of the room, but the room temperature shall in no case be less than 20°C (68°F). Testing liquids at temperatures lower than that of the room will give variable and unsatisfactory results.

10. Rate of Rise of Voltage

10.1 Voltage shall be applied and increased from zero at the rate of 3 kV/s ± 20% until breakdown occurs as indicated by operation of the circuit-interrupting equipment, and the value recorded. Occasional momentary discharges may occur which do not result in operation of the interrupting equipment, and shall be disregarded.

11. Procedure

11.1 *Referee Testing*—When it is desired to determine the dielectric breakdown voltage of a new liquid for referee purposes; one breakdown shall be made on each of five successive fillings of the test cup. The breakdown voltage thus obtained shall be subjected to the criterion for statistical consistency as specified in 11.3. If the five values meet this criterion, their average shall be reported as the dielectric breakdown voltage of the sample. If they do not meet this criterion, one breakdown on each of five additional cup fillings shall be made, and the average of the ten breakdowns shall be reported as the dielectric breakdown voltage of the sample.

No breakdown shall be discarded.

11.2 *Routine Testing*—When it is desired to determine the dielectric breakdown voltage of a liquid on a routine basis, five breakdowns may be made on one cup filling with 1-min intervals between breakdowns. The average of the five breakdowns shall be considered the dielectric breakdown voltage of the sample, provided the breakdown values meet the criterion for statistical consistency as specified in 11.3. If the breakdown voltages do not meet this criterion, the contents of the cup shall be discarded, the sample container again gently inverted and swirled, the cup again filled, and five breakdowns made on this second cup filling. The average of the 10 breakdowns shall be considered as the dielectric breakdown voltage of the sample. No breakdown shall be discarded.

11.3 Criterion for Statistical Consistency—

11.3.1 Calculate the mean and standard deviation of the five breakdowns as follows:

$$\bar{x} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 x_i \quad \text{and} \quad s = \sqrt{\frac{1}{4} \left(\sum_{i=1}^5 x_i^2 - 5\bar{x}^2 \right)}$$

where:

\bar{x} = mean of the five individual values,
 x_i = *i*th breakdown voltage, and
 s = standard deviation.

If the ratio s/\bar{x} exceeds 0.1, it is probable that the standard deviation of the five breakdowns is excessive, and therefore that the probable error of their average is also excessive.

11.3.2 *Alternative Criterion*—Calculate the range of the five breakdowns (maximum breakdown voltage minus minimum breakdown voltage), and multiply this range by three. If the value so obtained is greater than the next to the lowest breakdown voltage, it is probable that the standard deviation of the five breakdowns is excessive, and therefore the probable error of their average is also excessive.

12. Report

12.1 The report shall include the following:

12.1.1 ASTM designation of the test method used (D 877),

12.1.2 Procedure used, that is, referee test or routine test.

12.1.3 Approximate viscosity of the liquid tested,

12.1.4 Temperature of the liquid and the room at time of test, and

12.1.5 Individual breakdown values and the



D 877

average breakdown value in any of the following ways that may apply:

12.1.5.1 Five breakdowns, one on each of five cup fillings that meet the criterion of statistical consistency,

12.1.5.2 Ten breakdowns, one on each of ten cup fillings when the first five breakdowns do not meet the criterion for statistical consistency,

12.1.5.3 In routine testing, five breakdowns on one cup filling that meet the criterion of statistical consistency, or

12.1.5.4 When the routine test is employed, five breakdowns on each of two cup fillings when

the breakdowns on the first cup filling do not meet the criterion of statistical consistency.

12.1.6 If the sample was observed to contain free water or other contaminants, the report should so indicate, with a statement that the test was not made.

13. Precision and Bias

13.1 The precision of this test method has not been determined. No statement can be made about the bias of this test method because a standard reference material is not available.

APPENDIX

(Nonmandatory Information)

XI. OTHER FACTORS THAT AFFECT THE DIELECTRIC BREAKDOWN VOLTAGE OF INSULATING LIQUIDS AT COMMERCIAL POWER FREQUENCIES

XI.1 The dielectric breakdown voltage of a liquid at commercial power frequencies is also affected by the degree of uniformity of the electric field, the area of the electrodes or volume of the liquid under maximum stress, the length of time for which the liquid is under stress, the temperature of the liquid (especially insofar as it affects the relative saturation level of moisture in solution), gassing tendencies of the liquid under the influence of electric stress, concentration of dissolved gases (especially if saturation levels are exceeded as a result of sudden cooling or decrease in pressure, which may cause the formation of gas bubbles), incompatibility with materials of construction, and velocity of flow. A decrease in

dielectric strength of the liquid can have an accentuated effect on the electric creepage strength of solid insulating materials immersed in the liquid.

XI.2 Because of the separate, cumulative, and in some cases, interacting effects of the influences listed above, the average breakdown voltage of a liquid as determined by this test method cannot be used for design purposes. Alternative test procedures that may yield more meaningful indications of the functional dielectric strength of a liquid are under consideration (for example, a step-by-step method of applying voltage, and using the lowest rather than the average value of breakdown voltage obtained in the prescribed number of tests).

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 1916 Race St., Philadelphia, Pa. 19103.



Designation: D 3300 - 85

Standard Test Method for DIELECTRIC BREAKDOWN VOLTAGE OF INSULATING OILS OF PETROLEUM ORIGIN UNDER IMPULSE CONDITIONS¹

This standard is issued under the fixed designation D 3300; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This test method covers the determination of the dielectric breakdown voltage of insulating oils under impulse conditions.

1.2 The values stated in inch-pound units are to be regarded as the standard.

1.3 *This standard may involve hazardous materials, operations, and equipment. This standard does not purport to address all of the safety problems associated with its use. It is the responsibility of whoever uses this standard to consult and establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use. See X1.2.3.*

2. Applicable Documents

2.1 ASTM Standards:

D923 Methods of Sampling Electrical Insulating Liquids²

D 1816 Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Oil of Petroleum Origin Using VDE Electrodes²

2.2 Other Document:

IEEE 262 Standard Impulse Test for High Voltage Electrical Apparatus³

3. Significance and Use

3.1 Insulating liquids used in high-voltage apparatus are subjected to transient-voltage stresses arising from such causes as nearby lightning strokes and high-voltage switching operations, as well as being subjected to steady-state voltage stresses associated with continuous operation of the apparatus at commercial-power frequencies. The ability of the insulating liquid to withstand such transient-voltage stresses has become increasingly important to

determine, as the use of oil-filled apparatus has been extended to operating voltages of 345 kV and higher (extra-high and ultra-high voltage). This is of primary importance to the designers of such equipment. Its importance to other types of apparatus has yet to be determined.

3.2 Transient voltages caused by lightning- and switching-surge phenomena may be either negative or positive in polarity. Although polarity of the voltage wave has little or no effect on the breakdown strength of an oil in uniform fields, polarity does have a marked effect on the breakdown voltage of an oil in nonuniform electric fields.

3.3 The transient voltages referred to above may also vary over a wide range in both the time to reach crest value and the time to decay to half crest or to zero magnitude. The IEEE standard impulse test (see 2.2) specifies a 1.2 by 50- μ s negative polarity wave. The standard wave shape for switching-surge tests on transformers is 100 μ s to crest and greater than 1000 μ s to zero.

3.4 The purchaser of the impulse generator may want to specify the necessary flexibility to make possible switching-surge tests. Consideration may be given to other electrode configurations such as VDE electrodes, similar to those used in Test Method D 1816, since it may be desirable to obtain the ratio between power fre-

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D-27 on Electrical Insulating Liquids and Gases and is the direct responsibility of Subcommittee D27.05 on Electrical Test.

Current edition approved July 26, 1985. Published October 1985. Originally published as D 3300 - 74. Last previous edition D 3300 - 83.

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 10.03.

³ Available from the Institute of Electrical and Electronics Engineers, 345 E. 47th St., New York, NY 10017.

ASTM D 3300

quency and impulse breakdown under similar conditions.

4. Apparatus

4.1 *Impulse Generator*, capable of producing a standard 1.2 by 50- μ s full wave adjustable to positive or negative polarity. The generator shall have a nominal voltage rating of at least 300 kV in 10-kV steps. Generators having a capability of 1000 W·s (1000 J) at 300 kV have been found satisfactory. The impulse generator purchasers may desire to make a provision for the future testing of the switching-surge characteristics of oils in accordance with 3.3.

4.2 *Voltage-Control Equipment*—The controls shall include a suitable measuring device for predetermining the crest voltage to within $\pm 5\%$. A voltage stabilizer is desirable at the input to the d-c power supply used for charging the impulse-generator capacitors.

4.3 Electrodes:

4.3.1 Two electrode configurations may be specified—sphere-to-sphere and point-to-sphere.

4.3.2 The electrodes shall consist of polished steel or brass spheres of 0.5 in. (12.7 mm) diameter and a steel point. The point may be an ordinary steel phonograph needle with a $0.06 \text{ mm} \pm 20\%$ radius of curvature of point.⁴ Needles with drawn tips are *not* recommended.

4.3.3 The effect of variation in the radius of curvature of point is subject to further investigation. Both electrodes shall be easily replaceable.

4.4 Test Cell:

4.4.1 The test cell shall be made of a material of high dielectric strength and of such dimensions that the electrical breakdown is restricted to the electrode gap. Test cell materials shall resist attack by, and be insoluble in, any of the cleaning or test liquids used. Test cells such as those shown in Figs. 1 and 2 have been found satisfactory.

4.4.2 The sphere electrode shall be rigidly fixed and the point electrode mounted such that the gap may be adjusted from zero to the required value. If sphere-to-sphere tests are to be made, the point electrode should be convertible to sphere mounting.

5. Sampling

5.1 Obtain a sample of the liquid to be tested using appropriate ASTM sampling apparatus in accordance with Methods D 923.

6. Adjustments and Care of Electrodes and Test Cell

6.1 Electrode Spacing:

6.1.1 For the cell shown in Fig. 1, reduce the electrode gap to zero spacing. Proceed very carefully to avoid damaging the point. The point of contact shall be established electrically with an ohmmeter. Open the gap to the specified spacing using a dial micrometer or other suitable method.

6.1.2 For the cell shown in Fig. 2, the gap may be set with a go-no-go gage.

6.1.3 The gap spacings shall be 1.0 in. (25.4 mm) for point-to-sphere and 0.15 in. (3.8 mm) for sphere-to-sphere electrode configuration.

6.2 *Cleaning*—Degrease the cell and electrodes by rinsing them with reagent grade petroleum ether, washing with detergent and hot water, rinsing thoroughly in hot tap water, and then rinsing them with distilled water. Dry the cell and hardware in an oven for 2 h at approximately 105 to 110°C, remove, and store in a desiccator until needed.

6.3 *Daily Use*—Use new or polished sphere electrodes at the beginning of each day's testing. Discard the point electrode and replace it after each breakdown; replace the sphere electrodes after every five breakdowns when testing point-to-sphere. More frequent replacement may be necessary when testing sphere-to-sphere. Sphere electrodes may be cleaned and polished for reuse in point-to-sphere testing. However, the use of polished spheres is not recommended for sphere-to-sphere testing. When not in use, clean and store the cell in accordance with 6.2.

7. Test Temperature

7.1 The temperature of the sample when tested shall be the same as that of the room, but the room temperature shall in no case be less than 20°C. Testing liquids at temperatures lower than that of the room may give variable and unsatisfactory results. Record the test temperature.

8. Procedure

8.1 Set the electrode spacing to the desired value.

⁴ The following steel needles have been found satisfactory for this method: Duotone No. 6 Needle, available from Duotone Co., Inc., 6875 S.W. 81st St., Miami, FL 33143, and Dean No. 18 Filter Point Needle, available from John Dean, Inc., 20 Mechanic St., Putnam, CT 06260.

D. 3300

ometry, location of the ground plane, voltage measurement procedures, and small variations in the geometry of the needle electrode. None of these had any significant effect on the precision. It has become apparent that unknown factors determine the initiation of breakdown under the impulse conditions used in this method.

10.1.2.1 With 95 % confidence, any two laboratories following this method, each making five determinations and reporting the average, can expect to agree within 45 kV.

10.1.2.2 With 50 % confidence, any two laboratories should agree within 15 kV.

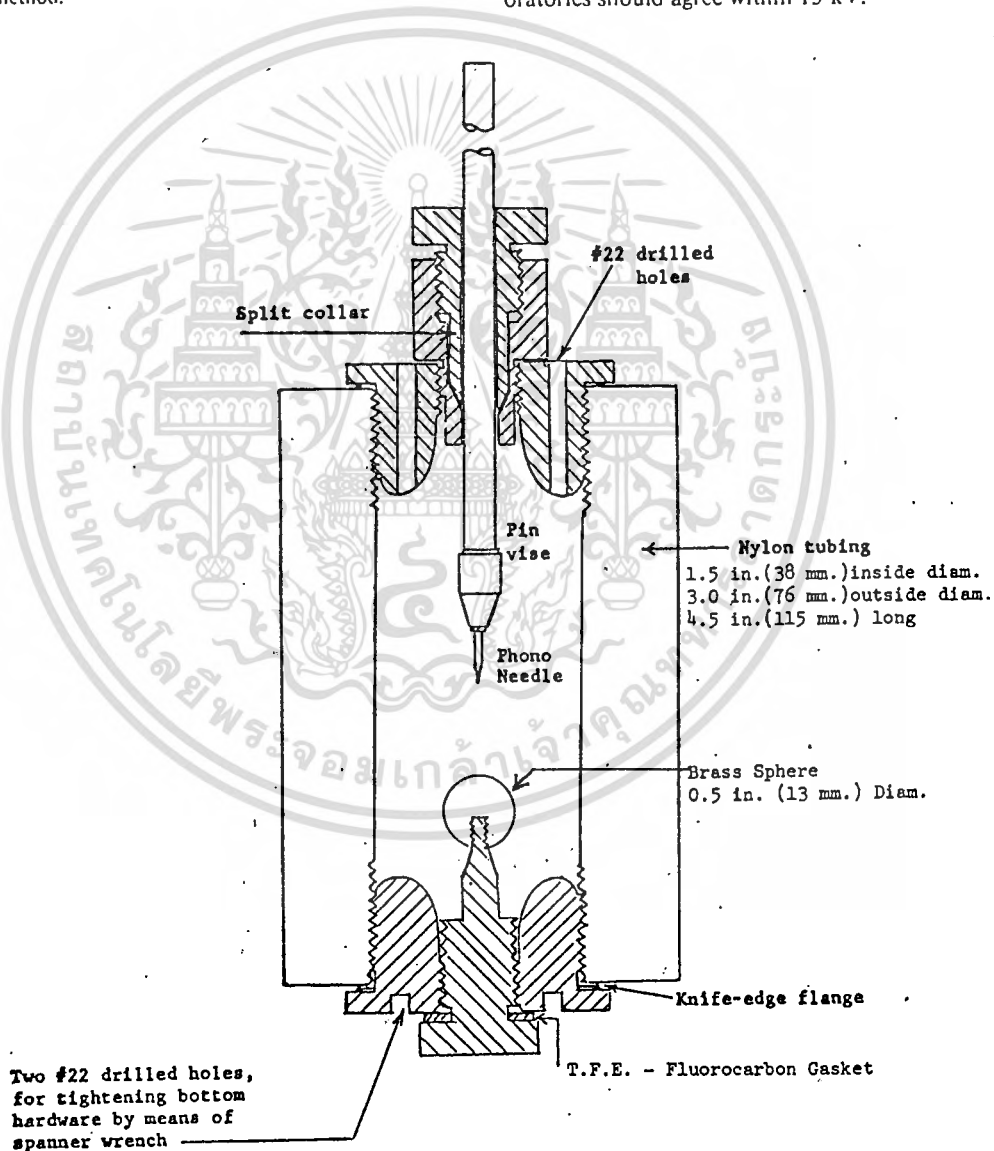


FIG. 1 Test Cell

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



D 3300

8.2 Rinse the test cell with a sample of the liquid to be tested and discard this liquid. Slowly fill the cell with the test liquid, being careful to avoid entraining air bubbles. Allow it to set undisturbed for 2 min prior to testing.

8.2.1 For the test cell shown in Fig. 1, unscrew the upper electrode holding assembly to fill it with the sample oil while holding the cell at an angle to prevent splashing, which could create air bubbles. Screw the top portion down until the metal flange seats firmly.

8.3 Connect the fixed electrode to ground and the movable electrode to the impulse generator.

8.4 Apply the impulse wave of specified polarity starting approximately 40 kV below the expected breakdown level. Apply three impulse waves at each voltage level. Allow a minimum of 30 s between each test.

8.5 Increase the voltage level in steps of 10 kV or less until breakdown occurs, noting the crest voltage level at breakdown. It is necessary to have at least three withstand levels prior to breakdown.

8.5.1 The measurement of the voltage at breakdown is very critical. For suggested measuring techniques refer to Appendix XI.

8.6 After each breakdown, change the point electrode and follow, 8.1 and 8.2.

8.7 Make five breakdown tests of each sample of liquid. Examine the five breakdowns for statistical consistency, and if they meet the criterion described in 8.9, use their average to determine the impulse breakdown voltage of the sample.

8.8 If the spread from maximum to minimum is more than 30 kV, it is necessary to obtain breakdowns for five additional fillings.

NOTE 1—This is a temporary statement and refers only to point-to-sphere electrodes and a 1.2 by 50-μs negative test wave. This statement will be expanded when more test data are obtained.

8.8.1 Retain and report all test data.

8.9 *Criterion for Statistical Consistency:*

8.9.1 Calculate the mean and standard deviation of the five breakdowns as follows:

$$\bar{X} = 1/5 \sum_{i=1}^5 X_i \text{ and } s = \sqrt{1/4 \left[\sum_{i=1}^5 X_i^2 - 5\bar{X}^2 \right]}$$

where:

\bar{X} = mean of the five individual values,

X_i = *i*th breakdown voltage, and

s = standard deviation.

If the ratio s/\bar{X} exceeds 0.1, it is probable that the standard deviation of the five breakdowns is

excessive and therefore that the probable error of their average is also excessive.

8.9.2 *Alternative Criterion*—Calculate the range of the five breakdowns (maximum breakdown voltage minus minimum breakdown voltage), and multiply this range by three. If the value so obtained is greater than the lowest breakdown, it indicates that the standard deviation of the five breakdowns, and, therefore, the probable error of their average, is excessive.

NOTE 2—The Criterion for Statistical Consistency specified in 8.9.1 and 8.9.2 apply only to negative polarity waves if point-to-sphere electrodes are used.

8.10 It may be necessary to partially immerse the test cell in oil to prevent external flashover. This is necessary with the cell shown in Fig. 1.

8.11 If a second insulating liquid is to be tested, thoroughly clean the test cell in accordance with 6.2.

9. Report

9.1 The report shall include the following:

9.1.1 Sample identification,

9.1.2 Electrode configuration, polarity, and gap space,

9.1.3 Impulse crest voltage for each breakdown (do not discard any data),

9.1.4 Wave shape identification,

9.1.5 Starting voltage crest level, voltage steps, and highest voltage withstand level,

9.1.6 Sample and ambient temperature,

9.1.7 Sample water content,

9.1.8 Barometric pressure, and

9.1.9 Date of test.

10. Precision

10.1 Using the point-to-sphere electrode configuration, the following precision statements are applicable to both positive and negative polarity:

10.1.1 *Repeatability:*

10.1.1.1 With 95 % confidence, a laboratory following this method and comparing the averages of two successive series of 5 breakdowns on one sample of oil, can expect the two determinations to agree within 13 kV.

10.1.1.2 With 50 % confidence, the averages of any two successive series should agree within 5 kV.

10.1.2 *Reproducibility:*

NOTE 2—Considerable work has been done by Committee D-27 and by IEC Subcommittee 10A in an attempt to improve the precision of this test method. Items considered were oil pretreatment, test cell ge-

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

(affiliée à l'Organisation Internationale de Normalisation — ISO)

RECOMMANDATION DE LA C.E.I.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

(affiliated to the International Organization for Standardization — ISO)

I.E.C. RECOMMENDATION

Publication 156

Première édition — First edition

1963

Méthode pour la détermination de la rigidité électrique des huiles isolantes

Method for the determination of the electric strength of insulating oils



Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale

1, rue de Varembe

Genève, Suisse

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

METHOD FOR THE DETERMINATION OF THE
ELECTRIC STRENGTH OF INSULATING OILS

FOREWORD

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

PREFACE

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

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

The following countries voted explicitly in favour of publication :

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

METHOD FOR THE DETERMINATION OF THE ELECTRIC STRENGTH OF INSULATING OILS

1. Introduction

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

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

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

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

2. General

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

3. Sampling

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

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

4. Condition of the oil

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

5. Test cell

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

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

6. Electrodes

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

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

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

7. Preparation of the cell

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

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

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

8. Preparation of the sample

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

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

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

9. Test method

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

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

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

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. Electrical apparatus

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

10.1 Transformer

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

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

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

10.2 Protective gear

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

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

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

10.3 Voltage regulation

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

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

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

10.4 Measurement of test voltage

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

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

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

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

11. Results

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

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

คุณสมบัติของฉนวนไฟฟ้าที่นำมาทดสอบ

1 น้ำมันถั่วเหลือง

เป็นน้ำมันถั่วเหลือง ผ่านกรรมวิธี ตราอ่องน สกัดจากถั่วเหลือง
100 % ใช้วัดถูกกันเห็นบิวทีเลเตดไฮดรอกซีโทลูอิน 0.01 % ราคา 28.50
บาทต่อลิตร ผลิตโดย บริษัท โรงกลั่นน้ำมันนครชัยศรี จำกัด อ.นครชัยศรี
จ. นครปฐม

2 น้ำมันรำข้าว

เป็นน้ำมันรำข้าว ผ่านกรรมวิธี ตราชิม (CHIM Brand Refined
Rice Bran Cooking oils) สกัดจากรำข้าว 100 % ราคา 28 บาทต่อ
ลิตร ผลิตโดย บริษัท อุตสาหกรรมน้ำมันรำไทยพัฒนา จำกัด

3 น้ำมันปาล์ม

เป็นน้ำมันปาล์มโอเลอิกจากเนื้อปาล์ม ผ่านกรรมวิธี ใช้วัดถูกกันเห็น
บิวทีเลเตดไฮดรอกซีโทลูอิน 0.01 % และ กรดพิตริก 0.01 % ราคา 28
บาทต่อลิตร ผลิตโดย บริษัท ล้ำสูน(ประเทศไทย) จำกัด

4 น้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคาลเท็กซ์

เป็นน้ำมันที่ใช้สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าและเซอร์กิตเบรกเกอร์ มีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี ผ่านกรรมวิธีกำจัดความชื้นและปราศจากสิ่งเจือปน
ผ่านการตรวจสอบตามมาตรฐาน WEMCO Oil ของบริษัท เวสต์ดิงเฮาส์จำกัด
และ มาตรฐาน GE 10 C Oil ของ บริษัท เจนเนอร์รอล อิเล็กตริก จำกัด
และมาตรฐาน ASTM D 3487 Type I ซึ่งคุณสมบัติได้แสดงไว้ข้างล่างนี้

5 โพลีเอทิลีน

NUCG-5211 เป็นโพลีเอทิลีนที่ ผลิตโดยบริษัท ยูเนียน คาร์ไบด์ จำกัด
มีความแข็งแรงสูง ไม่ฉีกขาดง่าย มีความหนาแน่น 0.920 g/ml ที่ 23 ° C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
หนา 0.04 มม. ซึ่งมีคุณสมบัติแสดงไว้ข้างล่างนี้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CALTEX

PRODUCT BULLETIN

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 I.

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 ไม่นอญูาตหน้าไปไซประโยชน์ การค้า
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 antioxidant. Additional information and data on Caltex Transformer Oil (Inhibited) is available on request.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



NIPPON UNICAR COMPANY LIMITED

ASAHI-TOKAI BLDG. 6-1, OHIEMACHI 2-CHOME
 CHIYODA-KU, TOKYO 100 JAPAN
 TELEX: J22917 NIPUNICA • PHONE: 03-270-3551 • 0331-2241

PRODUCT STANDARDS

NUC POLYETHYLENE-LL FOR FILM EXTRUSION

PRODUCT DESIGNATION

SPECIFIC FEATURES

NUCG-5211

NUC Polyethylene-LL, NUCG-5211, is produced using Union Carbide's proprietary gas-phase process. Films extruded from this product have outstanding puncture strength, tensile strength and overall toughness, while exhibiting good heat sealing latitude. This product is designed for high slip type tubular film production.

Date

April 11, 1983

BASIC COMPOUND PROPERTIES

บริษัท โพลีเอทิลีน จำกัด
 THAI POLYETHYLENE CO., LTD.

PROPERTY	TEST METHOD	UNIT	NUCG-5211
Melt Index, 190°C	ASTM D 1238	g/10 min	1.0
Density, 23°C	ASTM D 1505	g/ml	0.920

FILM PROPERTIES

(0.04 mm thick tubular film)

PROPERTY	TEST METHOD	UNIT	NUCG-5211
Tensile Strength, MD	ASTM D 882	kg/cm ²	410
Tensile Strength, TD	ASTM D 882	kg/cm ²	330
Ultimate Elongation, MD	ASTM D 882	%	600
Ultimate Elongation, TD	ASTM D 882	%	760
Stiffness	ASTM D 882	kg/cm ²	2,400
Dart Drop Impact Strength	ASTM D 1709A(F50)	g	150
Mass	ASTM D 1002	%	2.0
Gloss	ASTM D 2457 (45°)	-	75
Slip Property			H
Surface Treatability			Good

EXTRUSION CONDITIONS: Suggested stock temperature at extrusion die: 200-210°C
 Minor machine modifications may be necessary for optimum use by conventional tubular film extrusion equipment.

APPLICATION: NUC Polyethylene-LL, NUCG-5211, is recommended for the manufacture of frozen food bags, ice bags and other applications which require a combination of outstanding toughness, exceptional tensile strength and excellent machinability on conversion lines. The superior physical properties of this product will permit downgaging.

NOTE: The property values given are dependent upon using the testing methods as indicated and are offered herein as a guide in the use of the compound.