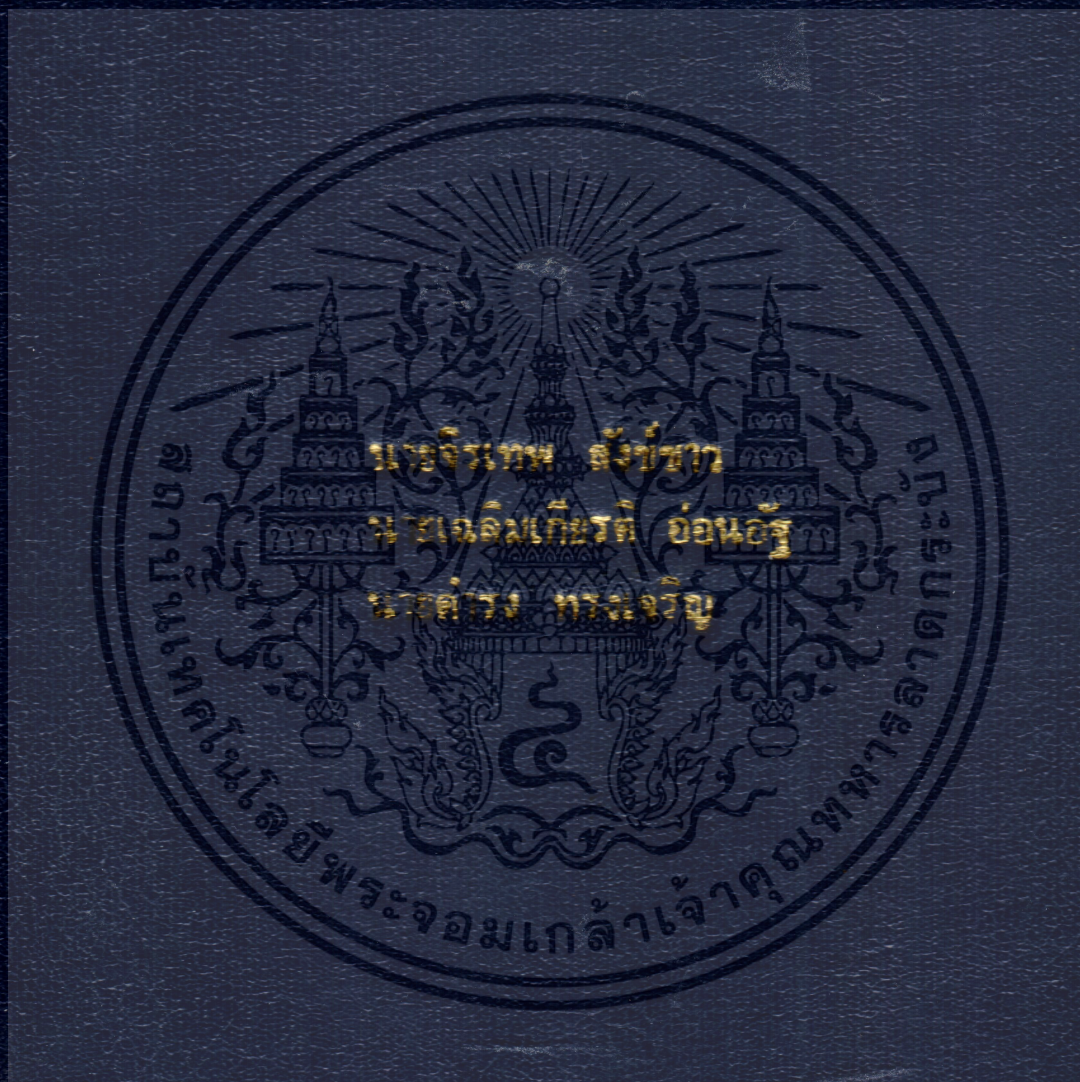


อิเล็กโทรดไฟฟ้าแรงสูง
ELECTRODE SET



พิพิธภัณฑ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของกรมวิทยาศาสตร์
พิพิธภัณฑ์วิทยาศาสตร์แห่งชาติ
อาคารวิทยาศาสตร์ไฟฟ้า
ตึกพิพิธภัณฑ์วิทยาศาสตร์แห่งชาติ เข็มทองทหาร ลาดกระบัง
พ.ศ. ๒๕๒๕



อิเล็กโทรดไฟฟ้าแรงสูง
ELECTRODE SET



ปริญญาโท เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2535

elav,
๑1110
๕๗๓๗

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

032673

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2535

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ฟิล์มเคลือบไฟฟ้าแรงสูง

ผู้จัดทำ

1. นาย วีระเทพ สังขทา
2. นาย เฉลิมเกียรติ ล่อนอัฐ
3. นาย คำทรง ทรงเจริญ

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อ. ศิริวัฒน์ โพนวิเศษกุล)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่ 1	บทนำ	1
บทที่ 2	สนามไฟฟ้าและเทคนิคการจนวน	3
2.1	บทนำทั่วไป	3
2.2	ความคงทนของการจนวนต่อแรงดันไฟฟ้า	3
บทที่ 3	การดีส์ซาร์จในกาซ	9
3.1	บทนำทั่วไป	9
3.2	ทฤษฎีจนวนเบองตันของกาซ	11
3.2.1	พื้นที่หน้าตัดการชน	12
3.2.2	ระยะอิสระเฉลี่ย	13
3.2.3	การกระจายของระยะอิสระเฉลี่ย	15
3.2.4	พลังงานและความเร็วของไอออน	16
3.2.5	การถ่ายเทจนวนพลังงานในขณะชน	20
3.3	อาณาภาคประจุในกาซ	20
3.3.1	การเกิดอาณาภาคประจุ	21
3.3.2	การรวมตัวใหม่	21
3.3.3	การแพร่กระจาย	23
3.3.4	การเคลื่อนที่ของอาณาภาค	24
3.3.5	ลักษณะกราฟของกระแสในฟังก์ชันของแรงดัน	25
บทที่ 4	การไอออนไนเซชัน	28
4.1	การไอออนไนเซชัน	28
4.1.1	การไอออนไนเซชันโดยการชน	28
4.1.1.1	สัมประสิทธิ์การไอออนไนเซชัน	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1.2	อะวานแดนซ์ของอิเล็กตรอน	33
4.1.2	โฟโตไอออนไนเซชัน	36
4.1.3	เทอร์มิลไอออนไนเซชัน	36
4.2	การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะ	37
4.2.1	การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะคะโทดโดยการชนของ ไอออนบวก	37
4.2.2	การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากคะโทดโดยพลังแสง	39
4.2.3	การปล่อยอิเล็กตรอนโดยความร้อน	40
4.2.4	การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากคะโทดโดยสนามไฟฟ้า	41
บทที่ 5	กลไกการเบรคดาวน์	45
5.1	กลไกการเกิดเบรคดาวน์	45
5.1.1	ดีสชาร์จแบบทาวน์เซนด์	45
5.1.1.1	กระบวนการขึ้นต้น (α - process)	46
5.1.1.2	กระบวนการไอออนไนเซชัน α - β	47
5.1.1.3	กระบวนการขึ้นสองแบบ β	50
5.1.1.4	เงื่อนไขเบรคดาวน์ทั่วไปในก๊าซ	52
5.1.2	ความเครียดสนามไฟฟ้าเบรคดาวน์	53
5.1.3	กลไกการเบรคดาวน์แบบสตรีมเมอร์	54
5.1.3.1	เงื่อนไขการเกิดสตรีมเมอร์เบรคดาวน์โดยกำหนด ด้วยสนามไฟฟ้าจากประจุค้าง	56
บทที่ 6	การเบรคดาวน์ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ	60
6.1	คุณสมบัติการเบรคดาวน์	60
6.2	หีกดาวไฟฟ้าเบรคดาวน์ที่ความถี่สูง	62
6.3	ผลของความชื้นของอากาศต่อหีกดาวไฟฟ้าเบรคดาวน์	64
6.4	การคำนวณแรงดันเบรคดาวน์ในอากาศของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7	การเบรคดาวน์ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ	68
7.1	โคโรน่าลิสซาร์จ	68
7.1.1	โคโรน่าของปลายแหลมหัวลมนและระนาบ	69
7.2	การเบรคดาวน์ในสนามไม่สม่ำเสมอ	72
7.3	เบรคดาวน์ในช่องว่างแบบ ก้าน - ก้าน กับแบบ ก้าน - ระนาบ	74
7.4	การเบรคดาวน์ในช่องว่างแบบทรงกลมระนาบ	79
7.5	ความสัมพันธ์ระหว่างศักดาไฟฟ้าเบรคดาวน์ ความถี่ และความชื้น	81
บทที่ 8	แฟลเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อแรงดันเบรคดาวน์	84
8.1	แฟลเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อแรงดันเบรคดาวน์	84
8.1.1	รูปลักษณะอิเล็กโตรด	84
8.1.2	ผลของความหนาแน่นของก๊าซ	86
8.1.3	ผลของความชื้นในอากาศ	87
8.1.4	ผลของสิ่งเปื้อนและน้ำมัน	87
8.1.5	ผลของรูปแบบแรงดัน	89
8.1.6	ผลของประจุค้างที่มีต่อแรงดันเบรคดาวน์ต่างหัว	90
8.1.7	ผลของแผ่นฉนวนบางกัน	93
บทที่ 9	การออกแบบและการสร้างอิเล็กโตรด	95
9.1	การออกแบบอิเล็กโตรด	95
9.1.1	อิเล็กโตรดทรงกลม	95
9.1.2	อิเล็กโตรดปลายแหลม	96
9.1.3	อิเล็กโตรดแผ่นระนาบ	96
9.2	การดำเนินงาน	100
9.2.1	วิธีการทดลอง	101
9.2.2	การทดสอบด้วยสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง	101
9.2.3	การทดสอบด้วยสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ	103

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 10 สรุปและวิจารณ์	142
10.1 ลักษณะของกระแสในฟังก์ชันของแรงดัน	142
10.2 สรุปผลการทดสอบอิมพีแดนซ์ด้วยสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง	147
10.3 สรุปผลการทดสอบอิมพีแดนซ์ด้วยสัญญาณไฟฟ้ากระแส	150
ภาคผนวก	153
กิตติกรรมประกาศ	156
หนังสืออ้างอิง	157



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1	อิลECTRดที่มีสนามไฟฟ้าแบบต่าง ๆ กัน	4
รูปที่ 2.2	เปรียบเทียบแรงดันที่ทำให้เกิดเบรคควาน์ในไดอิเล็กตริกตามลักษณะสนามไฟฟ้า	5
รูปที่ 2.3	สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่า	6
รูปที่ 2.4	เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิลECTRดแบบต่าง ๆ	7
รูปที่ 3.1	แสดงความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของแกปดิสชาร์จในกาซที่อุณหภูมิ	9
รูปที่ 3.2	ภาพแบบจำลองของโมเลกุลของกาซที่มีรัศมี r_1 และปล้อตอนภาครัศมี r_2 ออกไป ในแนวแกน x	12
รูปที่ 3.3	การกระจายของระยะอิสระ	16
รูปที่ 3.4	ความถี่การกระจายแบบแมกซ์เวลล์	18
รูปที่ 3.5	สัมประสิทธิ์การรวมตัวใหม่ของไอออนในอากาศที่อุณหภูมิ 20°C	22
รูปที่ 3.6	สภาพการเคลื่อนที่ของอิลECTRอนในโตรเจนที่ ความดัน 1 บาร์ 20°C	25
รูปที่ 3.7	(a) อิลECTRดแผ่นระนาบค้ำดิเตอร์วางในอากาศ	26
รูปที่ 3.7	(b) ลักษณะกราฟกระแส-แรงดัน	26
รูปที่ 4.1	อนุภาคชนกัน	29
รูปที่ 4.2	แสดงความสัมพันธ์ของ $\alpha/p = f(E/p_0)$ ของ H_2 และ N_2	34
รูปที่ 4.3	ละวาลานซ์ของอิลECTRอน	34
รูปที่ 4.4	ละตอมของไฮโตรเจน	36
รูปที่ 4.5	ค่าแรงศักย์ต่ำลงเนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอก	41
รูปที่ 5.1	ดิสชาร์จแบบกระบวนกา δ	47
รูปที่ 5.2	การสร้างอิลECTRอนอิสระโดยกระบวนกา δ	52
รูปที่ 5.3	กลไกการเบรคควาน์แบบสตรีมเมอร์	56
รูปที่ 6.1	ศักดาไฟฟ้าเบรคควาน์ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ	60
รูปที่ 6.2	ศักดาไฟฟ้าเบรคควาน์ในอาร์กลอน	61
รูปที่ 6.3	ความสัมพันธ์ระหว่างศักดาไฟฟ้าเบรคควาน์และความถี่	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.4	ศักดาไฟฟ้าเบรคควาน์กับความถี่ต่าง ๆ กัน	63
รูปที่ 6.5	การเพิ่มศักดาไฟฟ้าเบรคควาน์กับความถี่ในสนามสม่ำเสมอ	64
รูปที่ 6.6	สัมประสิทธิ์ของการไอออนไนเซชันของอากาศ	66
รูปที่ 7.1	การคำนวณจรรยาเพื่อศึกษาโคโรน่า	69
รูปที่ 7.2	ผลลัพธ์ของปลายแหลมที่ฉาบและระนาบ	69
รูปที่ 7.3	การเปลี่ยนแปลงของความถี่กับกระแสที่ขนาดของปลายแหลมต่าง ๆ กัน	70
รูปที่ 7.4	การเปลี่ยนแปลงของความถี่กับกระแสที่ความถี่ต่าง ๆ ของปลายแหลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 มม.	70
รูปที่ 7.5	(a) การเกิดไอออนไนเซชันที่บริเวณปลายแหลมที่ฉาบ	71
รูปที่ 7.5	(b) ประจุอวกาศที่เกิดขึ้นในช่องว่าง	71
รูปที่ 7.6	การกระจายของประจุอวกาศในโคโรน่าของปลายแหลมที่ฉาบ	71
รูปที่ 7.7	ศักดาไฟฟ้าเบรคควาน์สำหรับในโคโรน่าในทรงกระบอกโคแอ็กเซียล	72
รูปที่ 7.8	ศักดาไฟฟ้าเบรคควาน์สำหรับอากาศระหว่างปลายแหลม 30° กับระนาบ	73
รูปที่ 7.9	ศักดาไฟฟ้าเบรคควาน์ของช่องว่างปลายแหลมกับระนาบในอาร์กอน	74
รูปที่ 7.10	ศักดาไฟฟ้าเบรคควาน์ของช่องว่างแบบก้าน - ระนาบ ในอากาศ	75
รูปที่ 7.11	ศักดาไฟฟ้าเบรคควาน์ของช่องว่างแบบทรงกลม - ระนาบ	76
รูปที่ 7.12	ศักดาไฟฟ้าเบรคควาน์กับความถี่เพาเวอร์	76
รูปที่ 7.13	ศักดาไฟฟ้าเบรคควาน์และความถี่ในช่องว่างแบบก้าน - ระนาบ	77
รูปที่ 7.14	การเกิดประจุอวกาศภายในช่องว่างของปลายแหลมที่ฉาบและระนาบ	78
รูปที่ 7.15	ศักดาไฟฟ้าเบรคควาน์ของอิลเลคโตรดที่ฉาบกับความถี่	79
รูปที่ 7.16	ความสัมพันธ์ระหว่างศักดาไฟฟ้าเบรคควาน์และระยะช่องว่างแบบทรงกลม-ระนาบ	79
รูปที่ 7.17	คุณสมบัติของศักดาไฟฟ้าเบรคควาน์ในอากาศ ไฮโดรเจน และ SF ₆	81
รูปที่ 7.18	คุณสมบัติของศักดาไฟฟ้าเบรคควาน์เนื่องจากศักดาไฟฟ้าอิมพัลส์	81
รูปที่ 7.19	ศักดาไฟฟ้าเบรคควาน์และความถี่	82
รูปที่ 7.20	ศักดาไฟฟ้าเบรคควาน์และความถี่	82
รูปที่ 7.21	กราฟสำหรับแก้ผลเนื่องจากความถี่ในช่องว่างแบบ ก้าน - ก้าน	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 8.1	แรงดันเบรคดาวน์เฉลี่ยค่ายอดของกระแสสลับ 50 /60 Hz	85
รูปที่ 8.2	ลักษณะแรงดันเบรคดาวน์ระหว่าง	87
รูปที่ 8.3	ผลของประจุค้างของปลายแหลมหัวบวก	90
รูปที่ 8.4	ผลของประจุค้างปลายแหลมหัวลบ	91
รูปที่ 8.5	แรงดันเบรคดาวน์ของอิลคโตรดทั้งกับระนาบในอากาศ	92
รูปที่ 8.6	แรงดันเบรคดาวน์กระแสตรงของอากาศในเทอมของระยะแกป	93
รูปที่ 9.1	แสดงอิลคโตรดแบบทรงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 ซม. ที่ใช้ทดสอบ	95
รูปที่ 9.2	แสดงอิลคโตรดแบบปลายแหลมที่ใช้ทดสอบ	96
รูปที่ 9.3	แสดงรูปอิลคโตรดแบบสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ	97
รูปที่ 9.4	half contour ของอิลคโตรดแบบ uniform field	98
รูปที่ 9.5	แสดงอิลคโตรดแบบแผ่นระนาบที่สว่างขึ้นเพื่อทดสอบ	99
รูปที่ 9.6	แสดงชุดผลิตไฟฟ้ากระแสตรงหัวลบที่กด 600 kV	102
รูปที่ 9.7	แสดงชุดควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	102
รูปที่ 9.8	แสดงหม้อแปลงผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูง 100 kV	103
รูปที่ 9.9	แสดงชุดควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ	103
รูปที่ 9.10	แสดงการเกิดเบรคดาวน์เมื่ออิลคโตรดเป็นแบบปลายแหลมทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสตรง	104
รูปที่ 9.11	แสดงการต่อชุดทดลอง	105
รูปที่ 10.1	กราฟกระแสแรงดัน	142
รูปที่ 10.2	แสดงลักษณะกราฟกระแส - แรงดัน	145
รูปที่ 10.3	แสดงลักษณะกราฟกระแส - แรงดัน	146
รูปที่ 10.4	กราฟแสดงแรงดันเบรคดาวน์ (Vb) เทียบกับระยะแกป (d) ทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสตรง	148
รูปที่ 10.5	กราฟแสดงแรงดันเบรคดาวน์ (Vb) เทียบกับระยะแกป (d) ทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสตรง	149

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 10.6 กราฟแสดงแรงดันบรรคดาว์(vb)เทียบกับระยะแกป(d)ทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ	151
รูปที่ 10.7 กราฟแสดงแรงดันบรรคดาว์(vb)เทียบกับระยะแกป(d)ทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ	152



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1	แสดงถึงค่าระยะอิสระเฉลี่ยของก๊าซต่าง ๆ รวมทั้งความเร็วเฉลี่ย v โดยคำนวณจากทฤษฎีจลน์ของก๊าซ ที่ $T = 228 \text{ }^{\circ}\text{K}$ และ $P = 760 \text{ Torr}$	15
ตารางที่ 4.1	พลังงานโลออนไนเซชัน และพลังงานต้นกระตุ้นของโมเลกุล	30
ตารางที่ 4.2	ค่าคงตัว A และ B ของก๊าซต่าง ๆ	33
ตารางที่ 4.3	ค่าเวอรัคหนึ่งกซ์ของธาตุต่าง ๆ เป็น ev เมื่อใช้พลังงานแสงเทียบกับ เมื่อใช้พลังงานความร้อน	40
ตารางที่ 5.1	ความเครียดสนามไฟฟ้าเบรคควานของอากาศ	54
ตารางที่ 9.1	เปรียบเทียบแรงดันเบรคควานของอิลเลคโตรดแบบของ Bruce กับอิลเลคโตรดที่ทำขึ้นเอง	100
ตาราง	แสดงผลการทดสอบอิลเลคโตรดแบบต่าง ๆ	106 - 141

อิเล็กทรอนิกส์ไฟฟ้าแรงสูง

จิรเทพ สังขาว
เฉลิมเกียรติ อ่อนอัฐ
ดำรง ทรงเจริญ

อ. ศิริวัฒน์ โทษีเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2535

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นโครงการการศึกษาการเบรคดาวนของอากาศ ในสนามไฟฟ้า
แบบต่าง ๆ กันตามลักษณะของอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจัดทำขึ้นสี่ชนิดคือ แผ่นระนาบ ทรงกลม ปลายแหลม
มุม 30 องศา ปลายแหลมมุม 60 องศา โดยศึกษาผลของการเบรคดาวนเมื่อเปลี่ยนระยะห่าง
ระหว่างอิเล็กโตรด จาก 0.5 ซม. ถึง 8 ซม. และได้นำข้อมูลมาวิเคราะห์หาสมมุติฐาน
ของการเบรคดาวนรวมทั้งเปรียบเทียบกับทฤษฎี

ELECTRODE SET

Jiratep Sungkaw

Chalermkiat On-ath

Dumrong Songchareon

Siriwat Pothivechakul Advisor

1992

Abstract

This thesis is research project in electric field breakdown in air. It is an analytical study of the factor for breakdown voltage in electric field when change electrode and gap. The shape of electrode have four shape is sphere , plane , conicon point 30 degree, conicon point 60 degree ; by test for the various gap at distance 0.5 cm. to 8 cm. which have data to curve plotting to lay down the hypothesis and comparison with theory.

สัญลักษณ์

E	:	ความเครียดสนามไฟฟ้า หน่วย โวลต์/เซนติเมตร
E_b	:	ความเครียดสนามไฟฟ้าเบรคดาวน์ หน่วย โวลต์/เซนติเมตร
E_{sv}	:	ค่าเฉลี่ยของสนามไฟฟ้า หน่วย โวลต์/เซนติเมตร
E_i	:	ความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรน่า หน่วย โวลต์/เซนติเมตร
E_{max}	:	ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด หน่วย โวลต์/เซนติเมตร
I	:	กระแส หน่วย แอมแปร์
N_u	:	จำนวนอิเล็กตรอนเริ่มต้น
N_d	:	จำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งไปถึงอะโนด
N_x	:	จำนวนอิเล็กตรอนที่ระยะทางใด ๆ
V	:	แรงดันไฟฟ้าที่ป้อน หน่วย โวลต์
V_b	:	แรงดันไฟฟ้าเบรคดาวน์ หน่วย โวลต์
V_i	:	แรงดันไฟฟ้าที่โคโรน่าเริ่มเกิด หน่วย โวลต์
d	:	ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด หน่วย เซนติเมตร
e	:	ประจุของอิเล็กตรอน = 1.6×10^{-19} คูลอมป์
m	:	มวลของอิเล็กตรอน = 9.1×10^{-31} กิโลกรัม
v	:	ความเร็วของอิเล็กตรอน หน่วย เมตร / วินาที
p	:	ความดัน หน่วย ทอร์
λ	:	ระยะอิสระ (free path) ของอนุภาค
ρ	:	ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของอากาศ
x	:	ระยะทางใด ๆ จากอะโนด
x_e	:	ระยะวิกฤตของอะวาลานซ์อิเล็กตรอน
n^m	:	แฟคเตอร์สนามไฟฟ้า
α	:	สัมประสิทธิ์การไอออนไนเซชันที่หนึ่งของทาว์นเซนด์
β	:	สัมประสิทธิ์การไอออนไนเซชันที่สองของทาว์นเซนด์ โดยไอออนบวกชนอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซ
γ	:	สัมประสิทธิ์การไอออนไนเซชันที่สองของทาว์นเซนด์ โดยไอออนบวกชนคะโทด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1บทนำบทนำ

ในปัจจุบันนี้แม้ว่าได้มีการค้นพบฉนวนไฟฟ้าที่ดี มีความคงทนต่อแรงดันเบรคดาวนได้สูงมากก็ตาม แต่ยังมีราคาแพงถ้าจะนำมาใช้ในการฉนวนระบบไฟฟ้าก็จะต้องลงทุนสูงเพราะฉนวนการฉนวนด้วยอากาศก็ยังมีราคาแพงเป็นต่อระบบไฟฟ้าอยู่ การใช้อากาศเป็นฉนวนในระบบไฟฟ้าอย่างเช่น การฉนวนสายส่งแรงสูงซึ่งมีความยาวหลาย ๆร้อยกิโล ถ้าใช้การฉนวนด้วยสายเคเบิลหรือท่อหุ้มด้วยภาชนะปิด ก็จะทำให้ราคาการลงทุนสูง ฉะนั้นการศึกษาพฤติกรรมการเกิดเบรคดาวนในอากาศจึงเป็นสิ่งสำคัญ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นโครงการการวิจัย เพื่อศึกษา และวิเคราะห์ การเบรคดาวนของอากาศในสนามไฟฟ้าซึ่งได้จำแนกเป็นสามแบบ คือสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ สนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย และสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูง โดยได้จัดทำอิลเลคโตรด แบบระนาบ ทรงกลม และปลายแหลม เพื่อทดสอบรูปแบบสนามไฟฟ้าที่มีผลต่อการเบรคดาวนแบบต่างๆ ดังกล่าวข้างต้น เพื่อที่จะสังเกตปรากฏการณ์ สรุปรูปและวิเคราะห์ผลการทดลองก็ได้

โครงการวิจัยทดลอง

- 1) ในการทดสอบ เราศึกษาการเบรคดาวนเนื่องจาก
 - ผลของแรงดันเบรคดาวนที่เกิดจากอิลเลคโตรดชนิดต่าง ๆ
 - ผลของแรงดันเบรคดาวนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการนำเอาอิลเลคโตรดทุกชนิดมาทดสอบร่วมกับอิลเลคโตรดแบบอื่น ๆ และ มีการสลับขั้วแรงดันเพื่อทดสอบหาปรากฏการณ์ต่าง ๆ
 - ผลของแรงดันเบรคดาวนของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากอิลเลคโตรดแบบต่าง ๆ เมื่อเปลี่ยนศักยงานไฟฟ้า ซึ่งในการทดสอบเราได้ทำการทดสอบสองรูปแบบคือ การทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และ แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

- 2) ในการทดสอบเราได้ป้องกันผล สิ่งเปราะเปื้อนและน้ำฝนโดยการใช้ น้าซาหัดเงาโลหะทำความสะอาดทุกครั้งก่อนทำการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ในการทดสอบได้ป้องกันผลของประจุค้างโดยได้ทำการดีสชาร์จประจุ ลงดินทุกครั้ง ก่อนที่จะจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าสู่อุปกรณ์ทดสอบ

4) การป้องกันโคโรนาจากสายซิลล์และสายกราวด์ กับอุปกรณ์ทดลอง โดยการปรับระยะอิเล็กโตรดขณะที่ทำการทดลองให้มีค่าต่ำกว่า ระยะที่สายซิลล์หรือสายกราวด์ ของเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ต่อโลหะนำไฟฟ้าที่อยู่ใกล้ที่สุด

5) ทำการปรับระยะอิเล็กโตรด จาก 0.5 เซนติเมตร เพิ่มขึ้นทีละ 0.5 เซนติเมตร ไปจนถึง ระยะ 8 เซนติเมตร

สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากข้อมูลผลการทดลอง สามารถตั้งเป็นสมมุติฐาน ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเบรคดาวน์ และวิเคราะห์ผลการทดลองที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไอออนไนเซชัน กระบวนการการเพิ่มทวิคูณของอิเล็กตรอนอิสระ เพื่อสรุปและยืนยันสมมุติฐานที่เกิดขึ้น โดยการนำข้อมูลมาพลอตกราฟ เพื่อเปรียบเทียบการเบรคดาวน์ของสนามไฟฟ้าซึ่งเกิดจากการทดสอบอิเล็กโตรดแบบต่าง ๆ

กราฟที่จัดทำขึ้นมี

- กราฟระหว่างแรงดันเบรคดาวน์ กับระยะระหว่างอิเล็กโตรด ในอิเล็กโตรดรูปแบบต่าง ๆ

- กราฟระหว่างกระแสกับแรงดันที่ป้อน ก่อนการเกิดเบรคดาวน์ โดยปรับระยะแนบไว้ที่ 8 เซนติเมตร

บทที่ 2

สนามไฟฟ้าและเทคนิคการฉนวน

2.1 บทนำทั่วไป

การฉนวนเป็นสิ่งจำเป็นในการสร้างและใช้ประโยชน์ของไฟฟ้าโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับแรงดันสูง ที่ใดมีไฟฟ้าที่นั่นก็ต้องการฉนวนเพื่อป้องกันมิให้เกิดอันตรายแก่สิ่งมีชีวิตที่เข้าไปใกล้หรือสัมผัสเข้า หรือป้องกันมิให้เกิดการลัดวงจรระหว่างสายไฟกับสายไฟ หรือสายไฟกับดิน การฉนวนแก่สิ่งที่มีไฟฟ้าย่อมทำได้ง่ายหากมีที่ว่างมากพอหรือแรงดันนั้นต่ำ เช่น ต่ำกว่า 100 โวลต์ แต่ในการฉนวนแรงดันไฟฟ้าสูงและมีที่ว่างจำกัด การออกแบบการฉนวนให้ดีและประหยัดจำเป็นต้องใช้ความรู้เทคนิคการฉนวน ซึ่งเกี่ยวข้องกับแรงดัน ความเครียดสนามไฟฟ้า และลักษณะสมบัติของฉนวน พิกัดชี้ถึงความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า กำหนดด้วยสภาพการฉนวนเริ่มจะเปลี่ยนไปสู่สภาพนำไฟฟ้าอย่างใด ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อเกิดสปาร์ค หรือวามไฟ หรือเบรคดาวน์ผ่านฉนวน โดยปกติสภาพนำไฟฟ้าอย่างใดนั้นจะมีขนาดคง ๆ ตามเส้นทางที่เกิดเบรคดาวน์ ถ้าฉนวนนั้นเป็นภาชนะฉนวนเปลี่ยนเป็นสภาพนำไฟฟ้าไป และคงอยู่ได้ก็ต่อเมื่อแรงดันนั้นสูงพอที่จะทำให้เกิดกระแสไหลผ่านฉนวนสูงพอจนเป็นอาร์ค นั่นก็หมายความว่า การเสียหายการฉนวนของภาชนะนั้นไม่เป็นถาวร คือเสียหายการฉนวนชั่วขณะที่มีแรงดันป้อนล้น ตรงกันข้ามกับฉนวนที่เป็นของแข็งหลังการเกิดเบรคดาวน์แล้ว สภาพการฉนวนจะเสียหายอย่างถาวร ส่วนการฉนวนที่เป็นของเหลว การเสียหายการฉนวนจะกลับคืนสู่สภาพการฉนวนดั้งเดิมหลังจากการเบรคดาวน์ หรือสปาร์คได้ผ่านไปแล้ว ทำนองเดียวกันกับการฉนวนที่เป็นภาชนะ

2.2 ความคงทนของการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric strength)

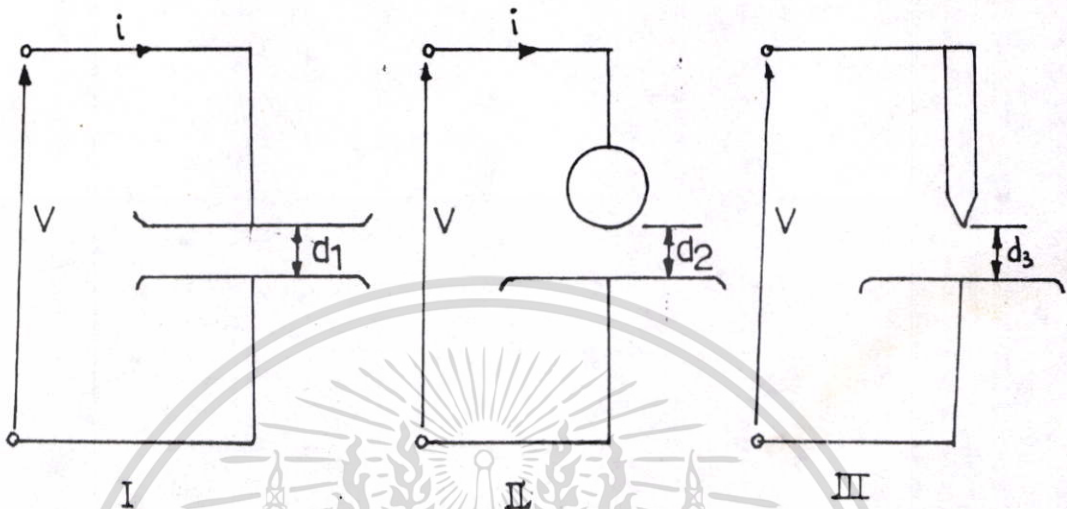
ความคงทนของการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า หมายถึงค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field stress) สูงสุดที่ฉนวนนั้นสามารถทนอยู่ได้ โดยไม่เกิดการเสียหายหรือเกิดเบรคดาวน์ หรือทำให้การฉนวนเสียหายซึ่งมีหน่วยเป็น V/cm หรือ kV/cm โดยมีหน่วยเป็นค่าแรงดันต่อหน่วยความหนาและระยะห่างของอิเล็กโตรด ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ใช้กำหนดค่าความคงทนของการฉนวนทางไฟฟ้า โดยทั่วไปจะหาจากสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ (uniform field) คือสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดที่มีลักษณะเป็นแผ่นระนาบ (plate-to-plate)

ความคงทนของการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า E_b ขึ้นอยู่กับพหุคูณค่าต่าง ๆ หลายประการ ซึ่ง

พอจะเขียนเป็นเกณฑ์ทั่วไปได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$E_m = f(\text{ลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิเล็กโตรด, ลักษณะสมบัติของไดอิเล็กตริกและเวลา})$



รูปที่ 2.1 อิเล็กโตรดที่มีสนามไฟฟ้าแบบต่างๆกัน

- 1) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform field)
- 2) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly nonuniform field)
- 3) สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอสูง (Highly nonuniform field)

ถ้าป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรดแบบต่างๆ ที่วางอยู่ในอากาศดังรูป 2.1 จะพบว่าแรงดันที่ทำให้เกิดเบรคดาวน์จะไม่เท่ากัน ถึงแม้ว่าจะจัดระยะ d_1, d_2 และ d_3 ให้เท่ากันก็ตาม ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดเบรคดาวน์สามารถวัดหาได้ง่าย ฉะนั้นแต่ละชนิดจะมีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ามิใช่ตายตัวค่าใดค่าหนึ่ง ส่วนใหญ่จะเป็นค่าสถิติ หรือค่าโดยประมาณ มักกำหนดหรือระบุด้วยค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด E_{max} ที่เกิด ณ จุดใดจุดหนึ่งระหว่างอิเล็กโตรดในขณะที่เบรคดาวน์เริ่มเกิดขึ้น ซึ่งจะมีค่ามากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับแฟคเตอร์ต่างๆ หลายประการ

อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (I)

อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หมายถึง อิเล็กโตรดที่มีสนามไฟฟ้าทุกๆ จุดในช่องระหว่างอิเล็กโตรดเท่ากัน ซึ่งคำนวณได้จากความสัมพันธ์

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

เมื่อ V คือ แรงดันที่ป้อนไประหว่างอิเล็กโตรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

d คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด

E คือ ความเค้นสนามไฟฟ้า ณ จุดใดๆ ระหว่างอิเล็กโทรด

E_{max} คือ ความเค้นสนามไฟฟ้าสูงสุด

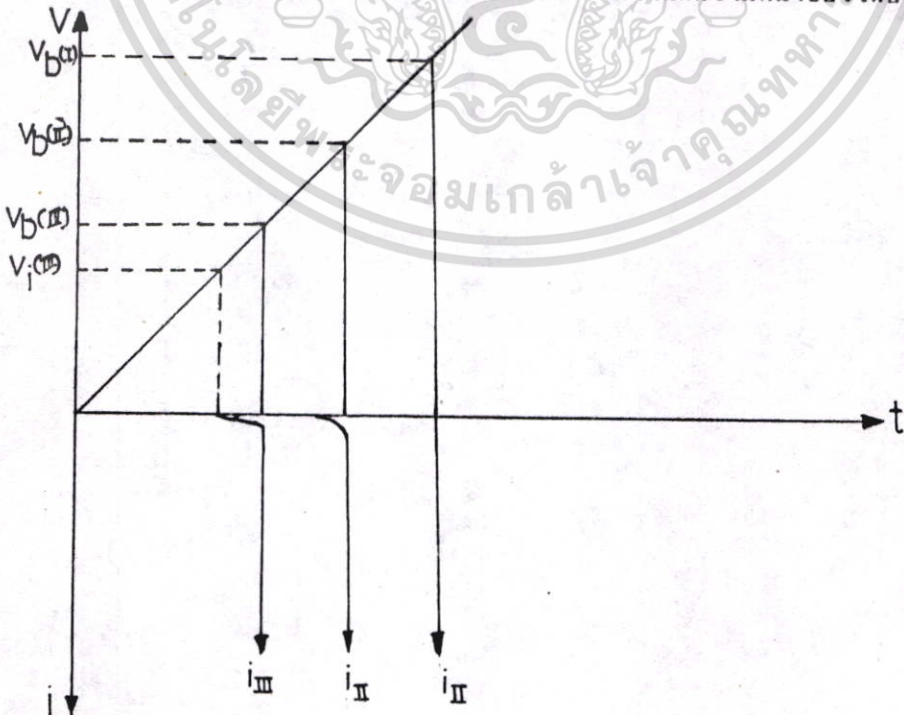
นั้นหมายความว่าเมื่อป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ จะเกิดเบรคดาวน์หรือสปาร์คทันทีที่ความเค้นสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรด(ซึ่งเท่ากันทุกจุด) ถึงค่าที่กำหนดค่าหนึ่งโดยประมาณและกระแสที่เพิ่มอย่างมากในทันทีทันใด ค่ากระแสเบรคดาวน์นี้จะถูกจำกัดด้วยค่าอิมพีแดนซ์ของตัวจ่ายและวงจรภายนอกเท่านั้น ซึ่งก่อนจะเกิดเบรคดาวน์นั้นค่ากระแสนี้จะวัดไม่ได้ดังในรูป 2.2 (แบบ I) และค่าความเค้นสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันขณะจะเกิดเบรคดาวน์นี้ก็คือ ค่าความดงทนทางไฟฟ้า หรือความดงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของการฉนวนนั่นเองซึ่งคำนวณได้จาก

$$E_b = V_b / d \tag{2.2}$$

เมื่อ V_b คือ แรงดันที่ทำให้เกิดเบรคดาวน์ด้วยสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

E_b คือ ความเค้นสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรคดาวน์ ซึ่งเรียกว่าความดงทนทางไฟฟ้าของการฉนวน

อย่างไรก็ตามค่า E_b ของไดอิเล็กตริกชนิดหนึ่งก็มีค่าไม่คงตัวเสมอไป เพราะขึ้นอยู่กับแฟคเตอร์ต่างๆ เช่น แม้แต่ความหนาหรือระยะห่าง d ก็ไม่เท่ากัน ค่า E_b ก็ไม่เท่ากัน ฉะนั้นในมาตรฐานที่กำหนดค่าความดงทนทางไฟฟ้าของฉนวนมักจะกำหนดความหนาของไดอิเล็กตริกเสมอ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าการรูป 2.2 นี้ เปรียบเทียบแรงดันที่ทำให้เกิดเบรคดาวน์ในไดอิเล็กตริกตามลักษณะสนามไฟฟ้า

อิลอคโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (II, III)

อิลอคโตรดแบบนั้นความเค้นสนามไฟฟ้าแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้น ความแตกต่างกัน ณ จุดต่างๆ จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิลอคโตรดที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากหรือน้อย ดังเช่นอิลอคโตรดในรูป 2.1 (แบบ II) ถ้าเขียนสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่าจะได้ดังรูป 2.3 จะเห็นได้ว่าความเค้นสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ผิวของอิลอคโตรดทรงกลม อาจคำนวณได้จากสมการ

$$E_{\max} = V/d \cdot n^* \quad (2.3)$$

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

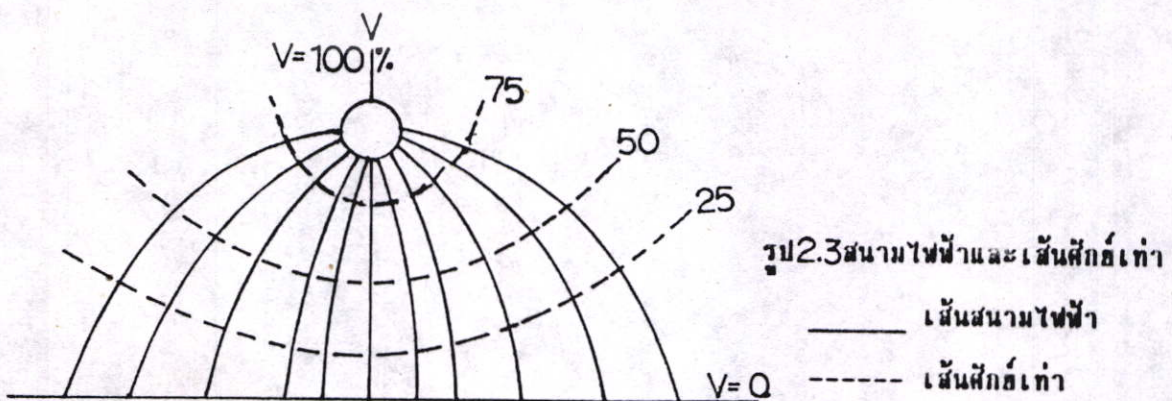
$$n^* = E_{av}/E_{\max} \leq 1$$

โดยที่ E_{av} คือ ค่าเฉลี่ยของสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ V/d

จึงอาจกล่าวได้ว่า n^* ก็คือ ครรชนีบอกให้ทราบว่าอิลอคโตรดนั้น n^* มีลักษณะสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากน้อยเพียงใด และโดยอาศัยแฟคเตอร์สนามไฟฟ้านี้เองจึงคำนวณหาความเค้นเบรคดาวน์ของฉนวนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอได้คือ

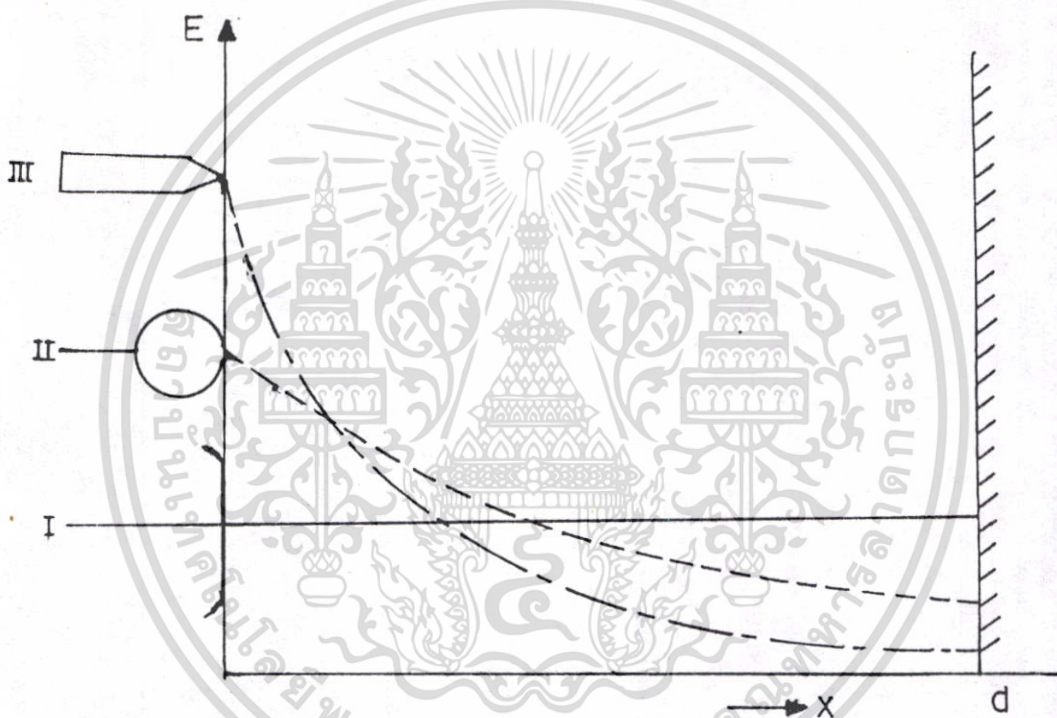
$$E_b = V_b/d \cdot n^* \quad (2.4)$$

สมการนี้ใช้ได้เฉพาะกรณีที่มีอิลอคโตรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย หรือใช้กับกรณีที่ไม่มีโคโรนาหรือพรีดีสชาร์จ (pre-discharge) ก่อนเกิดเบรคดาวน์ ดังอิลอคโตรดในรูป 2.1 (II) กล่าวคือ ก่อนเกิดเบรคดาวน์จะไม่ปรากฏว่ามีกระแสไหลระหว่างอิลอคโตรดเลข และลักษณะสนามไฟฟ้าจะไม่มีเปลี่ยนแปลง จะเกิดเบรคดาวน์ทันทีที่ความเค้นสนามไฟฟ้าสูงถึงค่าหนึ่ง คือ ค่าสนามไฟฟ้าวิกฤติ E_b



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่อิลเลคโตรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (highly nonuniform field) ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงจะอยู่ที่บริเวณใกล้เคียงกับผิวอิลเลคโตรดที่มีพื้นผิวนูนที่สุด เช่น ปลายแหลมดังในรูป 2.1(III) เมื่อระยะห่างออกไปจากผิวอิลเลคโตรดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็วดังในรูป 2.4 อิลเลคโตรดแบบหนึ่งแม้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าถึงค่าวิกฤติแล้วก็ตาม จะไม่เกิดเบรคดาวน์แต่จะเกิดโคโรนาในบริเวณใกล้ๆผิวอิลเลคโตรด คือ บริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด บริเวณอื่นๆ ยังมีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำจะไม่เกิดโคโรนา



รูปที่ 2.4 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิลเลคโตรดแบบต่างๆ

ฉะนั้นในช่องว่างระหว่างอิลเลคโตรดจะเกิดดิสชาร์จที่ไม่สมบูรณ์ (คือ ไม่ตลอดแนวระหว่างอิลเลคโตรด) เรียกว่าดิสชาร์จบางส่วน (partial discharge) ปรากฏการณ์อาจเกิดขึ้นอย่างค่อเนื่องหรือเป็นช่วงๆ จึงทำให้มีกระแสไหลในวงจรที่ป้อนแรงดันให้กับอิลเลคโตรด กระแสนี้จะเกิดขึ้นและวัดได้ก่อนเกิดเบรคดาวน์เรียกว่ากระแสโคโรนา (corona current) หรือกระแสฟิวส์ชาร์จดังในรูป 1.2(III) การเกิดโคโรนาจึงทำให้สนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตเปลี่ยนไป เพราะมีประจุค้าง (space charge) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดยังคำนวณได้จากสมการ (2.3) แต่ n จะเปลี่ยนไป ดังนั้นค่าความเครียดเบรคดาวน์ของการฉนวนจะคำนวณจากสมการ (2.4) ไม่ได้ข้อจำกัดตามสมการ (1.4) นี้อาจใช้คำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันโคโรนาไม่อาจมีได้สูงเกินไป อีกทั้งห้วงนี้ยังต้องแปลงเป็นค่า และคำนึงถึงถึงเงื่อนไขของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ เริ่มเกิดได้ เพราะสนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตยังไม่เปลี่ยนแปลงนั่นเอง

$$E_1 = V_1 / d \cdot n^* \quad (2.5)$$

เมื่อ E_1 คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มเกิด

V_1 คือ แรงดันป้อนที่โคโรนาเริ่มเกิด (corona inception voltage)

โดยที่ E_1 และ V_1 เป็นความเครียดสนามไฟฟ้าสนามไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่โคโรนาเริ่มเกิด และนั่นสมการ (2.5) จึงใช้ได้เฉพาะกรณีที่ไม่มีประจุค้าง ระหว่างอิเล็กโตรด (free of space charge) หรือกล่าวง่าย ๆ ก็คือสมการ (2.5) นี้ใช้สำหรับคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าหรือแรงดันเริ่มต้น (starting voltage, threshold voltage, inception voltage) ซึ่งหมายถึงแรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงในช่องว่างอิเล็กโตรด อาจจะเป็นเบรคดาวน์ (ในกรณีที่อิเล็กโตรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หรือไม่สม่ำเสมอเพียงเล็กน้อย) หรือเป็นแรงดันที่โคโรนาเริ่มเกิด (ในกรณีที่อิเล็กโตรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ค่าแรงดันเบรคดาวน์จะมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเริ่มต้น) ค่าแรงดันเริ่มต้นจึงอาจเขียนในรูปสมการทั่วไปได้ว่า

$$V_1 = E_1 \cdot d \cdot n^* \quad (2.6)$$

เมื่อ V_1 คือแรงดันเริ่มต้น

E_1 คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันเริ่มต้น V_1

ในกรณีที่อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หรือสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ค่า V_1 คือ V_b และ E_1 คือ E_b ถ้าอิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง $V_b > V_1$ ค่าแรงดันเบรคดาวน์นี้ไม่อาจจะคำนวณได้ง่ายๆ ทั้งนี้ไม่ทราบถึงการกระจายของประจุค้าง ว่าเป็นอย่างไร ฉะนั้นการคำนวณความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของการฉนวนที่อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง มักจะกำหนดด้วยค่าแรงดันเริ่มต้น เป็นตัวบอกถึงค่าความคงทนการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า อย่างไรก็ตามความคงทนการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า นั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิเล็กโตรด เช่น ระยะห่างของอิเล็กโตรด, รัศมีความโค้งของอิเล็กโตรด, ลักษณะพื้นผิวของอิเล็กโตรด แล้วยังขึ้นอยู่กับแฟคเตอร์อื่นๆ อีกหลายประการ

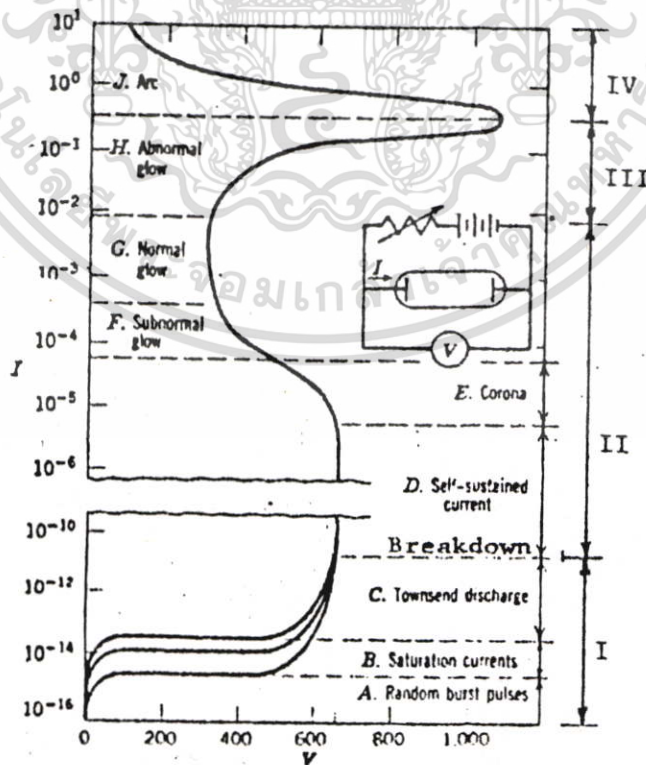


ดีซาร์จในก๊าซ

(Gaseous Discharge)

3.1 บทนำทั่วไป

ในบทที่ 1 ได้กล่าวถึงสนามไฟฟ้าและเทคนิคการลงนามมาแล้วว่า ลักษณะสมบัติของวัสดุลงนามมีความสำคัญซึ่งต่อเทคนิคการลงนามด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง โดยเฉพาะในช่วงดักที่เปลี่ยนสภาพจากลงนามไปสู่สภาพนำไฟฟ้า เกณฑ์ของสภาวะทั้งสองกำหนดด้วยความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน หรือความหนาแน่นของกระแสกับความเครียดสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ ก๊าซเป็นลงนามชนิดหนึ่งที่มีความเหมาะสมและความสำคัญต่อเทคนิคการลงนาม สภาพการเป็นลงนามของก๊าซจะเสื่อไปเมื่อมีดีซาร์จในกาชเกิดขึ้น คำว่าดีซาร์จในกาชเป็นการอธิบายปรากฏการณ์การไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านกาช โดยอาศัยการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุ(อิเล็กตรอน, ไอออน) ที่เกิดจากการไอออไนเซชันด้วยวิธีใดวิธีหนึ่ง ไอออนในเซชันจะเกิดขึ้นได้จะต้องมีสนามไฟฟ้าเป็นต้นเหตุให้อนุภาคประจุมีพลังงานและเคลื่อนที่ไปสู่อิเล็กโตรดได้ และนั่นก็คือกระแสไหลในกาช ดีซาร์จในกาชอาจเกิดขึ้นในช่วงกว้างของความดันกาช และมีกระแสไหลตั้งแต่ค่าน้อยๆ 10^{-16} A จนกระทั่งเป็นไมโครแอมป์หรือเป็นแอมป์ ดังเห็นผลการทดลองวัดกระแสดีซาร์จในแก๊สในแก๊บอิเล็กโตรดแผนระนาบ



รูปที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของแก๊บดีซาร์จในกาชนี้ออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนสิทธิ์ในทางอื่น และผู้จัดทำเอกสารนี้ขอสงวนสิทธิ์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาชนะนอกจากจะใช้ประโยชน์ในด้านการฉนวนแล้ว ยังใช้ประโยชน์จากการดีสชาร์จอีกด้วย เช่น หลอดไฟบรรจุภาพ หลอดเรืองแสง หลอดป้องกันแรงดันเกิน หลอดไดโอด หลอดไทรออดรอน เป็นต้น ดีสชาร์จในภาชนะที่ละอองเพื่อจุดมุ่งประสงค์ (การกรองด้วยไฟฟ้า) ดีสชาร์จในภาชนะมีกระแส มากๆ คือ อาร์ค เพื่อเรียงกระแส (เรกติไฟเออร์) และพลาสมาฟิสิกส์ เป็นต้นในที่นี้จะกล่าวถึง เทคนิคการฉนวนด้วยก๊าซโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อก๊าซจะเปลี่ยนสภาพไปสู่สถานะพลาสมาไฟฟ้านั้นเกิดขึ้น ได้อย่างไร ซึ่งอาจพิจารณาได้จากลักษณะกระแส-แรงดันดังในรูปที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ไหลในก๊าซกับแรงดันที่ป้อนให้กับอิเล็กโตรดที่มีก๊าซคั่นอยู่ ซึ่งมีลักษณะเป็นหลักการที่ให้กับก๊าซอื่นๆ ได้ด้วย

การเกิดดีสชาร์จในก๊าซมักเป็นจุดเริ่มต้นของกระบวนการต่างๆ ที่นำไปสู่การเกิดเบรคดาวน์ของการฉนวนได้ ลำดับขั้นของการกระบวนการดีสชาร์จอาจแบ่งออกได้เป็น 4 ช่วงด้วยกัน คือ

ช่วง I ดีสชาร์จแบบทาว์นเซนด์

เป็นช่วงที่เรียกว่า ดีสชาร์จที่ประทุตัวเองไม่ได้ (nonself sustained discharge) เขตของช่วงที่กำหนดด้วยแรงดันเริ่มต้น (ignition voltage, threshold voltage) เมื่อฉนวนแสงรังสีเข้าไปที่แคโทด (เช่น รังสีแสงอุลตราไวโอเลต หรือ เอ็กซ์เรย์) กระแสจะเพิ่มขึ้นตามแรงดันที่ป้อนในระยะเริ่มต้นแล้วกระแสอิ่มตัว (ส่วน B) เนื่องจากอิเล็กตรอนที่ออกจากแคโทดหรือเกิดขึ้นในก๊าซทั้งหมดวิ่งไปถึงอะโนดหมด ในช่วงนี้กระแสจะไม่เพิ่มตามแรงดันที่เพิ่ม จนกระทั่งถึงค่าหนึ่งกระแสจะเริ่มเพิ่มขึ้นอีกในลักษณะเอกซโพเนนเชียล เรียกขานกันว่าดีสชาร์จแบบทาว์นเซนด์ ถ้าหากเพิ่มแรงดันต่อไปอีกกระแสจะเพิ่มมากกว่าเอกซโพเนนเชียลจนถึงจุดหนึ่งแรงดันคร่อมแกปจะหดตัว และกระแสไหลเพิ่มขึ้นมากมายซึ่งจำกัดด้วยจรรยาบรรณนอกเท่านั้น จุดนี้เรียกว่าเบรคดาวน์ (breakdown) เมื่อเกิดเบรคดาวน์แล้วดีสชาร์จสามารถประทุตัวเองได้ (self sustained discharge) คือจะมีกระแสไหลต่อไปได้ถึงแม้ว่าจะเอาต้นกำเนิดแสงหรือรังสีไปยังแคโทดออกก็ตาม

ช่วง II ดีสชาร์จเรืองแสงปกติ (Normal glow discharge)

หลังจากเกิดเบรคดาวน์แล้ว ถ้าปล่อยให้กระแสเพิ่มขึ้นต่อไปโดยตัดความต้านทานของวงจรรักษานอกออก แรงดันคร่อมแกปดีสชาร์จจะลดลงจนเหลือค่าสุดขั้ว F และ G เรียกว่าดีสชาร์จเรืองแสงปกติดีสชาร์จเรืองแสงขั้วนี้อาจให้คงสภาพอยู่ได้ โดยมากจะเกิดที่ความดันก๊าซต่ำ

ในอากาศที่ความดันบรรยากาศอาจเกิดได้ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารหลวงพระบางที่ออกให้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วง III ดิสชาร์จเรืองแสงไม่ปกติ (Abnormal glow discharge)

หลังจากถึงย่านดิสชาร์จเรืองแสงปกติแล้ว ถ้ากระแสเพิ่มขึ้นต่อไปอีกเป็นเลขชี้ไปเนนเซียล เรียกว่าดิสชาร์จเรืองแสงไม่ปกติ เกิดไอออนในเข็้นจากความร้อนในภาชนะและที่ผิวโลหะ

ช่วง IV ดิสชาร์จแบบอาร์ค

ถ้าปล่อยให้กระแสเพิ่มขึ้นต่อไปอีกในที่สุดจะเกิดปรากฏการณ์ของดิสชาร์จที่เรียกว่า อาร์คดิสชาร์จ จะมีไอออนหลุดจากแคโทดด้วยความร้อน และมีแสงจ้าจากอาร์คจากปรากฏการณ์ดังกล่าว จุดปลายของช่วง I และค่าแรงดันเริ่มต้น (U_1 หรือ U_2) จะมีความสำคัญต่อเทคนิคการคำนวณ เพราะเป็นเกณฑ์ที่จะบ่งถึงการเปลี่ยนแปลงความคงทนการคำนวณของวัสดุคำนวณทั้งหลาย ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดเป็นลำดับขั้นต่อไป

ดิสชาร์จเบรคดาวน์ในแก๊สอาจแบ่งออกได้ 2 แบบ คือ เบรคดาวน์แบบสมบูรณ์ และเบรคดาวน์เพียงบางส่วน

1) เบรคดาวน์สมบูรณ์ (complete breakdown)

เบรคดาวน์สมบูรณ์หมายถึง การเกิดเบรคดาวน์ตลอดแก๊ส เชื่อมโยงระหว่างอิเล็กโทรด ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อวัสดุคำนวณเปลี่ยนแปลงการคำนวณหมดสิ้น หลังจากเบรคดาวน์เกิดขึ้นในคำนวณแล้วแรงดันจะเหลือน้อยมาก มีกระแสไหลมาตามแนวที่เกิดเบรคดาวน์ กระแสเบรคดาวน์นี้จะจำกัดด้วยความต้านทานภายในของตัวจ่ายแรงดัน ช่วงเวลาที่เบรคดาวน์เกิดขึ้นจะเป็นเวลาเดียวกับกับอาร์คเริ่มเกิด

2) เบรคดาวน์เพียงบางส่วน (partial breakdown)

เบรคดาวน์เพียงบางส่วน หรือเบรคดาวน์ไม่สมบูรณ์เกิดขึ้นในระบบการคำนวณที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (หลอดเดอรัสนามไฟฟ้า h° มีค่าต่ำ) เบรคดาวน์เพียงบางส่วนอาจเกิดก่อนเบรคดาวน์สมบูรณ์ได้ เป็นการเกิดไอออนในเข็้นในแก๊สเพียงบางส่วนบางที่เรียกว่าชาร์เจียสดิสชาร์จ (partial-discharge) หรือพรีดิสชาร์จ เช่น ดิสชาร์จแบบโคโรนา

3.2 ทฤษฎีจลน์เบื้องต้นของก๊าซ

การเกิดเบรคดาวน์ดังกล่าวข้างต้นอาจอธิบายได้ด้วยทฤษฎีกลไกของทาวน์เซนด์ หรือกลไกเบรคดาวน์แบบสตรีมเมอร์ ซึ่งกลไกทั้งสองอาศัยทฤษฎีจลน์ (kinetic theory) เป็นพื้นฐาน ก๊าซประกอบด้วยโมเลกุลหรืออะตอมซึ่งอยู่หรือเคลื่อนที่ด้วยความร้อนอย่างไม่เป็นระเบียบ จึงเกิดการชนกันเองได้ ช่วงระยะห่างระหว่างที่อนุภาคเคลื่อนที่ชนครั้งหนึ่งกับครั้งสองในขณะที่มีความเร็ว v เรียกว่า ระยะอิสระ (free path) ทั้งค่า v และ ของอนุภาคทั้งหมดเป็นสถิติกระจาย ซึ่งฟังก์ชันการกระจายจะบอกถึงลักษณะสมบัติของแต่ละก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่ผูกขาดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 พื้นที่หน้าตัดการชน (collision cross-section) และระบะลีสระเฉลี่ย

พื้นที่หน้าตัดการชนหมายถึง ขอบเขตพื้นที่ที่ส่องอนุภาคของก๊าซมีโอกาสที่จะเคลื่อนที่ชนกัน
ซึ่งหาได้จากสมการ

$$A_c = (r_1 + r_2)^2 \tag{3.1}$$

เมื่อ A_c คือ พื้นที่หน้าตัดการชน

r_1 และ r_2 คือ รัศมีของสองอนุภาค

ถ้าคิดเป็นพื้นที่หนึ่งหน่วยจะได้พื้นที่การชน

$$A_c = N (r_1 + r_2)^2$$

เมื่อ N คือ จำนวนโมเลกุลของก๊าซต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (ความหนาแน่น) ดังแบบจำลองในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ภาพแบบจำลองของโมเลกุลของก๊าซมีรัศมี r_1 และปล่อยอนุภาครัศมี r_2 ออกไปในแนวขนานแกน x

ถ้าปล่อยอนุภาค n_0 ซึ่งมีรัศมี r_2 ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อวินาทีเข้าไปในก๊าซที่ระยะ $x=0$

และมีความเร็วสูงกว่าความเร็วเคลื่อนที่ของโมเลกุลของก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ $n(x)$ เป็นจำนวนอนุภาคที่ยังมีอยู่ที่ระยะ x จากตำแหน่งที่ปล่อย
 ดังนั้นในช่องหนา dx จะมีอนุภาคกระจายอยู่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่หน้าตัดความหนาแน่น n
 และช่องหนา dx นั้นคือ

$$dn = -n(x)Nr(r_1+r_2)^2 dx$$

เครื่องหมายลบแสดงถึงจำนวนอนุภาคลดลง

เมื่ออินทิเกรตทั้งสองข้างโดยจำนวนอนุภาคเริ่มต้น $n(x=0) = n_0$

$$n(x) = n_0 \exp[-Nr(r_1+r_2)^2 x] \quad (3.2)$$

3.2.2 ระยะอิสระเฉลี่ย (mean free path)

ระยะอิสระเฉลี่ย $\bar{\lambda}$ หมายถึง ค่าเฉลี่ยระยะที่อนุภาคเคลื่อนที่ระหว่างที่จะชนกัน ระยะอิสระ
 ที่น่าจะเป็น x จะเท่ากับจำนวนการชนที่เป็นไปได้ในช่วงระหว่าง x กับ $x+dx$ ซึ่งเท่ากับ dn/n_0
 ระยะอิสระเฉลี่ยคูณกับอนุภาค n_0 จะเท่ากับผลรวมของระยะอิสระของแต่ละอนุภาคคูณกับจำนวน
 อนุภาคที่ชนกันเมื่อเคลื่อนที่ไปเป็นระยะเท่ากับระยะอิสระ นั่นคือ

$$\begin{aligned} \bar{\lambda} \cdot n_0 &= \int_0^\infty x \cdot dn \\ &= \frac{-\pi(r_1+r_2)^2}{N} \int_0^\infty x \cdot n_0 e^{-\pi(r_1+r_2)^2 N x} dx \\ \bar{\lambda} &= \frac{1}{Nr(r_1+r_2)^2} \end{aligned} \quad (3.3)$$

นั่นคือระยะอิสระเฉลี่ยจะเท่ากับส่วนกลับของพื้นที่หน้าตัดการชนทั้งหมด

ถ้าอนุภาคเป็นโมเลกุลของก๊าซเดียวกัน $r_1 = r_2 = r$ จะได้ระยะอิสระเฉลี่ยของสมการ(3.3)

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{4Nr^2} \quad (3.3.1)$$

ในสนามไฟฟ้าอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่มีอัตราเร่งเช่นโมเลกุลจึงเสมือนอยู่ที่หน้าวัดของอิเล็กตรอนมี
 เอกสารเป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของโรงเรียนเพื่อการศึกษา และขึ้นชื่อของโรงเรียน
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดเล็กเมื่อเทียบกับขนาดของโมเลกุล (คือ $r_e \ll r_1$) จึงได้ค่าระยะอิสระเฉลี่ยของอิเล็กตรอนเป็น

$$\bar{\lambda}_e = 1/Nr_1^2 \pi \quad (3.3.2)$$

ค่าระยะอิสระเฉลี่ยที่กล่าวข้างต้นนั้นได้จากการปล่อยอนุภาคที่มีความเร็วสูงกว่าความเร็วของโมเลกุลของก๊าซ ในกรณีที่ความเร็วของอนุภาคและโมเลกุลมีค่าใกล้เคียงกัน คือ v_1 และ v_2 ตามลำดับความเร็วสัมพัทธ์จะเป็น

$$v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2}$$

ดังนั้นระยะอิสระเฉลี่ยของก๊าซเองให้เป็น

$$\text{เมื่อ } v_1 = v_2, v = \sqrt{2} v_1$$

จะได้

$$\begin{aligned} \bar{\lambda}_g &= 1/\sqrt{2} \bar{\lambda}_i \quad (\bar{\lambda}_i = \text{ระยะอิสระเฉลี่ยของไอออน}) \\ \bar{\lambda}_g &= 1/4\sqrt{2}Nr_1^2 \end{aligned}$$

แสดงว่า $\bar{\lambda}_e = 5.66 \bar{\lambda}_g$ นั่นคืออิเล็กตรอนที่มีขนาดเล็กจะมีระยะอิสระเฉลี่ยมากกว่า

ความยาวของระยะอิสระเฉลี่ยขึ้นกับอุณหภูมิ T และความดัน P เพราะความหนาแน่นของโมเลกุล N ขึ้นอยู่กับแฟคเตอร์ทั้งสองนี้คือ N เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ P และเป็นสัดส่วนกับอุณหภูมิ T นั่นคือ

$$N = P/kT$$

$$\bar{\lambda}_g = kT/4\sqrt{2} \pi r_1^2 T$$

หรือเขียนอยู่ในรูป

$$\lambda_{p,t} = (P_0/P) * (T/T_0)$$

จึงขอให้คำนวณค่า ได้ถ้าทราบค่าที่สภาวะอื่นของ p และ t ตัวอย่างระยะอิสระของก๊าซต่างๆ แสดงไว้ในตาราง 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงนิ้งค่าระยะอิสระเฉลี่ยของกาซต่างๆ รวมทั้งความเร็วเฉลี่ย v โดยคำนวณจากทฤษฎีจลน์ของกาซที่ $T = 228^\circ\text{K}$ และ $p = 760 \text{ Torr}$

กาซ	น.น. โมเลกุล	(10^{-8} m)	$v(\text{m/sec})$	เส้นผ่าศูนย์กลาง
H_2	2.016	11.77	1,740	2.74
He	4.002	18.62	1,230	2.18
H_2O	18.000	4.18	580	4.60
Ne	20.180	13.22	550	2.59
N_2	28.020	6.28	467	3.75
O_2	32.000	6.79	437	3.61
A	39.940	6.66	391	3.64
CO_2	44.000	4.19	372	4.59
Kr	82.900	5.12	271	4.16
Xe	130.200	3.76	217	4.85
SF_6	146.06	2.5		

3.2.3 การกระจายของระยะอิสระเฉลี่ย

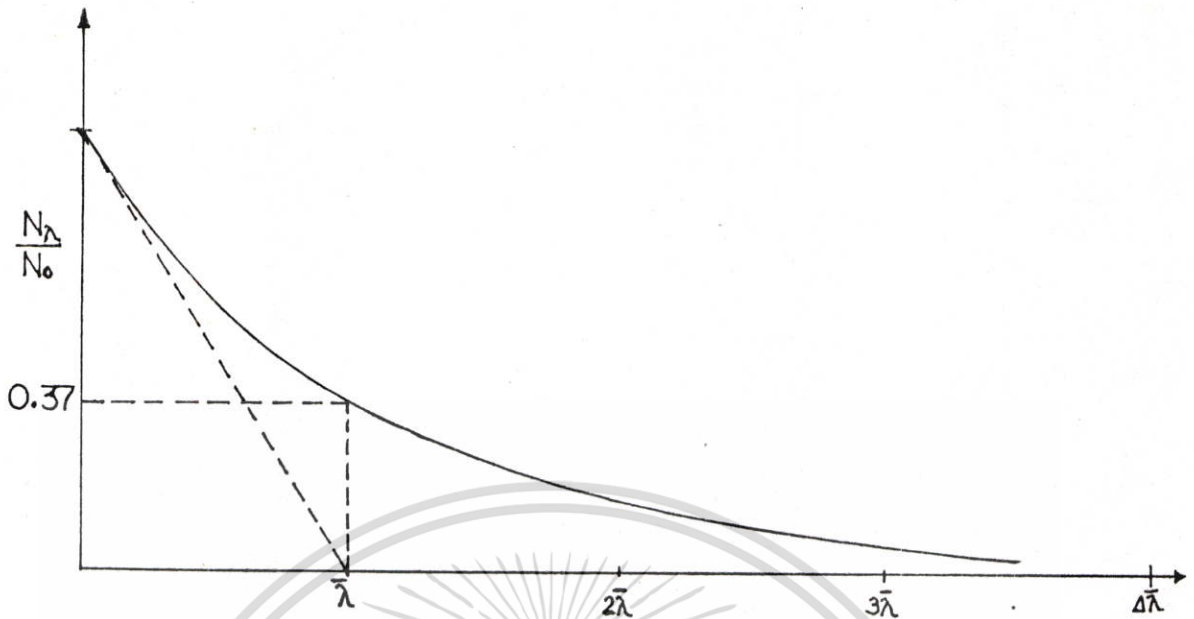
การกระจายของระยะอิสระเฉลี่ยขึ้นกับจำนวนโมเลกุล ถ้าให้ $n(x)$ เป็นจำนวนอนุภาคเคลื่อนที่เป็นระยะ x โดยไม่ชนกับโมเลกุลหรืออนุภาคอื่น ระยะ x ก็คือระยะอิสระ นั่นเอง และ $n(x)$ คือ N ซึ่งเท่ากับจำนวนอนุภาคต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ที่มีระยะอิสระเท่ากับโดยเริ่มต้น ด้วยจำนวนอนุภาคต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรเป็น N_0 นั่นคือ

$$\frac{dn}{n} = -Ndx/\bar{\lambda}$$

$$\frac{1}{n} \frac{dn}{dx} = -N/\bar{\lambda}$$

โดยการอินทิเกรตทั้งสองข้างจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ $N_0 e^{-x/\bar{\lambda}}$ ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น $N_0 e^{-x/\bar{\lambda}}$ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (3.5) การคำนวณว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 การกระจายของระยะอิสระ

เมื่อทราบค่าระยะอิสระและความเร็วเฉลี่ย จะคำนวณอัตราการชนต่อหน่วยเวลาได้ เช่น ก๊าซไนโตรเจนมี $\bar{\lambda} = 6.28 \times 10^{-8}$ ม. ความเร็ว $\bar{v} = 467$ m/sec (จากตาราง 3.1) ฉะนั้นความบ่อยครั้งของการชนต่อวินาทีจะหาได้

$$\begin{aligned} &= \bar{v} / \bar{\lambda} = 467 / 6.28 \times 10^{-8} \\ &= 7.4 \times 10^9 \\ &= 7.44 \text{ ครั้งต่อวินาที} \end{aligned}$$

นั่นคือจะมีการชนกัน

3.2.4 พลังและความเร็วของไอออน

เมื่อปล่อยให้อิออนภาคเคลื่อนที่ในปริมาตรอันหนึ่ง อนุภาคเหล่านั้นจะมีพลังงานอยู่ในรูปพลังงานจลน์และเกิดการชนกัน อนุภาคที่ชนกันนั้นจะถ่ายเทหรือแบ่งพลังงานแก่กัน และมีทิศทางการกระจาย ในสภาวะสมดุล อนุภาคทั้งหมดจะมีพลังงานจลน์เฉลี่ย คือ

$$W_{k.E} = 2/3 KT = 1/2 m\bar{v}^2 \quad (3.6)$$

เมื่อ k คือ ค่าคงตัวของโบลทซ์มัน เท่ากับ 1.37×10^{-23} ws/K

T คือ ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์

m คือ มวลของอนุภาค

\bar{v} คือ ค่าเฉลี่ยของความเร็วกำลังสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์กับการแข่งขันเพื่อชิงศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานของก๊าซปริมาตรหนึ่ง กำหนดด้วยอุณหภูมิ ผลคูณ mv^2 ขึ้นอยู่กับความดันของก๊าซ ตามทฤษฎีจลน์ของก๊าซ

$$p = \frac{1}{3} n \cdot mv^2$$

$$pv = RT$$

โดยที่

เมื่อ v คือ ปริมาตร

v คือ ความเร็วของก๊าซ

R คือ ค่าคงตัวของก๊าซ 8.3143 J/K.MOL .

ทำนองเดียวกับการกระจายของระลอกอิสระ จะมีการกระจายเชิงสถิติของความเร็วอนุภาค เป็นการกระจายแบบแมกซ์เวลล์หรือแบบโบลต์ซมันน์ ความเร็วทั้งหลาย v จะคิดเทียบกับความเร็วสูงสุด v_p คือ

$$dN_v/N = 4\sqrt{\pi} (v/v_p)^2 [\exp(-v/v_p)^2]^{-1} dv/v_p \quad (3.7)$$

เมื่อ v_p = เป็นความเร็วที่น่าจะเป็น

dN_v/N = จำนวนสัมพัทธ์ของอนุภาค ซึ่งมีขนาดตามความเร็วระหว่าง v/v_p กับ $v+dv/v_p$ ฟังก์ชันของการกระจาย

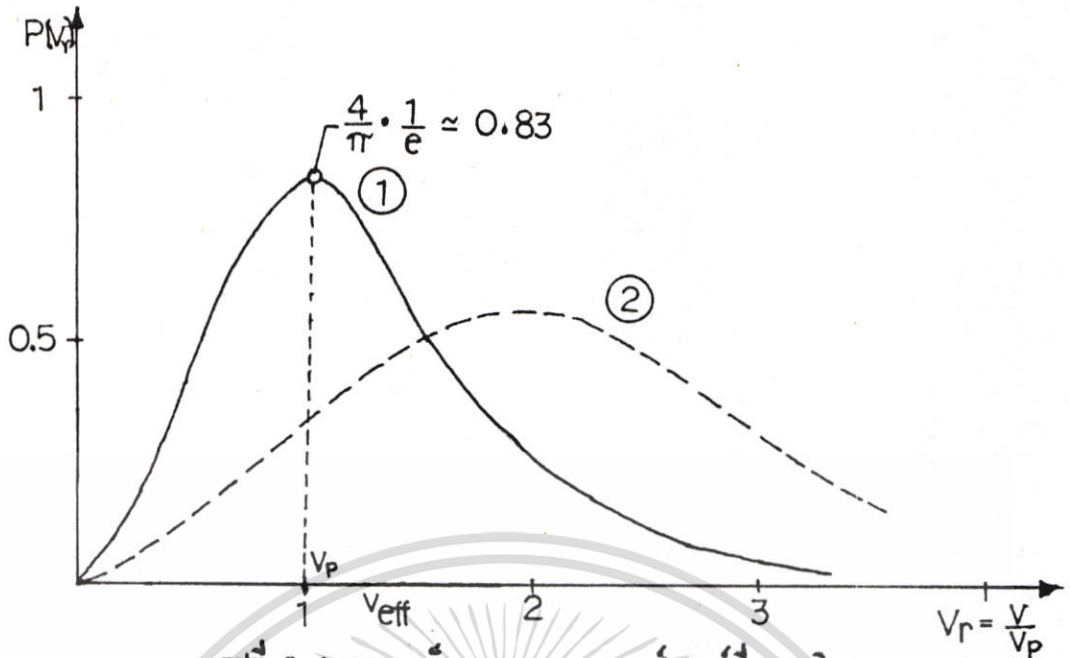
$$p(v/v_p) = p(v_r) = 4\sqrt{\pi} \cdot e^{-v_r^2} \quad \text{โดยที่ } v_r = v/v_p$$

ถ้าพื้นที่เป็น 1

$$\int_{v_r=0}^{\infty} p(v_r) dv_r = 1$$

จะได้เส้นกราฟความเร็วกระจายไม่สมมาตรดังในรูปที่ 3.3 ซึ่งจะได้ความเร็วปานกลางกับความเร็วสูงสุดไม่เท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ความเร็วกระจายแบบแมกซ์เวลล์ที่อุณหภูมิ T_1 (1) $<$ T_2 (2)

เมื่อลื่นที่เกาะทจะได้ความเร็วเฉลี่ยปานกลาง

$$\begin{aligned}
 \bar{v} &= \int_0^{\infty} v_r \cdot p(v_r) dv_r \\
 &= \frac{4}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} v_r^3 \cdot e^{-v_r^2} dv_r = \frac{2}{\sqrt{\pi}}
 \end{aligned}$$

ฉะนั้น $\bar{v} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} v_p = 1.128 v_p$ (3.8)

$$\begin{aligned}
 (v_r)^2_{\text{eff}} &= \int_0^{\infty} v_r^2 \cdot p(v_r) dv_r \\
 &= \frac{4}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} v_r^4 \cdot e^{-v_r^2} dv_r = \frac{3}{2}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภาควิชาวิศวกรรมเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานจลน์ของอนุภาคหาได้จากความเร็วสัมผล v_{eff} (effective velocity) นั่นคือ

$$1/2 m v_{eff}^2 = 3/2 KT$$

เมื่อ m คือ มวลของอนุภาค

T คือ อุณหภูมิ

ความเร็วของอนุภาคในเทอมของอุณหภูมิจึงเขียนได้ว่า

$$v_{eff} = \sqrt{\frac{3KT}{m}}$$

$$v = \sqrt{\frac{8KT}{\pi m}}$$

$$v_p = \sqrt{\frac{2KT}{m}}$$

ในตาราง 3.1 แสดงถึงความเร็วเฉลี่ยปานกลางที่อุณหภูมิ 25 °C และความดัน 760 Torr ซึ่งสังเกตเห็นได้ว่า อนุภาคเคลื่อนที่ในบรรยากาศที่อุณหภูมิห้องด้วยความเร็วในย่าน 1 mm/usec ในก๊าซมีอิเล็กตรอน และมีความเร็วกระจายเช่นเดียวกันนี้ พลังงานจลน์ของอนุภาคที่มีมวลสาร m_1, m_2, \dots จากการเคลื่อนที่ด้วยความร้อนจะต้องมีค่าเท่ากันคือ

$$1/2 m_1 (v_1)_{eff}^2 = 1/2 m_2 (v_2)_{eff}^2 = \dots = 3/2 KT$$

ดังนั้นอิเล็กตรอนซึ่งมีมวลน้อยจึงมีความเร็วสูงกว่าอนุภาคหรือโมเลกุลที่มีน้ำหนักมากกว่า ฉะนั้นความเร็วเฉลี่ยของโมเลกุลไฮโดรเจนที่มีมวลของโมเลกุล $H_2 = 2.016$

$$\begin{aligned} \bar{v}_e &= \sqrt{2m_p/m_e}, \quad \bar{v}_{H_2} = \sqrt{2.1840 \times 1.74} \\ \bar{v}_e &= 105 \text{ mm/usec} \end{aligned}$$

เมื่อ m_p = มวลของโปรตอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสำนักงาน = 1840 ก.ม. เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.5 การถ่ายโอนพลังงานในอะตอม

ถ้าอนุภาคชนกันแบบยืดหยุ่นจะมีการถ่ายโอนพลังงานจลน์เท่านั้น จากรูปโมเดลทรงกลมที่ยืดหยุ่นมีมวล m_1 และมีพลังงานจลน์ v ชนทรงกลมที่ยืดหยุ่นมีมวล m_2 เมื่อชนกันในแนวผ่านศูนย์กลางจะมีการถ่ายโอนพลังงานให้กับทรงกลมที่ถอยถอยมา

$$dv/v = 4 m_1 m_2 / (m_1 + m_2)^2$$

ในกรณีที่ $m_1 = m_2$ จะได้ $dv/v = 1$ นั่นคือจะมีการถ่ายโอนพลังงานทั้งหมดจากทรงกลมเคลื่อนที่ให้กับทรงกลมที่อยู่นิ่ง ถ้า $m_1 \ll m_2$ หรือ $m_1 \gg m_2$ เช่นการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอม หรือกับโมเลกุลทุกกรณีจะได้

$$dv/v \ll 1$$

ถ้าการชนนั้นไม่อยู่ในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางจะมีการถ่ายโอนพลังงานเพียงบางส่วนเท่านั้น

$$dv/v = 2 m_1 m_2 / (m_1 + m_2)^2$$

ในกรณีที่การชนเป็นแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic) พลังงานจลน์ส่วนหนึ่งจะทำให้เกิดอนุภาคที่ชนเกิดต้นตัว (excitation), แยกตัว (dissociations) หรือเกิดแตกตัวของอิเล็กตรอน (ionization) การชนในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางแบบไม่ยืดหยุ่น พลังงานที่ถ่ายโอนจะเป็น

$$dv'/v = m_2 / m_1 + m_2$$

ถ้า $m_1 = m_2$ จะได้

$$dv'/v = 1/2$$

แต่ถ้า $m_1 \ll m_2$ จะได้

$$dv'/v = 1$$

แสดงว่าอิเล็กตรอน (m_1) สามารถถ่ายโอนพลังงานจลน์ทั้งหมดให้กับอะตอมหรือโมเลกุลเกิดต้นตัว, หรือแยกตัว หรือแตกตัวของอิเล็กตรอน ไอออนสามารถถ่ายพลังงานได้สูงสุด ($m_1 = m_2$) เพียง 50 %

3.3 อนุภาคประจุในก๊าซ (charge carrier in gas)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ปราศจากนามไฟฟ้าสถิตหรือมีแต่น้อยมากโปรดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 การเกิดอนุภาคประจุ

ในภาชนะที่มีประจุบวกหรือลบ (ไอออนบวก , ไอออนลบ และอิเล็กตรอน) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากมีรังสีคอสมิกในบรรยากาศ รังสีจากสารกัมมันตภาพ เช่น รังสี α , β , γ เกิดจากแสงอัลตรา อิเล็กตรอนหลุดจากโมเลกุลของอากาศเนื่องจากพลังงานความร้อน แต่อิเล็กตรอนนี้จะอยู่เป็นอิสระในช่วงระยะเวลาอันสั้นและจะไปเกาะอยู่กับอนุภาคเป็นกลาง ทำให้เกิดเป็นอนุภาคประจุลบขึ้น หรือไม่รวมกับไอออนบวก

ในบรรยากาศจำนวนไอออนที่มีอยู่จะเปลี่ยนไปตามสถานที่ จะมีมากที่ระดับสูงๆ และจะมีน้อยลงที่ระดับน้ำทะเล เมื่อมีฝนตกหรือมีหมอกจำนวนไอออนจะมีมากขึ้น และจะมีมากที่สุดเมื่อเกิดพายุฝนฟ้าคะนอง

ที่ระดับเหนือน้ำทะเลมี	$N_1^+ = 600$	ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
	$N_1^- = 500$	ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
ที่ระดับ 5000 เมตร เหนือทะเล	$N_2^+ = 2350$	ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
	$N_2^- = 2000$	ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
มีฝนตกหรือมีหมอกจำนวนเพิ่มขึ้นเท่าตัว		
ฟ้าคะนอง	$N_3^+ = 15,000$	ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
	$N_3^- = 12,000$	ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
แต่จำนวนอิเล็กตรอนจะมีน้อย	$N_e = 10$	ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

เพราะอิเล็กตรอนมักจะเกาะตัวบนโมเลกุลได้ง่าย

3.3.2 การรวมตัวใหม่

การรวมตัวกันใหม่ระหว่างอนุภาคประจุเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดสภาวะสมดุล อนุภาคประจุรวมตัวเข้าด้วยกันเพราะมีแรงดึงดูดเข้าหากัน ตามกฎของคูลอมบ์และการแพร่กระจายของโมเลกุลเนื่องจากพลังงานความร้อน ปกติมีจำนวนไอออนบวกและไอออนลบเท่าๆ กันอนุภาคประจุจะลดลงต่อหน่วยเวลาอาจแสดงได้ด้วยความสัมพันธ์

$$dN^+ = dN^- = -pN^+ \cdot N^- dt$$

เมื่อ p คือสัมประสิทธิ์การรวมกันใหม่ (recombination coefficient) (เครื่องหมายลบแสดงถึงจำนวนลดลงตามเวลา)

โดยที่ $N^+ = N^- = N$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในห้องเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 และไม่ให้นำไปเผยแพร่ในที่สาธารณะอื่นใด และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การรวมตัวกันใหม่ระหว่างเวลา $t = 0$ ถึง $t = t$ เมื่ออินทิเกรตจะได้

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -r \int_0^t dt$$

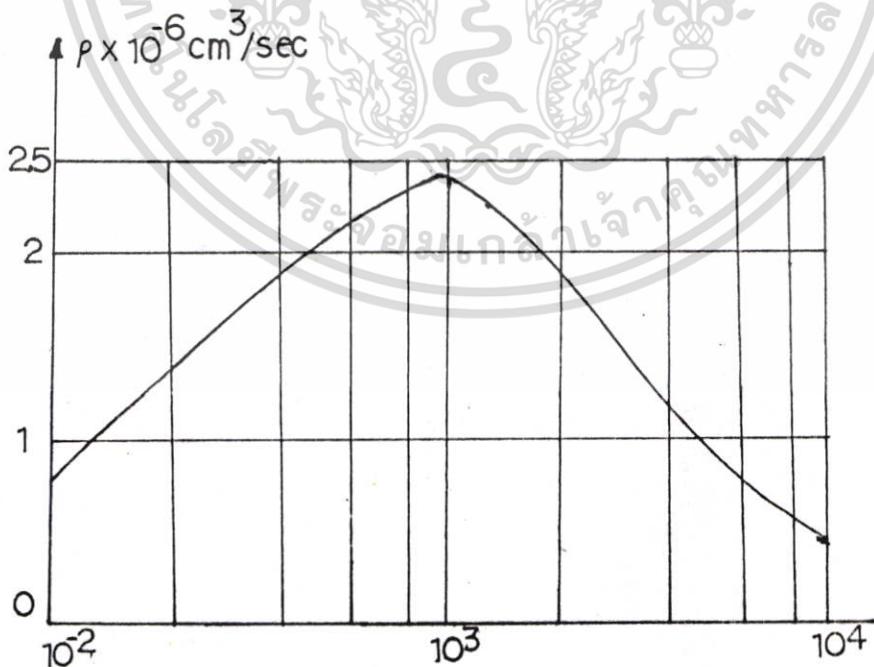
$$\ln \frac{N}{N_0} = -rt$$

$$N(t) = \frac{N_0}{1 + N_0 r t} \quad (3.9)$$

แสดงว่าความหนาแน่นของอนุภาคจะลดลงเป็นไฮเพอร์โบลิกกับเวลา
สัมพันธ์กับการรวมตัวใหม่ r อาจเขียนได้ว่า

$$r = \frac{1}{t} \left(\frac{1}{N} - \frac{1}{N_0} \right) \quad (3.10)$$

และขึ้นอยู่กับความดันของก๊าซ ดังเห็นกราฟแสดงที่รูป 3.5



รูปที่ 3.5 สัมประสิทธิ์การรวมตัวใหม่ของไอออนในอากาศที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การรวมตัวกันใหม่ของไอออนจะทำให้จำนวนลดลงเหลือครึ่งหนึ่งในเวลา t_n คือ

$$t_n = 1/N_0 \mu$$

ตัวอย่างเช่น μ ของอากาศ = 2×10^{-6} cm³/sec และ $N_0 = 1000$ Ion/cm³ จะได้เวลาที่จำนวนลดลงเหลือครึ่งหนึ่งเป็น

$$t_n = 1/10^3 \times 2 \times 10^{-6} = 500 \text{ sec}$$

ถ้าไม่มีการปล่อยไอออนเพิ่มเข้าไป จำนวนไอออนจะลดลงจาก 1000 เหลือเพียง 500 ในเวลา 500 sec

3.3.3 การแพร่กระจาย (diffusion)

ปกติเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้า การเคลื่อนที่ของอนุภาคจะเป็นไปอย่างไม่มีระเบียบ เคลื่อนที่ไปตามขบวนการมอลด์วอล์ก กล่าวคือจะไม่มีทิศทางแน่นอน แต่จะมีการแพร่กระจาย ทั้งนี้เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของอนุภาคในปริมาตรของก๊าซ เช่น อุณหภูมิต่างกัน กระแสการเคลื่อนที่ของก๊าซที่มีความเร็วต่างกัน เป็นต้น ความแตกต่างของความหนาแน่นของอนุภาคประจุในก๊าซ จะทำให้เกิดการปรับตัวกระจายสม่ำเสมอเป็นไปตามกฎการแพร่กระจายของก๊าซ ความหนาแน่นของไอออนอยู่ในเทอมของสามมิติ คือ $N_1 = N_1(x, y, z)$ ดังนั้นจำนวน N_1 ที่แพร่กระจายออกไปจากปริมาตรต่อหน่วยเวลาเป็นไปตามสมการแพร่กระจาย คือ

$$\frac{dN_1}{dt} = D \left(\frac{\partial^2 N_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N_1}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 N_1}{\partial z^2} \right) \quad (3.11)$$

เมื่อ D คือ ค่าคงตัวการแพร่กระจาย (diffusion coefficient) หาได้คือ

$$D = \frac{2}{3} \bar{v} \lambda \quad \text{cm}^2/\text{sec} \quad (3.12)$$

เอกสารนั้นแสดงว่าค่าคงตัวการแพร่กระจาย D นั้นขึ้นอยู่กับความดันของก๊าซ ความยาวคลื่นเฉลี่ยของอนุภาค นั้นคือ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D = T^{3/2} / p/m \quad (3.12.1)$$

ดังนั้นอิเล็กตรอนจึงมีมวลน้อยกว่าไอออนจะมีการแพร่กระจายได้มากกว่าไอออน

3.3.4 การเคลื่อนที่ของอนุภาค

อนุภาคประจุเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบ (จากพลังงานความร้อน) ถ้าไม่มีสนามไฟฟ้า เมื่อมีสนามไฟฟ้า E จะทำให้เกิดแรงกระทำบนอนุภาคประจุ คือ $Q \cdot E$ อนุภาคประจุเหล่านั้นจะเคลื่อนที่อย่างมีระเบียบ เกิดการเคลื่อนที่ของประจุคือ มีกระแสไหลนั่นเอง ความหนาแน่นของกระแสคือ

$$J = |N^+ \cdot Q^+ \cdot v^+| + |N^- \cdot Q^- \cdot v^-| \quad (2.13)$$

เมื่อ N^+ และ N^- คือ อนุภาคประจุบวกและลบตามลำดับ
 Q^+ และ Q^- คือ ประจุของอนุภาค
 v^+ และ v^- คือ ความเร็วครีพ (drift velocity)

สนามไฟฟ้าและความเร็วเคลื่อนที่ที่ผลผลิตจำกัด 2 ประการ คือ
 1) ในสุญญากาศสูง อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ด้วยพลังงานที่ได้รับ คือ

$$v = \sqrt{[2 \cdot e \cdot u / m]} = f(u) = \sqrt{E}$$

2) ในก๊าซอัด ในก๊าซอัดที่มีความหนาแน่น ความเร็วครีพจะมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับความเร็วเนื่องจากความร้อน สภาพการเคลื่อนที่ของอนุภาคพิจารณาจากการชนกัน ความเร็วของการเคลื่อนที่ของอนุภาคเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเคลียดสนามไฟฟ้า

$$v = b \cdot E \quad (3.14)$$

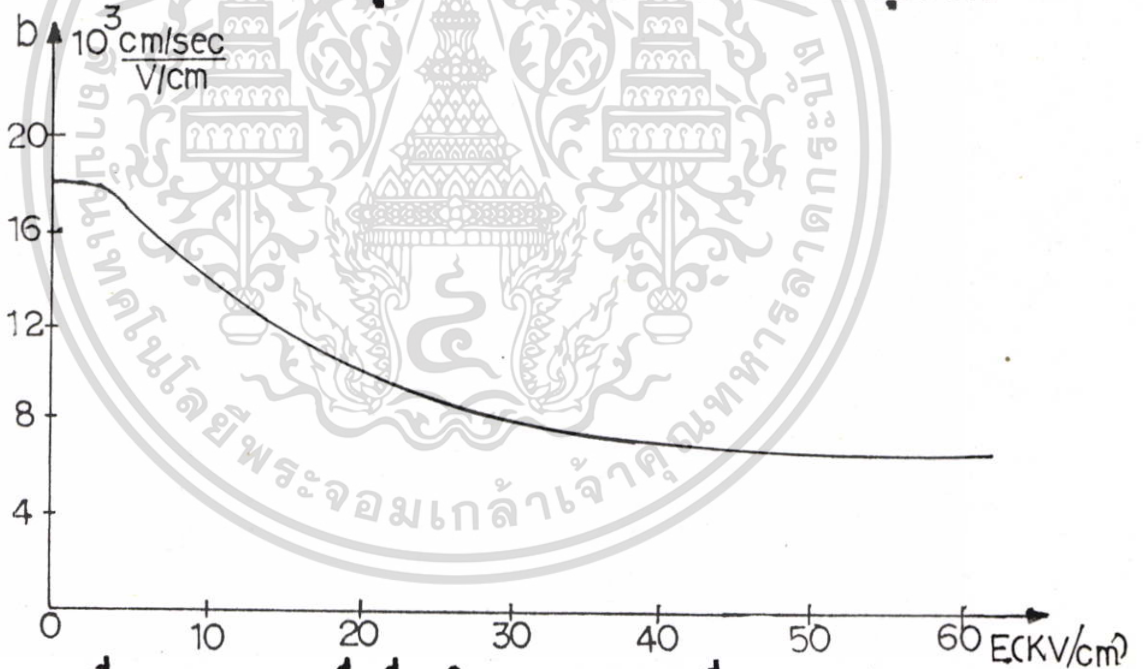
เมื่อ b คือ สภาพการเคลื่อนที่ (mobility) ของอนุภาค

สภาพการเคลื่อนที่ของไอออนของก๊าซส่วนใหญ่ จะมีค่าคงที่ที่ความเคลียดสนามไฟฟ้าต่ำ ๆ (เช่น ที่บรรยากาศความเคลียดสนามไฟฟ้าถึงหลาย kV/cm) ที่ความเคลียดสนามไฟฟ้าสูงๆ ค่าสภาพการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะขึ้นอยู่กับความเคลียดสนามไฟฟ้าเล็กน้อย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของ

ตารางที่ 3.2 สภาพการเคลื่อนของไอออนบวก(b^+) และไอออนลบ (b^-) ของก๊าซ
ต่างๆ ที่ 1 bar 20° c และ $E = 1kV/cm$.

ก๊าซ	b^+ (cm ² /sec)	b^- (cm ² /sec)
H ₂	6.7	7.9
N ₂	1.6	1.6
O ₂	1.4	1.8
CO ₂	1.1	1.3
He	5.1	6.3

สภาพการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนขึ้นอยู่อย่างมากกับความเค็ล็ดสนามไฟฟ้า ดังในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 สภาพการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในโตรเจนที่ 1 bar 20° c

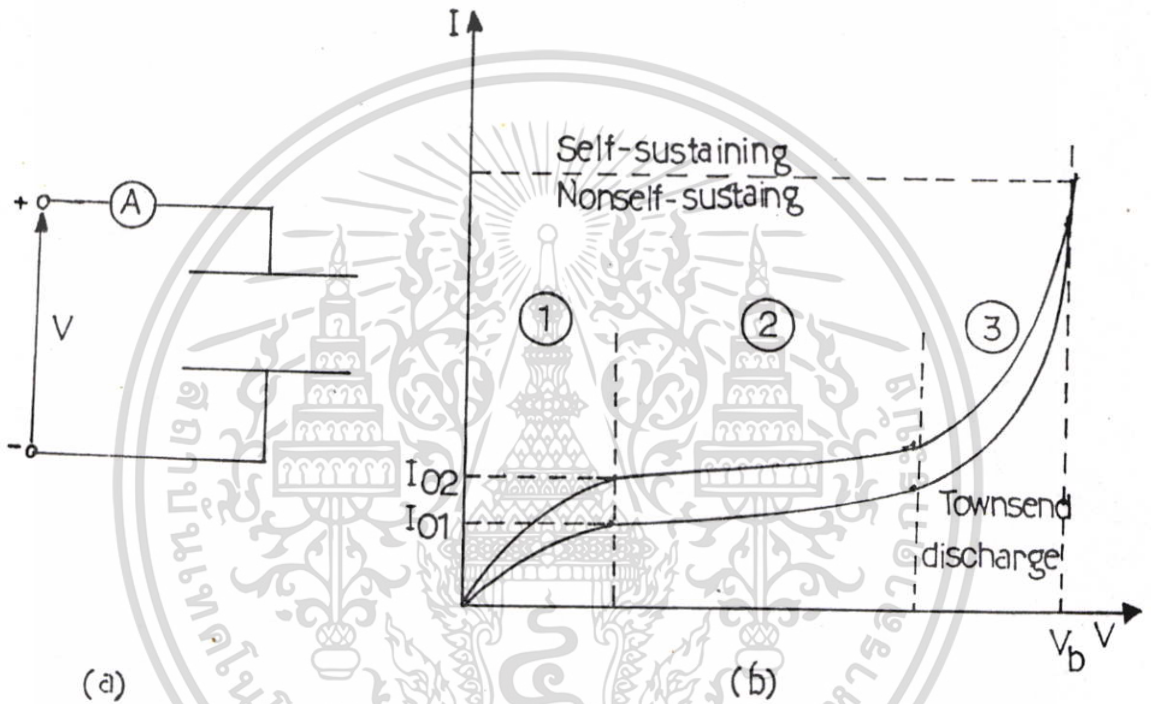
3.3.5 ลักษณะกราฟของกระแสในฟังก์ชันของแรงดัน

สภาพการนำไฟฟ้าของก๊าซแต่ละชนิดอาจต่างกัน โดยเปรียบเทียบกันด้วยลักษณะกราฟของกระแสแรงดัน อากาศประกอบด้วย N₂ 75 % และ O₂ 21 % ก๊าซเฉื่อย (Ar, N₂, He) 1 % และ CO₂, SO₂, H₂O และอื่น ๆ เนื่องจากในบรรยากาศมีรังสีแม่เหล็กจากฟ้าในระดับนสูง และเนื่องจากมีรังสีจากสสารกัมมันตภาพรังสี จึงมีอนุภาคประจุอยู่เสมอ นั้นหมายถึงว่าอากาศมีสภาพนำไฟ

ฟ้าค่าจำกัดโดยปกติสภาพบรรยากาศอากาศจะมีความต้านทานจำเพาะประมาณ 4×10^{15} Ohm-cm การคำนวณค่า
ไม่ว่าจะใดก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้านทานจำเพาะของทองแดงเท่ากับ 1.6×10^{-6} Ohm-cm และกราฟมีความต้านทานจำเพาะราว 2.2×10^{-3} Ohm-cm

ด้วยเหตุที่อากาศมีสภาพนำไฟฟ้าอยู่บ้าง ฉะนั้นเมื่อป้อนแรงดันเข้าไประหว่างแผ่นระนาบของคาปาซิเตอร์มีอากาศเป็นฉนวนดังในรูปที่ 3.7a) ก็มีกระแสไหลดังในรูป b) ซึ่งเป็นช่วง I ของรูป 3.1



รูปที่ 3.7 a) อิเล็กโตรดแผ่นระนาบคาปาซิเตอร์วางในอากาศ
b) ลักษณะกราฟกระแส-แรงดัน

ในรูป 3.7 b) ที่แรงดันต่ำ ความเค้นสนามไฟฟ้า E ต่ำๆ จะมีเพียงบางส่วนที่เกิดไอออนในเส้นตามธรรมชาติ เกิดอิเล็กตรอนอิสระและไอออนวิ่งเข้าหาอิเล็กโตรด โดยที่อิเล็กตรอนวิ่งเข้าหาอะโนดและไอออนบวกวิ่งเข้าหาแคโทด การเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุเช่นนี้จึงมีกระแสไหลตามกฎของโอห์ม คือ กระแสเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเค้นสนามไฟฟ้าอยู่ในย่าน 1

ในย่าน 2 อนุภาคประจุอิสระมีอยู่ที่ผิวแคโทดหรือออกจากแคโทดจะวิ่งไปหาอะโนดหมดแม้จะเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้นแต่กระแสจะไม่เพิ่มตาม เพราะอิเล็กตรอนออกดิ่งไปหมดแล้ว

ที่ความดันบรรยากาศจะพบว่าความหนาแน่นของกระแสเริ่มคงตัว มีค่าประมาณ 10^{-10} A/cm²

เอที่ความเค้นสนามไฟฟ้า 10 kV/cm ถ้าเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้นไปอีก กระแสจะไม่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันเพิ่มขึ้นให้ความเร็วของอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นถึง 20 kV/cm กระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้ เพราะมีอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นจากการชนแตกตัวหรือไอออไนเซชัน (collision ionisation) นั่นคืออิเล็กตรอนวิ่งเข้าชนโมเลกุลเป็นกลาง เกิดอิเล็กตรอนอิสระ และ ไอออนบวกเพิ่มขึ้น มากมาย เป็นสภาพที่อิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นได้เอง (selfsustained) เกิดเป็นละวาลานซ์ (avalanche) ในย่าน 3

ความหนาแน่นของกระแสสัมพัทธ์ J_0 ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอขึ้นอยู่กับขนาดประจุ และระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด d คือ

โดยที่

$$J_0 = e \cdot J \cdot d \cdot c$$

$$J = \mu N^+ \cdot N^- \quad \text{cm}^{-3}/\text{sec}$$

ความเร็วของสนามไฟฟ้าที่ทำให้กระแสสัมพัทธ์ คือ E_0 อาจคำนวณได้จาก

$$E_0 = \frac{4.25d}{b^+ + b^-} \quad (3.15)$$



บทที่ 4

การไอออไนเซชัน

4.1 ไอออไนเซชัน (Ionization)

อะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซเมื่อได้รับพลังงานเพียงพอ จะทำให้อิเลคตรอนหลุดออกไปหนึ่ง อิเลคตรอน อะตอมหรือโมเลกุลนั้นจะมีประจุเป็นบวก เช่นนี้เรียกว่าเกิดไอออไนซ์ กระบวนการที่ชนกอิเลคตรอนออกจากอนุภาคของก๊าซและไอออนบวกเพิ่มขึ้น เรียกว่าไอออไนเซชัน หรือ การแตกตัวของอิเลคตรอนออกจากโมเลกุล ส่วนกระบวนการที่ทำให้อิเลคตรอนหลุดออกจากของแข็ง (solid) เรียกว่าการปล่อยอิเลคตรอน (electron emission) ในที่นี้ อิเลคตรอนจะหลุดออกจากอิเลคโตรด ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญอย่างหนึ่งที่ทำให้ก๊าซมีสภาพนำไฟฟ้าขึ้นมาได้ อาจกล่าวได้ว่าก๊าซจะมีสภาพนำไฟฟ้าได้เมื่อมีอนุภาคประจุอิสระจำนวนมาก ๆ โดยกระบวนการที่วิเศษเพิ่มขึ้นของอิเลคตรอนและไอออนในแก๊สเป็นแบบแบ่งออกเป็นสองกระบวนการคือ กระบวนการแตกตัวของอิเลคตรอนออกจากโมเลกุลของก๊าซ อันเกิดจากการชนของอนุภาคกับโมเลกุล (อิเลคตรอน, ไอออน, และโฟตรอนชนกับโมเลกุล) และกระบวนการปล่อยอิเลคตรอนออกจากผิวอิเลคโตรดเมื่อได้รับความเค้นหรือสนามไฟฟ้าสูงหรือได้รับพลังงานความร้อน รั้งมี หรือไอออนวิ่งมากระทบผิวของอิเลคโตรด

4.1.1 ไอออไนเซชันโดยการชน (Collision ionization)

เมื่ออนุภาคมีมวล m (อิเลคตรอน, ไอออน และอะตอมเป็นกลาง) เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v และชนกับอะตอมมีมวล M จะมีการถ่ายทอพลังงานจลน์ ถ้าไม่มีผลให้เกิดการตื่นเต้น (excitation) หรือไอออไนเซชัน เรียกการชนนั้นว่า ชนแบบยืดหยุ่น (elastic collision) แต่ถ้าชนแล้วอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซที่ถูกชนได้รับพลังงานจากอนุภาคที่มาชนเกิดการตื่นเต้นหรือไอออไนเซชันขึ้น เรียกการชนนี้ว่าชนแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic) นั้นหมายความว่าพลังงานจลน์ได้เปลี่ยนไปเป็นพลังงานศักย์ (potential energy) จึงอาจกล่าวอย่างทั่วไปได้ว่าเมื่อมีการเปลี่ยนจากพลังงานจลน์เป็นพลังงานศักย์หรือกลับกันเรียกการชนนั้นเป็นแบบไม่ยืดหยุ่น

อาศัยกฎของโมเมนตัมและอนุรักษ์พลังงานสามารถคำนวณพลังงาน และความเร็วของอนุภาคหลังการชนได้ ถ้าทราบเงื่อนไขก่อนการชนเกิดขึ้น ในรูป 3.1 แสดงถึงสองอนุภาคมีมวล m และ M ชนกันในแนวมุมใด ๆ และเวกเตอร์ความเร็วของอนุภาคก่อนชนเป็น v และ V ตามลำดับ เวกเตอร์ความเร็วแตกออกในแนวแกน x (แนวเชื่อมโองผ่านจุดศูนย์กลาง) และแกน y (ตั้งฉาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

v_1 เป็นความเร็วขึ้นสุดท้าย

ของมวล m_1 (ในแนวแกน x) เมื่อชนมวล M อยู่นิ่ง ($V=0$)

$$v_1 = \frac{(m-M)}{(m+M)} \cdot V$$

ไอออนไนเซชันเกิดจากอิเล็กตรอนวิ่งชนโมเลกุลหรืออะตอมของก๊าซ โดยที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้า E ในขณะที่วิ่งเข้าหาอะตอม พลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับจะเป็นพลังงานจลน์ (Kinetic energy) ถ้าพลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับจากสนามไฟฟ้านั้นมากกว่าพลังงานไอออนไนเซชัน (ionization energy) ของโมเลกุลของก๊าซเป็น W_1 ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซดังแสดงในตารางที่ 4.1 ก็จะเกิดไอออนไนเซชันขึ้น

สมมติว่าอิเล็กตรอนเริ่มต้นเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับศูนย์ในทิศทางของสนามไฟฟ้า $E(x)$ เป็นระยะทางเท่ากับระยะอิสระ λ จะได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้า

$$W = e \int_0^{\lambda} E(x) dx = eU \tag{4.1}$$

จะเกิดไอออนไนซ์เมื่อ $W > W_1$ (K ดังที่)

นั่นคือ $=$

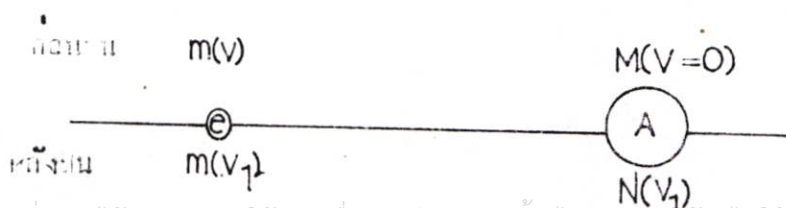
ถ้าความเค้นสนามไฟฟ้า K ดังที่

$$e \cdot E \cdot \lambda_i > W_1 = eU_1 \tag{4.2}$$

เมื่อ U_1 คือ แรงดันไอออนไนเซชัน v

eU_1 คือ พลังงานที่ทำให้เกิดการไอออนไนเซชัน eV

ถ้าพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้าไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดไอออนไนซ์ได้ ก็อาจจะทำให้โมเลกุลที่ถูกชน (แบบไม่ยึดหยุ่น) นั้นอยู่ในสภาวะตื่นเต้นกระตุ้น (excitation) ได้ พลังงานที่ทำให้โมเลกุลตื่นเต้นกระตุ้นได้พอดี เรียกว่าพลังงานตื่นเต้นกระตุ้น W_2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อ **รูป 4.1** อนุภาคชนกัน ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 พลังงานไอออไนเซชันและพลังงานดับกระตุกของโมเลกุล

ก๊าซ	W_0 (eV)	W_1 (eV)
H_2	7	15.4
H	10.16	13.59
N_2	6.3	15.6
N	10.33	14.54
O_2	7.9	12.5
O	9.15	13.61
H_2O	4.9	10.4
He	19.8	24.5
N_2O	—	11
NO	5.4	9.5
H_2O	7.6	12.59
CO_2	10	14.4
SF_6	—	19.3
ก๊าซเฉื่อย	—	10-24

ถ้าสมมติว่าไม่ยึดหยุ่น พลังงานสูงสุดที่อะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซที่อยู่เบื้องหน้าก่อนชนได้รับพลังงานหาได้จากกฎของโมเมนตัมและอนุรักษ์พลังงานดังนี้

$$mv + MV = mv_1 + MV_1$$

แต่มวล M อยู่นิ่ง จึงได้

$$mv = mv_1 + MV_1$$

จากกฎอนุรักษ์พลังงานที่กล่าวไว้ว่า พลังงานรวมก่อนและหลังการชนย่อมคงเดิม ฉะนั้นจะได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$1/2 mv^2 = 1/2 mv_1^2 + 1/2 Hv_1^2 + W_p$$

เมื่อ W_p คือ พลังงานศักย์ที่อนุภาค H (ที่อยู่นิ่ง) ได้รับ

จากความสัมพันธ์ $mv = mv_1 + Hv_1$ จะจัด v_1 ได้

$$1/2 mv^2 = 1/2 mv_1^2 + 1/2 m^2/H(v-v_1)^2 + W_p \quad (4.3)$$

พลังงานศักย์ W_p จะมีค่าสูงสุด ถ้าสมมติว่าพลังงานจลน์ของอนุภาคที่วิ่งมาชนมีค่าคงที่ จึงคิดเพื่อ เรนสีเอกเทียบกับ v_1 แล้วให้เท่ากับศูนย์จะได้ $W_{p=mx}$ คือ

$$\frac{dW_p}{dv_1} = m(mv - (m+H)v_1) = 0$$

$$dv_1 = H$$

$$mv = (m+H)v_1$$

$$v_1/v = m/m+H$$

ถ้ามวล m เป็นมวลของอิเล็กตรอน ซึ่งน้อยกว่ามวลของโมเลกุลมาก $m \ll H$ ฉะนั้น

$$v_1 = (m/H)v$$

นั่นคือความเร็ว v_1 มีค่าน้อยเป็นเพียงส่วนหนึ่งของความเร็วต้นของอนุภาควิ่งมาชน แสดงว่าอนุภาควิ่งมาชนในทันทีคืออิเล็กตรอนจะให้พลังงานจนเกือบทั้งหมดให้กับโมเลกุล หลังจากชนแล้วความเร็วของทั้งสองอนุภาคเท่าๆ กัน คือ $v_1 = v_2$ (เพื่อให้เป็นไปตามกฎอนุรักษ์)

พลังงานถ่ายเทสูงสุดได้จากการแทนค่า v_1 อนุภาคที่อยู่นิ่งจะได้รับพลังงานศักย์สูงสุด คือ

$$W_p(\text{max}) = (H/m+H)mv^2/2 \quad (4.4)$$

ฉะนั้นอิเล็กตรอนวิ่งชนโมเลกุลจะถ่ายเทพลังงานจลน์ให้กับโมเลกุลทั้งหมด เมื่อความเร็วหลังชนของอิเล็กตรอน $v_1 = 0$ ส่วนไอออนหนัก ($m=H$) จะมีการถ่ายเทพลังงานจลน์ครึ่งหนึ่งเป็นพลังงานศักย์ และถ่ายเทพลังงานจลน์เพียง 25 % ($v_1=1/2v$) นั่นคือจะมีการถ่ายเทพลังงานเพียง 75 % ของพลังงานเริ่มต้น

การเกิดไอออนในเซชันโดยอิเล็กตรอนวิ่งชน อิเล็กตรอนจะต้องมีพลังงานเท่ากันหรือมากกว่าพลังงานไอออนในเซชันของโมเลกุลหรืออะตอมเป็นกลาง นั่นคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$1/2 mv^2 \geq W_i$$

4.1.1.1 สัมประสิทธิ์การไอออไนเซชันในก๊าซ

ในระหว่างอนุภาคที่ประจุเคลื่อนที่ไประหว่างอิเล็กโตรด อาจชนและเกิดไอออไนเซชันได้หลายครั้งหลายหนก่อนที่จะชนอิเล็กโตรด

ทาวน์เซนต์ (Townsend) ได้ชี้ให้เห็นว่าจำนวนการชนเกิดไอออไนเซชันต่อหนึ่งหน่วยระยะที่อนุภาคประจุเคลื่อนที่ไปนั้นกำหนดด้วยแฟคเตอร์ที่เรียกว่า สัมประสิทธิ์การเกิดไอออไนเซชันของทาวน์เซนต์ โดยอนุภาคประจุวิ่งชนโมเลกุลในแก๊สแบ่งเป็นสัมประสิทธิ์ α β โดยที่ α เป็นสัมประสิทธิ์การชนแตกตัวด้วยอิเล็กตรอนวิ่งชนโมเลกุล ส่วน β เป็นสัมประสิทธิ์การชนของไอออน สัมประสิทธิ์การชนแตกตัวทั้งสองมีค่าจำกัดความดังนี้

α : (สัมประสิทธิ์การชนไอออไนเซชันที่หนึ่งของทาวน์เซนต์) เป็น ค่าเฉลี่ยของการชนไอออไนเซชันของอิเล็กตรอน 1 ตัวที่เคลื่อนที่ไปในแก๊สเป็นระยะ 1 เซนติเมตร มีหน่วยเป็น cm^{-1}

β : คือ จำนวนการชนของไอออนบวกกับโมเลกุลเป็นกลาง ทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระและไอออนบวกต่อหนึ่งหน่วยระยะทางในแก๊สตามแนวสนามไฟฟ้า

แต่เนื่องจากไอออนมีมวลมาก ฉะนั้นการได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าจึงน้อย และการถ่ายทอดพลังงานเมื่อชนกันน้อยด้วย นั่นคือ $\alpha \ll \beta$ ฉะนั้นการชนแตกตัวในแก๊สจึงมักเนื่องมาจากกระบวนการ α

ค่าสัมประสิทธิ์การชนไอออไนเซชัน α ขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นของก๊าซซึ่งมีความสัมพันธ์

$$\alpha/p = f(E/p) \quad (4.5)$$

ความสัมพันธ์สมการ (4.5) สำหรับแก๊สต่างๆ มีลักษณะคล้ายๆ กัน ซึ่งอาจเขียนได้ด้วยสมการ

$$\alpha/p = Ae^{-B/(E/p)} \quad (4.6)$$

โดยที่ $B = A \cdot V_1$ และ $A = A(T)$

และ B เป็นค่าคงตัวขึ้นอยู่กับชนิดของแก๊ส และฟังก์ชันดังกล่าวใช้ได้ในช่วงจำกัดของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า E/p ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่าคงตัว A และ B ของก๊าซต่างๆ

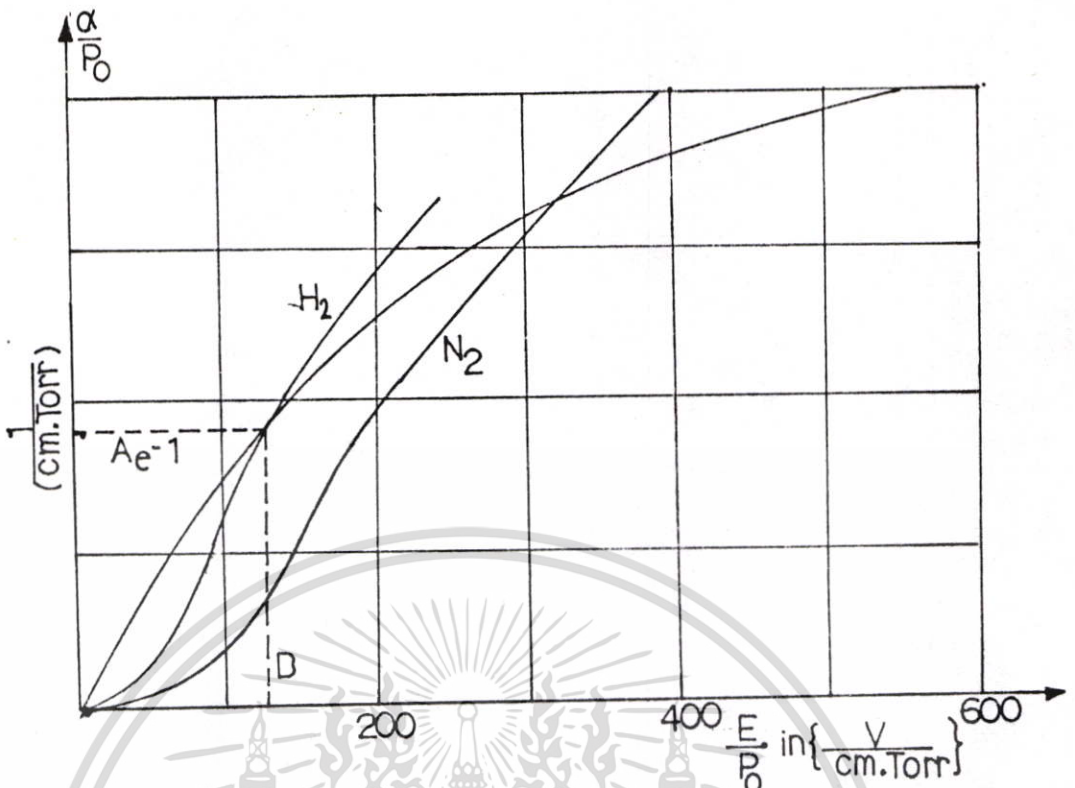
ก๊าซ	A (cm-torr) ⁻¹	B (cm-Torr) ⁻¹	ย่านที่ใช้ได้ E/p (v/(cm-Torr))
Air	15	365	100-800
N ₂	12	342	100-600
H ₂	5.1	138.8	20-600
He	8	34	20-150
A	14	180	100-400
Kr	17	240	100-1000
Xe	28	350	200-800
CO ₂	20	466	500-1000
H ₂ O	12.9	289	150-1000

ค่าของ $\alpha/p = f(E/p)$ เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับการเพิ่มทวีคูณของอนุภาคประจุ และนำไปสู่การเบรคดาว์นในก๊าซ ตัวอย่างความสัมพันธ์ของ $\alpha/p = f(E/p)$ ของ N₂ และ H₂ ดังกราฟในรูปที่ 4.2 ซึ่งสังเกตจากเส้นกราฟในรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่า α/p นั้นมีได้เริ่มต้นที่ก้นศูนย์ หากแต่เริ่มต้นที่ค่า E/p ค่าหนึ่งซึ่งแสดงถึงค่าความคงทนต่อตรงต้นโซ่ไฟฟ้า E_b มีค่าต่ำสุด เกิดในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอที่เขตโตนตรงห่างกันมากๆ ทั้งนี้เนื่องจากที่ความเร็วต้นสนามไฟฟ้าต่ำๆ และเส้นทางเดินของอิเล็กตรอนมีระยะไกลจึงมีโอกาสที่โมเลกุลของก๊าซจับอิเล็กตรอนไว้ได้กลายเป็นไอออนลบ เคลื่อนที่ได้ช้าไอออนในเซชันเกิดได้ยาก เป็นการหน่วงการเกิดเบรคดาว์น ปรากฏการณ์เช่นนี้จะเห็นได้ชัดในก๊าซชนิดประจุลบ (Electronegative gas)

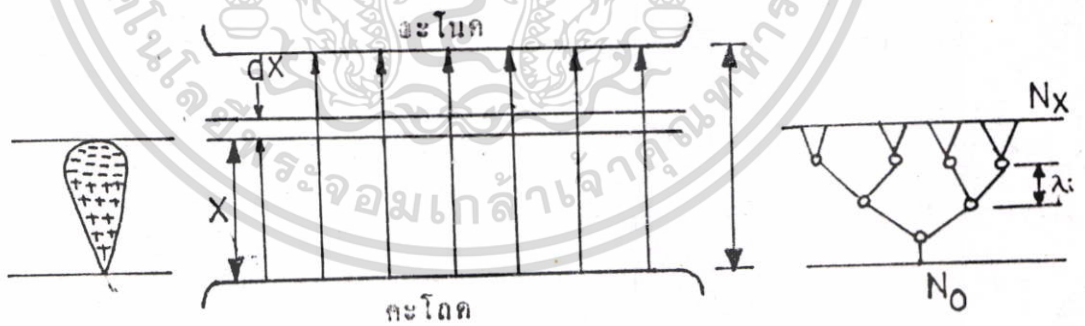
4.1.1.2 กระบวนการของอิเล็กตรอน (electron avalanche)

พิจารณาจากสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอที่ได้จากอิเล็กโตรดแผ่นระนาบวางขนานกันดังในรูป 4.3 เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้า E จะถูกเร่งให้วิ่งไปหาอะโนด พลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ ถ้าสูงมากพอจะทำให้เกิดไอออนในเซชันเมื่ออิเล็กตรอนวิ่งชนโมเลกุลของก๊าซ นั่นคือทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากโมเลกุลเป็นกลาง ที่เหลือก็เป็นไอออนบวก อิเล็กตรอนตัวใหม่ก็จะวิ่งไปชนโมเลกุลเกิดอิเล็กตรอนตัวใหม่เพิ่มขึ้นต่อไปจนกระทั่งเป็นเอกสารนี้ เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

กระบวนการของอิเล็กตรอนนั้น ไม่มีการฉีกหักสิ่งใดที่มันมีที่ที่แสดงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของ $\alpha/p = f(E/p_0)$ ของ H_2 และ N_2 (Nasser)
 p_0 เป็นความดันที่ $c p_0 = p \cdot T_0 / T$ และ $T_0 = 273 \text{ }^\circ K$



รูปที่ 4.3 กระจายความหนาแน่นของอิเล็กตรอน
 ในช่องแคบ dx ห่างจากแคโทดเป็นระยะ x มีจำนวนอิเล็กตรอนเป็น

$$dN_x = \alpha \cdot N_x \cdot dx$$

ที่ $x = 0$ จำนวนอิเล็กตรอนเริ่มต้นเป็น N_0

ที่ระยะ x จำนวนอิเล็กตรอนเป็น N_x

เอกสารนี้เป็นแค่เอกสารตัวอย่าง ห้ามทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต และห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ระยะ x จะมีอิเล็กตรอนในระนาบด้านข้างเป็น N_x คือ

$$N_x = N_0 e^{-\alpha x} \quad (4.7)$$

จำนวนอิเล็กตรอนและโฮลคอนบวักจะเพิ่มขึ้นเป็นเลขชี้ไปเนนเงี้อล อิเล็กตรอนที่วิ่งไปถึงอะโนด จะมีจำนวน

$$N_x = N_0 e^{-\alpha d} \quad (4.8)$$

เมื่อคูณด้วยค่าประจุของอิเล็กตรอนจะได้กระแส

$$I = I_0 e^{-\alpha d} \quad (4.9)$$

I_0 คือ กระแสเริ่มต้นเป็นผลมาจากอิเล็กตรอนเริ่มต้นที่หลุดออกมาจากแคโทด เรียกว่า กระแสโฟโต(photo current) ในบางกรณีโดยเฉพาะที่ความดันก๊าซต่ำ อิเล็กตรอนเริ่มต้น (primary electron) ไม่สามารถจะไหลลงได้ในบริเวณใกล้ๆ แคโทดได้ เพราะอิเล็กตรอน เหล่านั้นยังมีพลังงานจลน์ต่ำอยู่ คือถึงน้อยกว่า W_1 ในบริเวณดังกล่าวอะโนดออกมาจนถึงระยะ ที่ไม่มีการไหลลงให้หาได้จากความสัมพันธ์

$$= V_1/E$$

เมื่อวัดกระแส I และ I_0 ที่ระยะระหว่างอิเล็กโทรด d มีค่าต่างๆ กัน จะสามารถหา ค่าสัมประสิทธิ์การชนไอออนในเซชัน α ได้ เมื่อเขียนกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน I/I_0 บนสเกลลอจกับค่าระยะแยก d สเกลเชิงเส้นตรงจะให้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง จากสมการ(4.9)คือ $I = I_0 e^{-\alpha d}$ ที่ระยะแยก $d = d_1$ จะได้

$$\alpha_1 = 1/d_1 (\ln (I_1/I_0))$$

และที่ $d = d_2$ จะได้

$$\alpha_2 = 1/d_2 (\ln (I_2/I_0))$$

เมื่อรักษาให้อัตราส่วน E/p มีค่าคงตัว

$$\alpha_1 = \alpha_2$$

และกระแสเริ่มต้น I_0 อาจคำนวณได้จาก

$$\ln I_0 = (d_2 \ln I_1 - d_1 \ln I_2) / d_2 - d_1$$

กระแส I_0 มักได้จากการฉายแสง UV บนแคโทด จึงมักเรียกว่ากระแสโฟโต การให้ความ

ร้อนอาจทำได้แต่ไม่เหมาะ เพราะจะให้อิเล็กตรอนเริ่มต้นมีความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 โฟโตไอออไนเซชัน

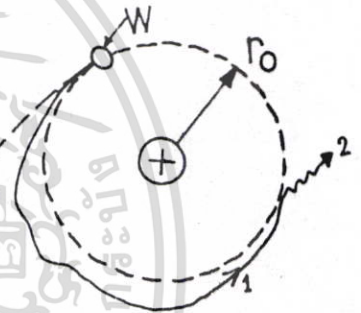
ในรูปที่ 4.4 แสดงถึงอะตอมไฮโดรเจน มีอิเล็กตรอนหลุดออกมาจากผิวนิวเคลียสซึ่งมีประจุบวก เมื่อป้อนพลังงานให้อะตอมมากขึ้น จะทำให้อิเล็กตรอนแยกตัวห่างออกไปมากขึ้น ทำให้วงโคจรรัศมี r_0 โค้งขึ้น อย่างไรก็ตามอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่อยู่ในช่วงโคจรวงหนึ่ง ในลักษณะเช่นนี้เรียกว่าอะตอมอยู่ในสภาวะกระตุ้น(excitation)พลังงานจะคงสภาพอยู่ในช่วงเวลาสั้นเพียง 10^{-8} ถึง 10^{-7} วินาทีเท่านั้น แล้วอะตอมก็จะกลับสู่สภาวะตันปกติ และขณะเดียวกันก็ปล่อยพลังงานที่ได้รับมาในตอนแรกออกไปในรูปของโฟตอน(photon) ถ้าวิ่งไปกระทบเข้ากับอะตอมหรือโมเลกุลเป็นกลาง อาจทำให้เกิดสภาวะกระตุ้นหรือไอออไนเซชัน

การเกิดไอออไนเซชันเนื่องจากโมเลกุลรับพลังงานรังสีโฟตอน เรียกว่าโฟตอนไอออไนเซชัน (photon ionization) พลังงานโฟตอนที่ทำให้อิเล็กตรอนของก๊าซเกิดไอออไนเซชันได้ คือ

$$h\nu \leq W_e \text{ หรือ } W_1$$

เมื่อ h = ค่าคงตัวของ plank
 $= 6.6257 \times 10^{-34}$ joule-sec
 ν = ความถี่ของรังสี
 จำเป็นต้องใช้แสงที่มีระยะอิสระ นั่นคือ

$$\lambda \leq c_0 \cdot h / W_e \text{ หรือ } \lambda \leq c_0 \cdot h / W_1$$



รูปที่ 4.4 อะตอมไฮโดรเจน

4.1.3 เทอร์มัลไอออไนเซชัน (thermal ionization)

เทอร์มัลไอออไนเซชันเป็นการไอออไนซ์อะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซด้วยพลังงานความร้อนในก๊าซที่อุณหภูมิสูงๆ ไอออไนเซชันอาจเกิดขึ้นได้เนื่องจาก

- 1) ไอออไนเซชันโดยการชนกันเองของโมเลกุลหรืออะตอม เนื่องจากอุณหภูมิสูงทำให้ความเร็วสูงจึงได้พลังงานจลน์สูง ทำให้เกิดไอออไนเซชันได้
- 2) ก๊าซร้อนทำให้มีโฟตอนปล่อยออกมา และเกิดโฟตอนไอออไนเซชันขึ้นได้
- 3) การชนกันของอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูง 1) 2)

ความความเร็วกระจายของแมกซ์เวลล์ อะตอมมีความเร็วต่างๆกัน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของก๊าซที่อุณหภูมิห้องการเกิดไอออไนเซชันด้วยพลังงานจลน์ที่ได้จากการเคลื่อนไหวของโมเลกุลอากาศเป็นไปได้ยาก จากการคำนวณจะพบว่าที่บรรยากาศบนนั้นโลกเทอร์มัลไอออไนเซชันจากการชนเกิดขึ้นที่อุณหภูมิห้องได้สักครั้งทุกๆ 10^{500} ปี ฉะนั้นส่วนใหญ่จากไอออไนเซชันแบบเทอร์มัลจะเป็น

เอกสารนี้ผลิตขึ้นเนื่องจากโฟตอนทำให้อิออไนเซชันเกิดที่อุณหภูมิสูงๆ หรือจากอิเล็กตรอนที่ชนโมเลกุลได้ Saha ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้แสดงการคำนวณหาที่ขึ้นการเกิดไอออนเซชันการชน ในเทอมของความดัน p และอุณหภูมิสัมบูรณ์ดังนี้

$$\frac{a^2}{1 - a^2} = \frac{2.4 \cdot 10^{-4}}{p} T^{2.5} e^{-W_1/kT}$$

เมื่อ T = อุณหภูมิสัมบูรณ์

p = ความดันเป็น Torr

W_1 = พลังงานไอออนเซชัน เป็น eV

k = ค่าคงตัวของโบลท์มันน์ เป็น eV/°K

และนิยาม a เป็นอัตราส่วนของจำนวนอนุภาคไอออนเซชัน N_1 ต่อจำนวนอนุภาคทั้งหมด N นั่นคือ

$$a = N_1/N$$

ที่อุณหภูมิค่า a มีค่าต่ำกว่า 1 เช่น ไอปรอทอุณหภูมิ 6300 °K และความดัน 760 Torr จากสมการของ saha จะได้

$$a = \frac{2.4 \cdot 10^{-4}}{p} T^{2.5} e^{-W_1/kT}$$

4.2 การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะ

การเกิดไอออนเซชันโดยการที่อิเล็กตรอนวิ่งชนโมเลกุลหรืออะตอมของก๊าซ ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากโมเลกุล ซึ่งจัดเป็นกระบวนการเบี่ยงเบนหรือกระบวนการ α นับเป็นกระบวนการที่สำคัญในการสร้างจำนวนอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มมากขึ้น แต่ตามคำฟังกระบวนการเบี่ยงเบนนั้นไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดเบรคดาวน์ได้หากแต่มีกระบวนการอื่นเสริมจำนวนอิเล็กตรอนรวมอยู่ด้วยการปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะ (electron emission from metallic surface) ถือได้ว่าเป็นกระบวนการที่สำคัญที่ช่วยเพิ่มทวีคูณจำนวนอิเล็กตรอนอิสระนำไปสู่การเกิดเบรคดาวน์ได้

กลไกการปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะนั้นมีด้วยกันหลายวิธี การจะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาได้นั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และสนามไฟฟ้าที่ผิวของโลหะ ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดแต่ละกลวิธีดังต่อไปนี้

4.2.1 การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะโดยการชนของไอออนบวก

อิเล็กตรอนจะหลุดกระจายออกมาจากโลหะได้จะต้องได้รับพลังงานอย่างน้อยเท่ากับ $W_1 =$

เอกสารนี้เป็นเอกสารฟังกชัน) ของโลหะที่ใช้ทำแคโทดนั้นก็พลังงานดังกล่าวได้จำนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) ไอออนบวกอันเกิดจากกระบวนการเบี่ยงเบน ที่อิเล็กตรอนวิ่งชนโมเลกุลหรืออะตอมทำให้เกิดอิเล็กตรอนหลุดออกมา หรือไอออนบวกวิ่งเข้าหาอะตอม โดยที่ไอออนบวกมีมวลมาก (ประมาณ 1836 เท่าของมวลอิเล็กตรอน) จึงเคลื่อนที่ได้ช้า พลังงานจลน์ที่ไอออนบวกได้จากสนามไฟฟ้าจึงมีน้อย ไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดไอออนในเส้นโคจรการชนของไอออนบวกกับโมเลกุลของก๊าซได้ แต่ไอออนบวกมีพลังงานศักย์พอที่จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดกระจาดออกมาจากผิวอะตอมได้เมื่อไอออนบวกวิ่งกระทบ เงามันจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนหลุดออกมาได้ดังกล่าว พลังงานที่ไอออนบวกมีอยู่นั้นจะน้อยกว่า W_u คือ

$$\frac{1}{2} m v^2 < W_u = eU_u$$

เมื่อ W_u = เวก์ตฟังก์ชันของโลหะอะตอม

2) โมเลกุลที่อยู่ในสภาวะกระตุ้นในอะนาลานซ์ปล่อยพลังงานโฟตอนออกมาในขณะที่อะตอมคืนเข้าสู่สถานะภาพพื้นฐาน (ground state) โดยอิเล็กตรอนกลับเข้าสู่วงโคจรเดิม พลังงานโฟตอนตกลงบนอะตอมทำให้เกิดอิเล็กตรอนหลุดออกมาจากอะตอม และอาจทำให้เกิดอะนาลานซ์ใหม่ได้ กลวิธีการปล่อยอิเล็กตรอนนี้เรียกว่าการปล่อยอิเล็กตรอนด้วยพลังงานโฟตอน (photo emission)

3) โมเลกุลที่อยู่ในสถานะภาพเมตาเสถียร (metastable) อาจพุ่งกระຈ่ากดับเข้าไปหาอะตอมแล้วทำให้เกิดอิเล็กตรอนหลุดออกมาได้เมื่อโมเลกุลนั้นวิ่งไปกระทบอะตอม อิเล็กตรอนที่เกิดใหม่ตามกลวิธีทั้งสามนี้จัดเป็นผลสืบเนื่อง จึงเรียกรวมกระบวนการเหล่านี้ว่าเป็นกระบวนการเบี่ยงเบน (secondary process)

กระบวนการทั้งสามวิธีนี้กำหนดด้วยสัมประสิทธิ์ γ ซึ่งนิยามได้ว่าเป็นจำนวนอิเล็กตรอนเฉลี่ยที่ได้จากกระบวนการเบี่ยงเบนที่เกิดขึ้นที่อะตอมต่อจำนวนอิเล็กตรอนหนึ่งตัวที่เกิดขึ้นในแก๊พจากกระบวนการชนเบี่ยงเบน (primary collisional process) นั่นคือการชนไอออนในสภาวะหนึ่งครั้ง

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_{ph} + \gamma_m$$

โดยที่ γ_1 เป็นผลจากการชนของไอออนบวก

γ_{ph} เป็นผลจากโฟตอน

γ_m เป็นผลจากเมตาเสถียร

γ นี้เรียกว่า สัมประสิทธิ์ไอออนในเส้นที่สองของทาว์นเซนต์ (Townsend ionization coefficient)

4.2.2 การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากโลหะโดยแสง

อิเล็กตรอนอาจหลุดหรือกระจายออกมาจากผิวโลหะได้เมื่อได้รับพลังงานมากพอ ในปี 1887 ไฮน์ริช เฮอร์ทซ์ (Heinrich hertz) ได้ทดลองเกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพบว่าแรงดันสปาร์ตระหว่างอิเล็กโตรดจะมีค่าต่ำลงเมื่อมีแสงจากการสปาร์ตที่ถี่ขึ้นยิ่งมากกระทบบนผิวอิเล็กโตรด และได้แสดงให้เห็นว่ารังสีอัลตราไวโอเลตให้ผลในลักษณะนี้ อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากผิวโลหะเมื่อได้รับโฟตอนอาจมีพลังงานเหลือเฟือ และเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์วิ่งเข้าหาอะตอมได้ดังนั้นก็ไม่มีสนามไฟฟ้าก็ตาม ความเร็วนี้มีค่า

$$\frac{1}{2} m v^2 = h\nu - W_0$$

เมื่อ W_0 คือ เวกอร์คั้งกั้นหรืองานที่ใช้แยกอิเล็กตรอนหนึ่งตัวโดยโฟตอนที่มีพลังงาน $h\nu$ ความยาวคลื่นของแสงที่ใช้ในการปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะจะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขคือ

$$\lambda \cdot W_0 \leq h \cdot c$$

$$\text{หรือ} \quad \lambda \cdot W_0 \leq 1.245 \cdot 10^{-6} \text{ Vm} \quad (4.10)$$

โดยที่ h = ความคงตัวของ planck = $4.15 \cdot 10^{-15}$ eV-sec

c = ความเร็วแสง = $3 \cdot 10^8$ m/sec

ตัวอย่างเวกอร์คั้งกั้นของธาตุต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าเวรต์ฟังก์ชันของธาตุต่างๆเป็น eV เมื่อใช้พลังงานแสงเทียบกับ
เมื่อใช้พลังงานความร้อน

ธาตุ	เวรต์ฟังก์ชัน eV	
	ใช้พลังงานแสงไฟฟ้า	พลังงานความร้อน
Ag	4.74	3.08-3.58
Al	2.98-4.43	-
Au	3.9- 4.92	4.0 - 4.58
Ba	1.9-2.49	2.11
C	4.81	4.39
Ca	2.42-3.21	2.24
Cs	1.38-1.9	1.81
Cu	4.07-4.8	3.85-4.38
Fe	3.91-4.7	4.04-4.77
Ni	4.06-5.2	4.61-5.24
Ta	4.05-4.16	4.07-4.19
W	4.35-4.6	4.52

4.2.3 การปล่อยอิเล็กตรอนด้วยความร้อน

โดยทฤษฎีแล้วที่อุณหภูมิใดๆ บางอิเล็กตรอนที่อยู่แถบนำไฟฟ้า (conduction band) ของโลหะจะมีพลังงานมากพอที่จะเอาชนะหรือข้ามกำแพงศักย์ (potential barrier) ที่ผิวของโลหะไปได้ ที่อุณหภูมิห้องกระแสจากอิเล็กตรอนเหล่านี้จะมีค่าน้อยมากเกินไปที่จะนำมาใช้ประโยชน์ใดๆ แต่กระแสนี้จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของผิวโลหะ การหลุดออกมาของอิเล็กตรอนจากโลหะไปยังสุญญากาศโดยไม่มีแหล่งพลังงานใดๆ จากภายนอก เรียกว่า การปล่อยอิเล็กตรอนด้วยความร้อน (Thermionic emission) ซึ่งเป็นหลักการของสุญญากาศหลอดกระบอกเรย์

จากเทอร์โมไดนามิกส์ความหนาแน่นของกระแสอาจคำนวณได้จากสมการของ Richardson เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$J = AT^m e^{-e\phi/kT} \quad (4.11)$$

โดยที่ A เป็นค่าคงที่ทั่วไปคือ

$$A = (4\pi/h^3)mk^3e = 1$$

เมื่อ h คือค่าคงตัวของ planck

k คือค่าคงตัวของ Boltzmann

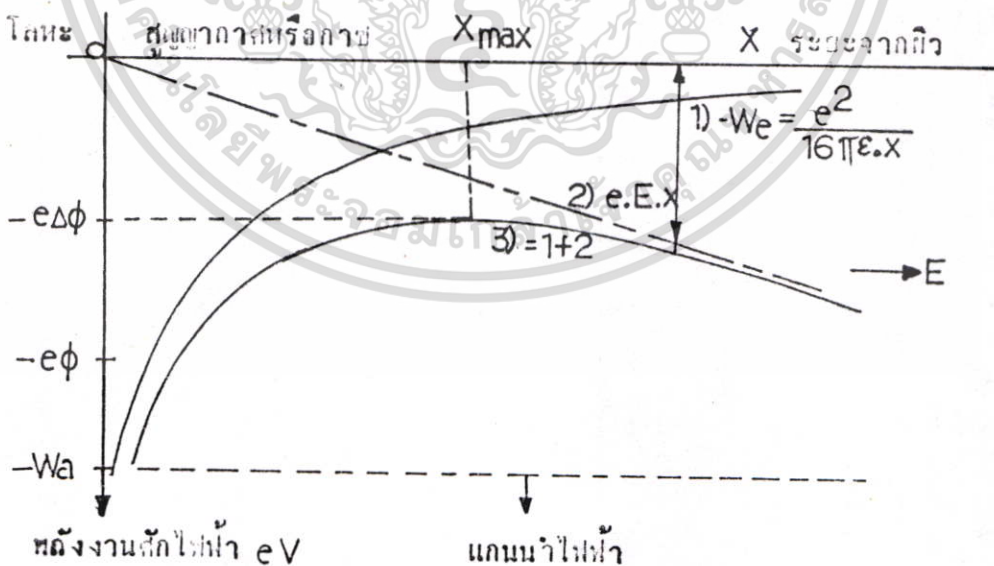
m, e เป็นมวลและประจุของอิเล็กตรอน

ฉะนั้นค่า $A = 120 \text{ A/cm}^2 \cdot \text{deg}^2$

4.2.4 การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากโลหะโดยสนามไฟฟ้า

ผลจากสนามไฟฟ้าที่ป้อนจากภายนอกเข้าไปจะทำให้อิเล็กตรอนหลุด หรือปล่อยออกมาจากผิวโลหะได้นั้นจะต้องมีพลังงานมากพอ นั่นคือสนามไฟฟ้าจะต้องมีมากกว่าค่าที่ต้องใช้สำหรับการรวมรวมหรือดึงอิเล็กตรอนที่ปล่อยออกมาด้วยพลังงานความร้อน (thermionic emission)

เมื่อพิจารณาถึงพลังงานของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ระหว่างโลหะกับสุญญากาศที่ปราศจากสนามไฟฟ้าภายนอก E อิเล็กตรอนไฟฟ้าจะเป็นศูนย์กลางที่ระเหิดจากผิวโลหะมาก ๆ ดังในรูปที่ 4.5 ลักษณะของเส้นกราฟอิเล็กตรอนไฟฟ้าสามารถคำนวณได้



รูปที่ 4.5 ค่าของศักย์ต่ำลงเนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอก

1) พลังงานเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้าภายนอก

2) พลังงานเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่ป้อน

3) พลังงานทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องขออนุญาตถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าคำนวณสนามไฟฟ้าของอิเล็กตรอนมีประจุ $-e$ ที่หลุดออกมาจากนิวโทรห์กับประจุ $+e$ ที่
 อยู่กึ่งกลางในเนื้อโลหะที่อยู่ห่างจากนิวโทรห์ $-x$ นั่นคือนิวโทรห์เป็นนิวตริกซ์ไฟฟ้าเท่า โดยอาศัยกฎ
 ของคูลอมป์จะได้แรงระหว่างอิเล็กตรอนเป็น

$$F(x) = \frac{-e^2}{4\pi\epsilon_0(2x)^2} = \frac{-e^2}{16\pi\epsilon_0 \cdot x^2} \quad (4.12)$$

เมื่อ $x \rightarrow \infty$ จะได้ $F = 0$ เรียกว่าอิเล็กตรอนอยู่ที่ตำแหน่งมีพลังงานศักย์เป็นศูนย์ $W_0 = 0$
 ที่ระยะ x จะมีพลังงานศักย์ไฟฟ้า

$$W_0 = \int_x^\infty F(x) dx = \frac{-e^2}{16\pi\epsilon_0 \cdot x} \quad (4.13)$$

ซึ่งจะได้เห็นกราฟเป็นไฮเพอร์โบลิก
 ผลของสนามไฟฟ้าคงตัว E ที่มีแนวตั้งฉากกับนิวโทรห์ จะได้รับพลังงานศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากสนาม
 ไฟฟ้านี้คือ

$$W_E = -eEx \quad (4.14)$$

จะมีกราฟเป็นเส้นตรง (เส้นที่ 2 ในรูป 4.5)
 จะได้พลังงานศักย์ไฟฟ้าทั้งหมดจากสองแรงนี้เป็น

นั่นคือ

$$W_1 = W_0 + W_E$$

$$W_1 = \frac{-e^2}{16\pi\epsilon_0 \cdot x} - eEx \quad (4.15)$$

ถ้า W_1 แสดงในกราฟเส้นที่ 3 ในรูปที่ 4.5 ซึ่งเป็นผลบวกของ $W_0 + W_E$ จะเห็น
 ได้ว่าถ้าค่าพหุคูณ $-e\phi$ ลดลงเท่ากับ $-\Delta(e\phi)$ จะได้ค่า W_1 จะมีค่าสูงสุดเป็น $e\phi - \Delta(e\phi)$
 ที่ระยะเท่ากับ x_{max} หาได้โดยดิฟเฟอเรนเชียล W_1 / dx แล้วให้เท่ากับศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ค่า x_{max} และ $\Delta(e\phi)$ คือ

$$\frac{dW}{dx} = \frac{-e^2 - eE}{16\pi\epsilon_0 x^2} = 0$$

จะได้

$$x_{max} = \sqrt{e/16\pi\epsilon_0 K} \tag{4.18}$$

และพลังงานศักย์สูงสุดได้จากการแทนค่า x_{max} ลงในสมการ (4.15) เป็น

$$V_0 = -e\sqrt{eK/4\pi\epsilon_0}$$

$$V_0(max) = -e/2\sqrt{eK/\pi\epsilon_0} \tag{4.17}$$

ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\Delta(e\phi)$ ตามนิยาม ดังนั้นค่าของเวอริ่งก็ขึ้นถึงผลเมื่อมีสนามไฟฟ้า K จะได้

$$e\phi - \Delta(e\phi) = e(\phi - \sqrt{eK/4\pi\epsilon_0})$$

และความหนาแน่นกระแสมีตัวเนื่องจากอิเล็กตรอนที่ปล่อยออกมาตามสมการ (4.11) จะได้

$$J = AT^2 e^{-(e/hT)(\phi - \sqrt{eK/4\pi\epsilon_0})} \tag{4.18}$$

ซึ่งเรียกว่าสมการของชอตทกี (Schottky equation)

ถ้าให้กระแสที่เป็น J_0 ที่ $K = 0$ กระแสในสมการ (4.18) จะเป็น

$$J = J_0 e^{e/hT\sqrt{eK/4\pi\epsilon_0}} \tag{4.19.1}$$

เพื่อให้ได้กระแส J มีค่ามากกว่า J_0 ที่อุณหภูมิห้องได้ สนามไฟฟ้า K จะต้องมีความสูงถึง 10...ถึง...100 MV/cm ซึ่งในทางปฏิบัติลักษณะของอิเล็กโทรดใช้งานที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงขนาดนั้นหายาก อย่างไรก็ตามในเรื่องของความเป็นจริง การปล่อยอิเล็กตรอนด้วยสนามไฟฟ้านั้นอาจเกิดขึ้นที่สนามไฟฟ้าน้อยกว่าที่แสดงข้างต้นได้ Fowler และ Nordheim ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อธิบาย ปรากฏการณ์ว่าเป็นผลของลักษณะสมบัติทางเวฟเมคานิกส์ของอิเล็กตรอน ที่สามารถ
 วิ่งทะลุกำแพงศักย์ x_{bar} ที่เหลือเพียงบางๆ เนื่องจากสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปยิ่งเรียกว่า
 ผลอุโมงค์ (Tunnel effect) จึงเป็นไปได้ว่าอิเล็กตรอนในช่องแคบซึ่งสามารถอาศัยผลอุโมงค์วิ่งทะ
 ลุกำแพงศักย์ออกมาได้เมื่ออิเล็กตรอนมีพลังงานมากกว่า ϕ_0 หรือมากกว่าระดับ เฟอร์มี
 (Fermi level) ในสภาวะภาคความเค้นดัดสนามไฟฟ้าเพียง 1 MV/cm ก็สามารถทำให้อิเล็ก
 ตรอนหลุดกระจายออกมาได้ เบริดจาว์นในภาซอาจเกิดขึ้นเนื่องจากสนามไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นเฉพาะ
 แห่งเนื่องมาจากไอออนก่อดัวเป็นสตริมเมอร์ขึ้นที่คะโอด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

กลไกการเกิดเบรคดาวน์

5.1 กลไกการเกิดเบรคดาวน์ (Breakdown mechanisms)

การเกิดเบรคดาวน์ในก๊าซ หมายถึง การเปลี่ยนสภาพการชนวนไปสู่สภาพการนำไฟฟ้า คือ เป็นช่วงต่อ (transition) ระหว่างสถานะภาพที่กระแสไหลประทังตัวเองไม่ได้ (nonself-sustained) ไปสู่สถานะภาพที่กระแสไหลประทังตัวเองได้ (self-sustained) ช่วงต่อดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้เมื่อในแก๊บมีจำนวนอิเล็กตรอนหรือไอออนในระยะเวลาหนึ่งมากพอจนทำให้แก๊บมีสภาพนำไฟฟ้าสูง และโดยทฤษฎี แล้วกระแสจะไหลเป็นค่าอนันต์ คือ กระแสจะถูกจำกัดด้วยค่าของวงจรภายนอกเท่านั้น และกระแสที่ไหลในแก๊บนั้นจะไหลต่อไปได้แม้ว่าจะตัดต้นกำเนิดรังสีส่องคาโทด (เช่น รังสีอัลตราไวโอเลต) เพื่อสร้าง N_0 และ I_0 ออก หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ แรงดันที่ทำให้เกิดเบรคดาวน์คงเดิมไม่ว่า N_0 หรือ I_0 จะต่างกันก็ตาม ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของกระแสไหลในแก๊บกับแรงดันที่ป้อนจะเห็นได้ว่าระดับกระแสอิ่มตัว I_{01}, I_{02} มีระดับต่างกัน ขึ้นอยู่กับความเข้มของรังสีส่องคาโทดที่ได้รับที่ระดับกระแสอิ่มตัว I_0 ค่าหนึ่งขนาดแรงดันที่ป้อนไม่มีผลต่อค่ากระแสที่ไหลในแก๊บ จนถึงค่าแรงดันหนึ่งกระแสจะเพิ่มขึ้นเป็นเอกซ์โปเนนเชียล ในย่านนี้เรียกว่า ทาวน์เซนด์คัสซาร์จ ถ้าเพิ่มแรงดันต่อไปอีกกระแสเกิน เอกซ์โปเนนเชียลจนแรงดันถึงค่าหนึ่งเรียกว่าเบรคดาวน์ เกิดขึ้นที่แรงดันเดียวกันไม่ว่า I_0 จะเป็นเท่าใด และกระแสในแก๊บไหลประทังตัวเองได้

จำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นทำให้กระแสไหลประทังตัวเองอยู่ได้นั้น เกิดจากกระบวนการต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วข้างต้นซึ่งมีกระบวนการที่สำคัญได้แก่

- 1) อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) เป็นอิเล็กตรอนปล่อยจากคาโทดโดยการวิ่งชนของไอออนบวก
- 2) ไอออนไนเซชันเนื่องจากพลังงานโฟตอน
- 3) ปล่อยอิเล็กตรอนออกจากคาโทดโดยโฟตอนไฟฟ้า (Photoelectric emission)

5.1.1 คัสซาร์จแบบทาวน์เซนด์

ตามทฤษฎีกลไกการเบรคดาวน์ของทาวน์เซนด์ (Townsend breakdown mechanism) นั้นเกิดขึ้นจากจำนวนอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้นเป็นลำดับต่อเนื่องในแก๊บระหว่างอิเล็กโตรด และเชื่อว่า

เอกสารถีกระบวนการเพิ่มทวีคูณของอิเล็กตรอนเพื่อการเกิดจากการไอออนไนเซชันกระบวนการอื่นนั้น ค่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(primary or α process) เกิดจากการไอออนไนเซชัน โดยไอออนบวกชนโมเลกุลของก๊าซ (β - process) แต่ในปัจจุบันนี้พบว่ากระบวนการ β นั้นไม่มีความหมายในการทำให้เกิดเบรคดาวน์ กระบวนการอื่นที่สองที่มีความสำคัญต่อกลไกการเบรคดาวน์ คือ กระบวนการ γ (γ -process) อันเป็นกระบวนการที่เพิ่มทวีคูณของอิเล็กตรอนปล่อยหลุดจากตะโอด (ดังที่กล่าวแล้วในข้อ 4.2) ในที่นี้จะวิเคราะห์ทฤษฎีของทวาน์เซนส์ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ กล่าวคือทุกจุดในแก๊ปมีความเครียดสนามไฟฟ้าเท่ากัน ทุกจุดมีสัมประสิทธิ์การไอออนไนเซชันค่าคงตัว และผลของประจุค้าง (space charge) ที่มีต่อค่าสนามไฟฟ้านั้นมีค่าน้อยจึงไม่คำนึงถึง

5.1.1.1 กระบวนการขั้นต้น (α -process or primary process)

จำนวนอิเล็กตรอนในอวาลานซ์ในแก๊ปที่ระยะ x จากตะโอดตามสมการ (4.7) คือ

$$N_x = N_0 e^{\alpha x}$$

เมื่อ N_0 = จำนวนอิเล็กตรอนที่ปล่อยออกจากตะโอดต่อวินาที
 N_x = จำนวนอิเล็กตรอนที่ระยะ x จากตะโอด
 จำนวนอิเล็กตรอนวิ่งไปถึงอะโอด ($x = d$) ต่อวินาทีเป็น

$$N_d = N_0 e^{\alpha d}$$

อิเล็กตรอนแต่ละตัวที่ออกจากตะโอดจะสร้างอิเล็กตรอนขึ้นใหม่ $e^{\alpha d} - 1$ ซึ่งมีจำนวนเท่ากับจำนวนไอออนบวกที่เกิดขึ้นและวิ่งมาถึงอะโอด และเขียนเป็นค่ากระแสจะได้

$$I = I_0 e^{\alpha d}$$

จะเห็นว่าจำนวนอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นเป็นเอกโพเนนเชียล และจะต้องมีอิเล็กตรอนเริ่มต้นออกจากตะโอดจำนวน N_0 ต่อวินาทีที่ได้จากการส่องรังสีเข้าไปที่ตะโอด จึงเรียกว่าการดีสชาร์จที่ประทุตัวเองไม่ได้ (nonself-discharge) เพราะถ้าเอาอิเล็กตรอนที่เริ่มสร้าง N_0 ออกเสีย กระบวนการไอออนไนเซชันก็จะหยุด ฉะนั้นถ้าซึ่งกระบวนการนี้จึงยังไม่สามารถที่จะทำให้เกิดการเบรคดาวน์ได้หากจะต้องมีกระบวนการอื่นสองมาเสริม

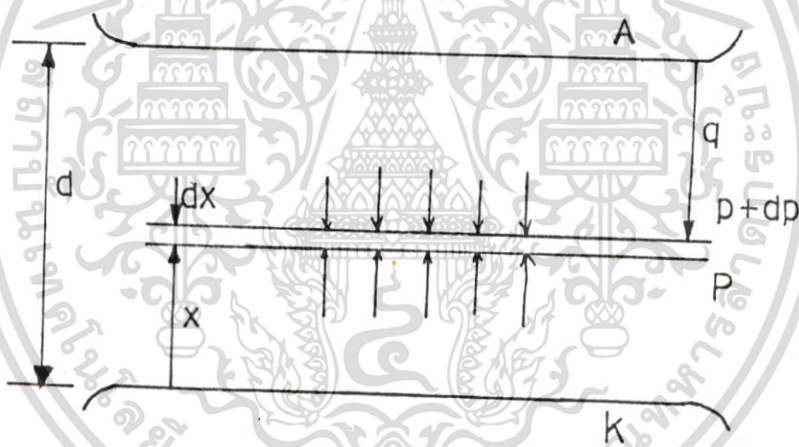
กระบวนการอื่นสองเป็นกระบวนการสืบเนื่องมาจากกระบวนการขั้นต้น กล่าวคือไอออนบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาติให้เข้าไปใช้ประโยชน์ที่นอกเหนือจากนี้
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เกิดจากอิเล็กตรอนแยกตัวออกมาจากโพลบวกที่เป็นกลางจะวิ่งไปชนอะตอมของก๊าซ หรือชน
 ะโอด ถ้าไอออนบวกนั้นมีพลังงานสูงพอจะทำให้เกิดการไอออนในเซชันในก๊าซ เรียกว่า
 กระบวนการ β ถ้าไอออนบวกชนอะโอดแล้วทำให้โอดถอนหลุดจากอะโอดได้ เราเรียกว่า
 กระบวนการ γ จำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดจากกระบวนการทั้งสองจึงอาจเขียนอธิบายด้วย
 สัมประสิทธิ์ของทาวน์เซนด์คือ β หรือ γ

5.1.1.2 กระบวนการไอออนในเซชัน $\alpha - \beta$

ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอตั้งในรูป 5.1 ให้ N_0 เป็นจำนวนอิเล็กตรอนที่ปล่อยหลุดจากอะโอด
 โดยการส่องรังสีเข้าไปที่อะโอดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ และต่อหนึ่งหน่วยเวลา และให้ p เป็นจำนวน
 ไอออนบวก หรือ จำนวนครั้งไอออนในเซชันที่เกิดขึ้นในช่องระหว่าง $x = 0$ (อะโอด) กับ
 $x = x$ ต่อหน่วยเวลา และ q เป็นจำนวนไอออนบวกหรือจำนวนครั้งไอออนในเซชันซึ่งเกิดขึ้นใน
 ช่องระหว่าง $x = x$ หรือ $x = d$ ต่อหน่วยพื้นที่และเวลา



รูปที่ 5.1 ดัชนีอาร์เจนบนกระบวนการ β

จำนวนอิเล็กตรอนที่เข้าไปในระนาบที่ระยะ x จากอะโอดเป็น $(N_0 + p)$ ในช่องปริมาตรย่อย
 ซึ่งหนา dx จำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นใหม่จากไอออนในเซชันคือ

$$(N_0 + p) \alpha dx$$

และจากอะโอดหรือระนาบบนจะมีไอออน q เคลื่อนที่ในทิศทางไปสู่อะโอด ในช่องปริมาตรย่อย
 ซึ่งหนา dx ไอออนนี้จะชนกับโพลบวกของก๊าซและเกิดการไอออนในเซชันด้วยอัตรา β ต่อหนึ่ง

หน่วยระยะทางในแนวสนามไฟฟ้า ดังนั้นจำนวนอิเล็กตรอนและจำนวนไอออนบวกที่เกิดขึ้นต่อวินาที จากไอออน q เป็น

$$q\beta dx$$

β คือสัมประสิทธิ์การชนไอออนในเซชันที่สองของทาวน์เซนด์ อันหมายถึงจำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดจากไอออนหนึ่งตัวชนอะตอมของก๊าซต่อหน่วยระยะทางตามแนวสนามไฟฟ้า

ดังนั้นจำนวนไอออนในเซชันทั้งหมดในช่องระหว่าง x กับ $x + dx$ ต่อวินาที คือ

$$(N_0 + p)\alpha dx + q\beta dx \tag{5.1}$$

ซึ่งเทียบเท่ากับจำนวนอิเล็กตรอนที่สร้างขึ้นใหม่ในช่วงความหนา dx

$$dp = \{ (N_0 + p)\alpha + q\beta \} dx \tag{5.2}$$

และจำนวนอิเล็กตรอนออกจากกระดาน $x + dx$ คือ $p + dp + N_0$ แต่จำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งไปถึงอะโนดรวมเป็น

$$N = N_0 + p + q \tag{5.3}$$

ซึ่งค่า q อาจเขียนได้ในเทอมของ N , N_0 และ p แล้วแทนใน 5.2 จะให้

$$\begin{aligned} dp &= \{ (N_0 + p) + \beta(N - N_0 - p) \} dx \\ &= \{ (N_0 + p)(\alpha - \beta) + \beta N \} dx \end{aligned}$$

แยกตัวแปรและอินทิเกรตจาก $x = 0$ และ $p = 0$ ถึง $x = d$ และ $p = N - N_0$ จะได้

$$\int_{p=0}^{p=N-N_0} \frac{dp}{N_0 + p + N\beta / (\alpha - \beta)} = \int_{x=0}^{x=d} (\alpha - \beta) dx$$

จะได้ผลลัพธ์

$$\ln \frac{N_0 + N - N_0 + \beta N(\alpha - \beta)}{N_0 + \beta N / (\alpha - \beta)} = (\alpha - \beta)d$$

หรือเขียนเป็นเลขชี้โพเนนเชียลจะได้

$$N \left(1 + \frac{\beta}{\alpha - \beta} \right) = \left(N_0 + \frac{N\beta}{\alpha - \beta} \right) e^{(\alpha - \beta)d}$$

จัดรูปเสียใหม่จะได้

$$\frac{N}{N_0} = \frac{(\alpha - \beta) e^{(\alpha - \beta)d}}{\alpha - \beta e^{(\alpha - \beta)d}} \quad (5.4)$$

นี่คือจำนวนอิเล็กตรอนทั้งหมดที่วิ่งไปถึงอะโนดต่อวินาที ที่ได้จากการชนไอออนในเซชัน ฉะนั้นจากสมการ (5.4) จะได้กระแส

$$\frac{I}{I_0} = \frac{(\alpha - \beta) e^{(\alpha - \beta)d}}{\alpha - \beta e^{(\alpha - \beta)d}} \quad (5.5)$$

เงื่อนไขการเปลี่ยนสถานะภาพที่กระแสไหลประทงตัวเองอยู่ได้ (self sustained current) เมื่อกระแสเพิ่มเป็นอนันต์ เมื่อส่วนในสมการ (5.5) เป็นศูนย์ ถึงสถานะภาพนั้น ค่า I_0 หรือ N_0 จะไม่มีผลต่อ I และ N แม้จะเอาต้นกำเนิดรังสีที่สร้าง N_0 หรือ I_0 ออก กระแสและการไอออนในเซชันจะยังคงสภาพอยู่ได้โดยไม่จำกัด ช่วงต่อของสภาวะที่ไม่กลับคืนสู่สภาวะเดิมเช่นนี้เรียกว่าเบรคดาว์นของก๊าซ เงื่อนไขของการเบรคดาว์นจะเกิดขึ้นคือ

$$\begin{aligned} \alpha - \beta e^{(\alpha - \beta)d} &= 0 \\ \beta e^{(\alpha - \beta)d} &= \alpha \\ \frac{\alpha}{\beta} &= \frac{e^{\alpha d}}{e^{-\beta d}} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 แต่ $\alpha \gg \beta$
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นในสมการที่ (5.4) และ (5.5) จึงอาจแทน $(\alpha - \beta)$ ด้วย α จึงได้

$$\frac{N}{N_0} = \frac{I}{I_0} = \frac{e^{-\alpha d}}{1 - (\beta/\alpha)e^{-\alpha d}}$$

และเงื่อนไขการเกิดเบรคดาวน์จึงเป็น

$$\frac{\alpha}{\beta} = e^{-\alpha d} \quad (5.6)$$

จึงเรียกว่าเงื่อนไขการเบรคดาวน์ของทาวน์เซนด์ (Townsend's breakdown criterion) อย่างไรก็ดีตามเงื่อนไขนี้อาจเกิดขึ้นได้ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่ากระบวนการ β ไม่อาจนำมาพิจารณาทำให้เกิดเบรคดาวน์ในก๊าซได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการที่มีความดันสูงแม้แต่ความดันบรรยากาศ ด้วยเหตุผลของสรุปได้คือ

1) โลซอนบวกไม่อาจทำให้เกิดไอออนในเข็ชในก๊าซได้อย่างมีประสิทธิภาพ ที่ความเครียดสนามไฟฟ้าเบรคดาวน์ เพราะถ้าจะเกิดได้ต้องให้พลังงานตามทฤษฎีถึงสองเท่าต่อโอกาสเช่นนี้มีน้อยมาก

2) ถ้ากลไกของการไอออนในเข็ชตามกระบวนการ β เป็นส่วนที่ทำให้เกิดเบรคดาวน์ โลหะฉิวของคะโอดจะไม่ยอมต่อค่าแรงดันเริ่มเกิดเบรคดาวน์ นั่นผลของการทดลองแสดงให้เห็นว่า work function ของโอดที่กระทำคะโอดมีผลอย่างมากต่อค่าแรงดันเบรคดาวน์

3) กลไกการเบรคดาวน์ตามกระบวนการ β ต้องใช้เวลาการเคลื่อนที่ข้ามแคบมากกว่าเวลาเกิดเบรคดาวน์ที่วัดได้

ดังนั้นกระบวนการขึ้นที่สองที่มีความสำคัญต่อการสร้างอิเลคตรอนที่ทำให้เกิดเบรคดาวน์ จึงเป็นแบบไอออนบวกวิ่งชนคะโอด (๒) ซึ่งจะเป็กระบวนการที่สอดคล้องด้วยเหตุผลข้อ 1) และ 2) ข้างต้นที่บ่งชี้ว่ากระบวนการ β นี้จะไม่สอดคล้องกับข้อ 3) ที่กระบวนการทำให้เกิดเบรคดาวน์ได้ในช่วงระยะเวลาสั้น

5.1.1.3 กระบวนการขึ้นสองแบบ ๒ (๒ - process)

ถ้าให้ N_0' = จำนวนอิเลคตรอนที่เกิดจากกระบวนการขึ้นที่สองที่คะโอด คือ $x = 0$ ต่อวินาที

N_0'' = จำนวนอิเลคตรอนรวมทั้งหมดที่ออกจากคะโอดต่อวินาที

นั่น $N_0'' = N_0 + N_0'$ (N_0 เช่นเดียวกับ 5.1.1.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


แต่อิเล็กตรอนแต่ละตัวที่ออกจากแคโทดจะชนไอออนไนท์เท่ากับ $e^{\alpha d} - 1$ ครั้ง จำนวนครั้งที่ในการไอออนไนท์ในแก๊บทั้งหมดจะเป็น

$$N_0' = N_0''(e^{\alpha d} - 1)$$

จะมีอิเล็กตรอนเกิดขึ้นจากกระบวนการชนสองออกจากแคโทดเป็น

$$N_0' = \alpha N_0''(e^{\alpha d} - 1)$$

เมื่อ α เป็นสัมประสิทธิ์การไอออนไนท์ที่สองของทาน์เซนต์
ดังนั้น



$$N_0'' = \frac{N_0 + \alpha N_0''(e^{\alpha d} - 1)}{1 - \alpha(e^{\alpha d} - 1)}$$

จำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งไปถึงอะโนดจึงเป็น

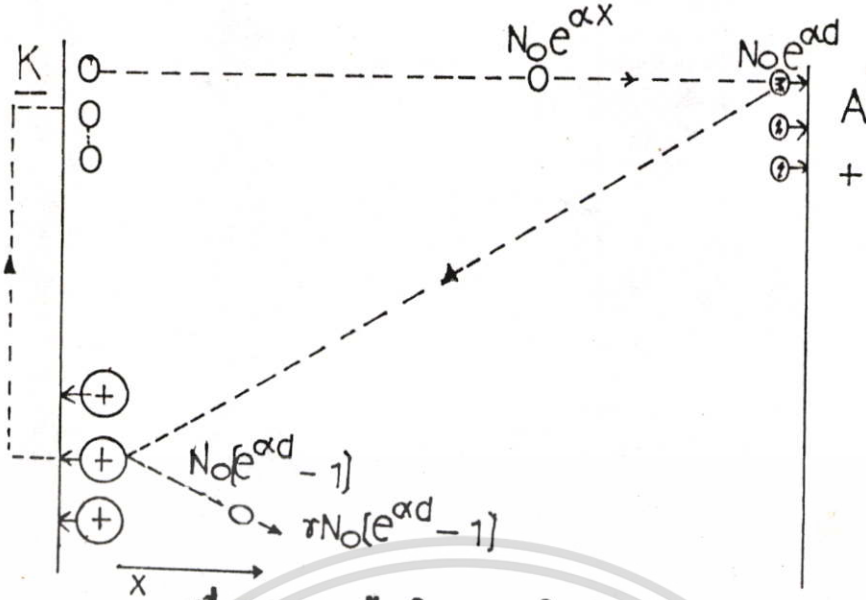
$$N_d = \frac{N_0 e^{\alpha d}}{1 - \alpha(e^{\alpha d} - 1)} \quad (5.7)$$

ดังไดอะแกรมในรูป 5.2 จึงได้สมการของกระแสเป็น

$$\frac{N_d}{N_0} = \frac{I}{I_0} = \frac{e^{\alpha d}}{1 - \alpha(e^{\alpha d} - 1)} \quad (5.8)$$

ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับสมการ (5.5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 การสร้างอิเล็กตรอนอิสระโดยกระบวนการ ข

ดังนั้นเงื่อนไขที่จะเกิดเบรคดาวน์ก็เมื่อกระแสเพิ่มเป็นอนันต์ คือ ตัวส่วนในสมการ (5.8) เป็นศูนย์ นั่นคือ

$$x(e^{\alpha d} - 1) = 1 \tag{5.9}$$

มีลักษณะคล้ายกับเงื่อนไขของกระบวนการ ข ดังสมการ (5.6) ในกรณีที่ใกล้เบรคดาวน์ค่า $e^{\alpha d} \gg 1$ จะได้สมการ(5.8)เป็น

$$\frac{Nd}{N_0} = \frac{I}{I_0} = \frac{e^{\alpha d}}{1 - e^{\alpha d}}$$

และเงื่อนไขในสมการ (5.9) จะเป็น

$$xe^{\alpha d} = 1$$

5.1.1.4 เงื่อนไขเบรคดาวน์ทั่วไปในกาซ

กระบวนการข้างต้นดังกล่าวมาแล้วจะพบว่าเงื่อนไขที่เกิดเบรคดาวน์คล้ายกัน กระบวนการข้างต้นที่สร้างอิเล็กตรอนอิสระในแก๊สอาจมีกระบวนการอื่นๆ ที่เสริมการเบรคดาวน์ เช่น โยลออนไอเซชันเกิดจากพลังไอตอนที่ปล่อยออกมาจากโมเลกุลในสภาวะที่คืนกระตุ้นกลับสู่สภาวะปกติ หรือเกิดอิเล็กตรอนอิสระจากโมเลกุลในสถานะเมตาเสถียรแพร่กระจายไปยังคาโทด และ กระบวนการข้างต้นอื่น ๆ ซึ่งมีเงื่อนไขการเกิดเบรคดาวน์ในลักษณะเดียวกัน ดังนั้นจึงอาจเขียนเงื่อนไขการเกิดเบรคดาวน์ในลักษณะทั่วไป เพื่อเขียนเงื่อนไขข้างต้นทั้งหมดไว้ใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณได้แก่

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

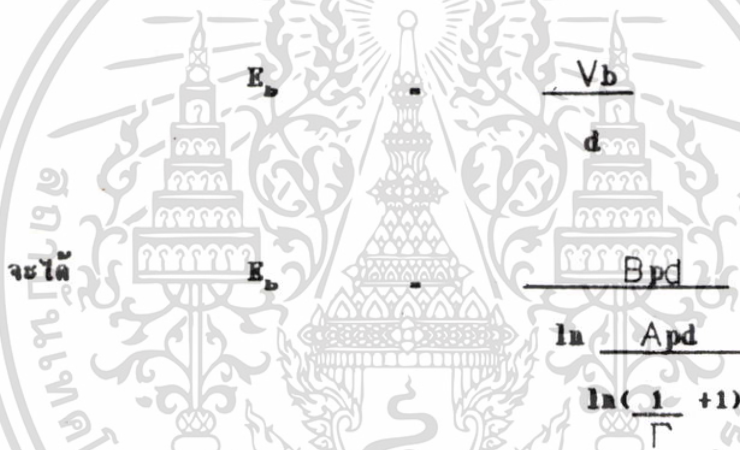
หนึ่งคือ Γ เงื่อนไขทั่วไปจึงเขียนได้ว่า

$$\Gamma (e^{-\alpha} - 1) = 1 \quad (5.10)$$

$$\text{เมื่อ } \Gamma = \frac{\beta}{\alpha} + V_1 + V_{2n} + V_n + \dots \quad (5.11)$$

5.1.2 ความเร็วของสนามไฟฟ้าเบรตควาน b

ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอความเร็วของสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรตควานอาจหาได้ง่าย ๆ จากค่าแรงดันเบรตควาน V_b ทหารด้วยระยะแยก d คือ



$$E_b = \frac{V_b}{d}$$

$$B_{pd} = \ln \frac{A_{pd}}{\ln \left(\frac{1}{\Gamma} + 1 \right)}$$

ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะแยก d และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะแยกแคบลง ผลลัพธ์อาจอธิบายได้ด้วยสมการ (5.10) ในตาราง 5.1 แสดงค่าความเร็วของสนามไฟฟ้าเบรตควานของอากาศในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอที่ได้จากอิเล็กโตรด Rowgowski profile ที่สภาวะมาตรฐาน 760 mmHg 20° C

ตารางที่ 5.1 ความเค้นสนามไฟฟ้าเบรคดาวน์ของอากาศ

d (mm)	E_b (kv/cm)	d (mm)	E_b (kv/cm)
0.1	96.0	8.0	32.1
0.2	73.3	9.0	31.7
0.3	64.1	10.0	31.4
0.4	58.8	15.0	30.0
0.5	55.2	20.0	29.4
0.6	52.2	25.0	28.9
0.7	49.9	30.0	28.6
0.8	48.1	35.0	28.3
0.9	46.5	40.0	28.0
1.0	45.4	45.0	27.8
2.0	39.5	50.0	27.7
3.0	36.7	55.0	27.5
4.0	35.0	60.0	27.3
5.0	34.0	65.0	27.2
6.0	33.2	80.0	26.9
7.0	32.6	90.0	26.7

5.1.3 กลไกการเบรคดาวน์แบบสตีมีเมอร์ (steamer mechanism)

เนื่องจากกลไกการเบรคดาวน์ตามทฤษฎีของทวาน์เซนส์ ไม่สามารถอธิบายการเกิดปรากฏการณ์การเบรคดาวน์ได้ทุกกรณี โดยเฉพาะอย่างยิ่งเวลาในการก่อตัวของอะวาลานซ์ (formative time) ที่ทำให้ดีซาร์จประทั่งตัวเองอยู่ได้ในอากาศที่มีความดัน เช่นการเกิดเบรคดาวน์ในช่องแคบกว้างๆ ในบรรยากาศของแรงดันอิทธิพลรูปคลื่นเข้าว่าที่เกิดเบรคดาวน์ในช่วงหน้าคลื่น เวลาคลื่นตัด (chopped time T_c) น้อยกว่า $0.1 \mu\text{sec}$ เป็นเวลาที่น้อยเกินไปที่ไอออนขนาดจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถเคลื่อนที่ไปยังตะโอดเพื่อสร้างมิเลคตรอนอิสระได้ เมื่อคำนวณตามเวลาของกระบวนการทาวน์เซนด์ที่ใช้สร้างอะวาลานซ์ของมิเลคตรอนในการชนแตกตัวและปล่อยมิเลคตรอนออกจากตะโอด จะพบว่ามากกว่าเวลาคลื่นตัดที่วัดได้จากการทดลอง หรือแม้แต่คิดเวลาที่มิเลคตรอนเคลื่อนที่โดยตรงจากตะโอดข้ามช่องแกปไปยังอะโอดโดยไม่ชนกับโมเลกุลแกส ก็ใช้เวลานานกว่าคลื่นตัดที่ทดลองได้ นี่เป็นจุดล้มเหลวของทฤษฎีการเบรคดาวน์ของทาวน์เซนด์

จุดอ่อนอีกประการหนึ่งของกลไกการเบรคดาวน์ของทาวน์เซนด์ที่ไม่สามารถอธิบายผลของประจุต่าง (space charge) ที่อยู่เบื้องหลังของมิเลคตรอนอะวาลานซ์ก่อน ๆ มีหลายกรณี ที่กลุ่มของไอออนเหล่านี้ทำให้สนามไฟฟ้าเดิมบิดเบือนไปในทางที่มีความเครียดสูงขึ้น และอาจทำให้มิเลคตรอนมีพลังงานมากพอที่จะเกิดไอออนในเซชันอื่นได้

ความล้มเหลวของกลไกการเบรคดาวน์ของทาวน์เซนด์ ทำให้เกิดการค้นหากฎใหม่ที่จะอธิบายปรากฏการณ์เหล่านี้ ทฤษฎีที่พิเศษและสมบูรณ์ในปัจจุบันคือ ทฤษฎีสตรีมเมอร์ (Streamer theory) Meek และ Loeb ได้เสนอทฤษฎีสตรีมเมอร์มาในปี 1940 และในเวลาเดียวกัน Rather ก็เสนอทฤษฎีสตรีมเมอร์

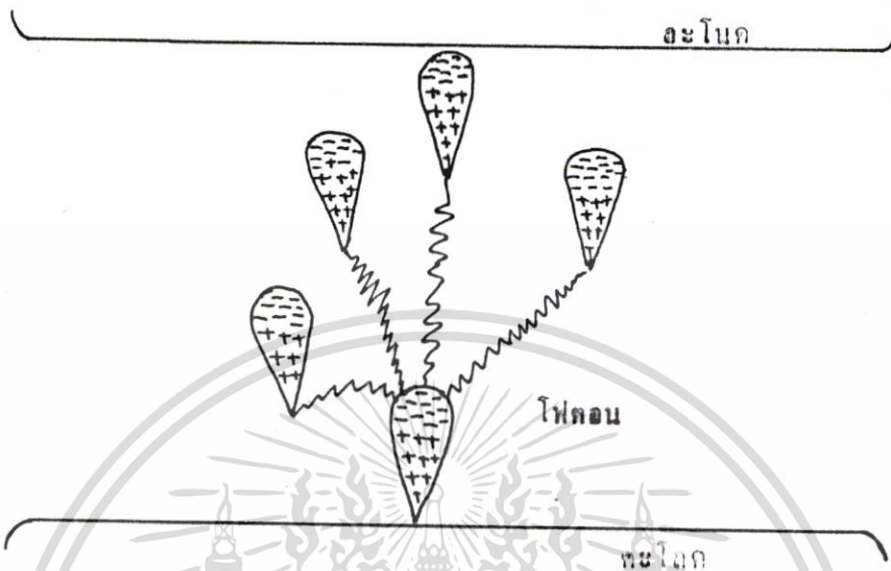
กลไกสตรีมเมอร์อธิบายการเกิดสปาร์ตดิสชาร์จจากอะวาลานซ์เดี่ยว ซึ่งมีประจุต่างเกิดจากอะวาลานซ์เอง เปลี่ยนจากอะวาลานซ์ไปเป็นพลาสมาสตรีมเมอร์ ทำให้สภาพนำไฟฟ้าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและเกิดเบรคดาวน์ทันทีในเวลาน้อยๆ หลักการของการเกิดเบรคดาวน์ตามทฤษฎีกลไกสตรีมเมอร์เป็นผลสืบเนื่องจากระบวนการวิ่งชนไอออนในเซชัน (กระบวนการ α) ของทาวน์เซนด์

กล่าวคือจะมีการไอออนในเซชันเป็นจำนวนมากจากพลังงานที่เรียกว่าโฟตอนไอออนในเซชัน(photo-ionization) ของภาพโมเลกุลที่ส่วนหัวของสตรีมเมอร์ กลุ่มประจุต่างของไอออนที่ส่วนหัวของสตรีมเมอร์ทำให้สนามไฟฟ้าเข้มข้นมาและทำให้เกิดไอออนในเซชันเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ไอออนบวกเคลื่อนที่ได้ช้าเกือบจะเรียกได้ว่าอยู่กับที่ เมื่อเทียบกับเคลื่อนที่ของมิเลคตรอนที่วิ่งข้ามช่องแกปไปยังอะโอด เกิดหมอกมิเลคตรอนเป็นฉนวนระหว่างมิเลคโตรด ปล่อยให้ไอออนบวกอยู่เบื้องหลังรวมกันเป็นหมอก ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ส่วนหัวและหลังอะวาลานซ์เพิ่มขึ้น แต่ในบริเวณระหว่างมิเลคตรอนกับหมอกไอออนความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลง การเพิ่มขึ้นของความเครียดสนามไฟฟ้าตามจุดต่างๆ ทำให้เกิดโฟโตไอออนในเซชันหลายตัวเพิ่มขึ้นเกิดอะวาลานซ์ใหม่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วดังรูปที่ 5.3 หมอกประจุเพิ่มขึ้นทำให้ความนำไฟฟ้าสูงขึ้นเป็นนามลักษณะเป็นสตรีมเมอร์ระหว่างอะโอด กับ ตะโอด และเกิดเบรคดาวน์ตามแนวนิ่ง เรียกกลไกการเบรคดาวน์ลักษณะนี้ว่า สตรีมเมอร์เบรคดาวน์ การขยายเพิ่มสภาพนำไฟฟ้า

ระหว่างมิเลคโตรดโดยอาศัยโฟโตไอออนในเซชัน สร้างอะวาลานซ์เป็นไปด้วยความเร็วเท่ากับแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดเบรคดาวน์ในลักษณะสตรีมเมอร์มีความเร็วประมาณ 1 ถึง 10 μsec ที่สอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 5.3 กลไกการเบรคดาวน์แบบสตรีมเมอร์

5.1.3.1 เงื่อนไขการเกิดสตรีมเมอร์เบรคดาวน์กำหนดด้วยสนามไฟฟ้าจากประจุค้าง

เงื่อนไขการเกิดสตรีมเมอร์เบรคดาวน์ กำหนดด้วยช่วงต่อการเปลี่ยนสถานะภาพจากอิเล็กตรอนอะวาลานซ์ไปสู่สตรีมเมอร์ซึ่งแบ่งออกเป็นสองทางตามทฤษฎีที่ได้เสนอคือ

1) การเปลี่ยนจากอิเล็กตรอนอะวาลานซ์เดี่ยวไปสู่สตรีมเมอร์จะเกิดขึ้นเมื่อสนามไฟฟ้าเนื่องจากไอออนบวกที่หัวอะวาลานซ์มีค่าเท่า ๆ กับความเครียดสนามไฟฟ้าที่ป้อนจากภายนอก เป็นเงื่อนไขของการเกิดสตรีมเมอร์เบรคดาวน์เสนอโดย Meek and Loeb

2) Rather เสนอเงื่อนไขสตรีมเมอร์เบรคดาวน์กำหนดด้วยสนามไฟฟ้าจากประจุค้างเช่นกัน โดยไม่เกี่ยวข้องกับ Meek and Loeb และ กำหนดอีกว่าสตรีมเมอร์จะเกิดขึ้นเมื่ออะวาลานซ์มีจำนวนอิเล็กตรอนหรือไอออนบวกตามกระบวนการชนไอออนในเซชัน e^{-} ประมาณ 10^{11} โดยไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซหรือความดันก๊าซหรือระดับความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้า

เพื่อหาขนาดความเครียดสนามไฟฟ้าที่เป็นเงื่อนไขของการเปลี่ยนสถานะภาพจากอะวาลานซ์เดี่ยวไปสู่สตรีมเมอร์ ตามคำอธิบายของ Meek and Loeb สมมติว่าส่วนหัวของอะวาลานซ์เป็นทรงกลม และมีความหนาแน่นของไอออนบวกเป็น N' ต่อหน่วยปริมาตร ฉะนั้นสนามไฟฟ้าที่ผิว

เอกสารนี้จัดทำขึ้นโดยกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_r = \frac{eN}{4\pi\epsilon_0 r^2} \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right) = \frac{eNr}{3\epsilon_0} \quad (5.12)$$

ให้ x คือความยาวของอะวาลานซ์ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ E

da คือ จำนวนไอออนบวกที่อยู่ในปริมาตรย่อยซึ่งมีความหนา dx และพื้นที่หน้าตัด πr^2

$$N' = \frac{dN}{\pi r^2 dx}$$

นั่นหาค่า da จากความสัมพันธ์ในสมการ (3.7) คือ $N = N_0 e^{-\alpha x}$ จะได้

$$N' = \frac{N_0 \alpha e^{-\alpha x} dx}{\pi r^2 dx}$$

ถ้า $N_0 = 1$ เนื่องจากอะวาลานซ์หนึ่งเกิดจากอิเล็กตรอนหนึ่งตัวจะได้

$$N' = \frac{\alpha e^{-\alpha x}}{\pi r^2}$$

แทนค่า N' ในสมการ (4.12) จะได้สนามไฟฟ้าเป็น

$$E_r = \frac{e \alpha e^{-\alpha x}}{3\pi\epsilon_0 r}$$

รัศมีของอะวาลานซ์ที่มีความยาว x หาได้จากสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายคือ

$$r = \sqrt{2Dt}$$

เมื่อ

$$t = \frac{x}{v} = \frac{x}{kE}$$

D = สัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย (diffusion coefficient)

v = ความเร็วเฉลี่ยของอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้า

k = สภาพคล่องของอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้

$$r = \sqrt{2Dx/v} = \sqrt{2Dx/KE}$$

นั่นจะได้สนามไฟฟ้าในแนวรัศมีของตัวอะวาลานซ์เป็น

$$E_r = \frac{e\alpha e^{-\alpha x}}{3\epsilon_0 \sqrt{2Dx/v}} \quad (5.13)$$

$$= \frac{e\alpha e^{-\alpha x}}{37\epsilon_0 \sqrt{2Dx/KE}} \quad (5.13a)$$

Meek and Loeb ได้แทนค่า D/K ของอิเล็กตรอนเข้าหาค่า E_r ของอะวาลานซ์ที่เกิดในอากาศจะได้

$$E_r = 5.27 \times 10^{-7} \alpha e^{-\alpha x} \sqrt{p/x} \text{ V/cm} \quad (5.14)$$

เมื่อ p คือความดัน เงื่อนไขการเกิดเบรคดาวน์ตามที่ Meek and Loeb เสนอก็คือ

$$E_r = E$$

เมื่อ E คือสนามไฟฟ้าที่ป้อนจากภายนอก

จากสมการ (4.52) จะสามารถคำนวณค่าแรงดันเบรคดาวน์ต่ำสุดได้ ถ้าทราบระยะแกป d เป็นเซนติเมตร และความดัน p โดยเลือกค่า E จะได้ค่า α จากกราฟความสัมพันธ์ $\alpha/P = f(E/p)$ จนกระทั่งได้ค่า E ที่เหมาะสมเท่ากับ E_r ค่า E ที่ได้จะเป็นค่าความเค้นของสนามไฟฟ้าของแกปที่ทำให้เกิดเบรคดาวน์

ท่านลอง देखกันตามเงื่อนไขการเกิดสเปิร์มเทอร์เบรคดาวน์ที่เสนอโดย Rather ซึ่งสมมติว่าอิเล็กตรอนอยู่ส่วนหัวของอะวาลานซ์ที่มีลักษณะเป็นทรงกลมเช่นกัน และมีจำนวนเท่ากับ $e^{-\alpha x}$ เมื่อ x เป็นความยาวของอะวาลานซ์ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ E ความเค้นของสนามไฟฟ้าเนื่องมาจากประจุค้างในอะวาลานซ์จะเป็น

$$E_r = \frac{e e^{-\alpha x}}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (5.15)$$

เมื่อ r คือรัศมีของอะวาลานซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Rather ได้ใช้ค่าเฉลี่ยของ } r = \sqrt{3De} = 4.5 Vx/E$$

เมื่อ v คือพลังงานความร้อนของอิเล็กตรอนเป็น ev
จะให้ความเร็วคสนามไฟฟ้าของประจุต่างเป็น

$$E_r = \frac{ee^{ax}}{4\pi\epsilon_0 (3Dx/KK)} \quad (5.16)$$

ในทำนองเดียวกันเงื่อนไขการเปลี่ยนจากอะวาลานซ์ไปสู่สตรีมเมอร์จะเกิดขึ้นเมื่อ

$$E = E_r$$

เมื่อพิจารณาในกรณีของอิเล็กตรอนจะได้อัตราส่วนอินทิกรัลที่กระทำจาก D และสภาพเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน k จะได้

$$\frac{D}{k} = \frac{2 V k}{3 K}$$

ดังนั้นรัศมีของหัวอะวาลานซ์จะเป็น

$$r = \frac{2 \sqrt{V \cdot k}}{3 K}$$

เมื่อ V เป็นพลังงานความร้อนของอิเล็กตรอนเป็น ev
ความเร็วคสนามไฟฟ้าจากประจุต่างในสมการ(4.16) จะได้

$$E_r = \frac{ee^{ax} K}{4\pi\epsilon_0 (2Vx)} \quad (5.17)$$

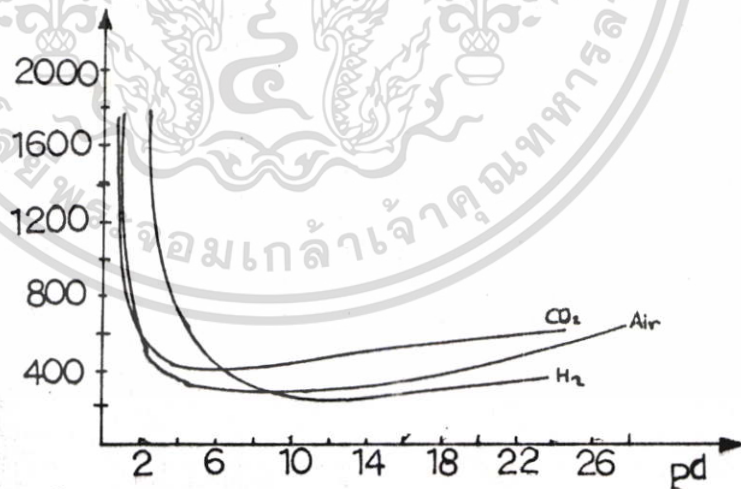
บทที่ 6

การเบรคความในสนามสม่ำเสมอ

จากที่ได้กล่าวถึงกลไกการเบรคความแบบ Townsend และ Streamer ซึ่งกลไกการเบรคความสามารถนำมาใช้อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ คุณสมบัติการเบรคความของก๊าซและสนามไฟฟ้าในสนามสม่ำเสมอซึ่งขึ้นอยู่กับ ความดัน อุณหภูมิ และระยะช่องว่าง

6.1 คุณสมบัติการเบรคความ

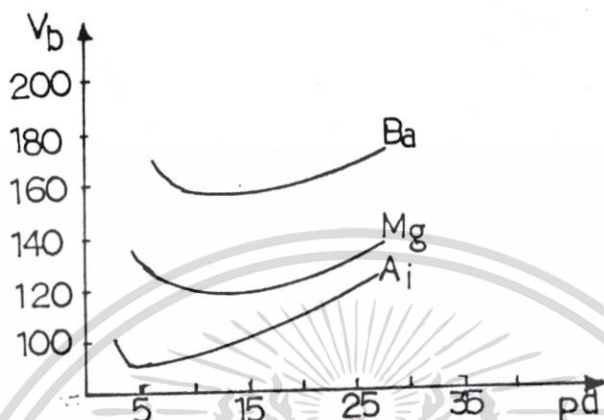
ความสัมพันธ์ระหว่างศักดาไฟฟ้าเบรคความและระยะช่องว่าง ในก๊าซชนิดต่าง ๆ ระหว่างอิเล็กโตรดในสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.1 และการทดลองส่วนมากทำกันที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ ทั้งนี้เพื่อรักษากลไกของการเบรคความและองค์ประกอบอื่น ๆ ที่มีผลต่อการเบรคความที่ความดันการเบรคความจะไปตามกลไกของทาร์นเชนด์ ทั้งกระบวนการ γ และ α ที่ความดันใกล้เคียงความดันบรรยากาศและเหนือกว่า ประจุอวกาศ(space charge) มีผลให้สนามเปลี่ยนแปร และกลไกเบรคความแบบ Streamer จึงเหมาะสมที่จะอธิบายแบบหลังนี้มากกว่า แต่อย่างไรก็ตามสำหรับการเบรคความในช่องว่าง โดยที่ศักดาไฟฟ้าไม่เกินอวลตา (overvolt) มากนักก็อาจใช้กลไกการเบรคความแบบ Townsend อธิบายได้



รูปที่ 6.1 ศักดาไฟฟ้าเบรคความในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ที่ความดันต่ำ ๆ การเบรคความขึ้นอยู่กับสารที่นำมาทำคาโทดด้วย ผลของมันสังเกตได้ที่ค่า pd

ต่ำๆใกล้กับศักดาไฟฟ้าเบรคความต่ำสุด กราฟรูปที่ 6.2 เป็นกราฟแสดงคุณสมบัติของการเบรคความในอากาศโดยที่คาโทดทำด้วยแบเรียม แมกเนเซียม และอลูมิเนียม

ทดลองโดย Jacobs ได้ไม่คิดถึงผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและจากกฎของ Paschen อาจเปลี่ยน $V = f(pd)$ โดยที่ p คือความหนาแน่นของก๊าซซึ่งได้รวมผลของอุณหภูมิเข้าไปด้วย จากการทดลองกฎของ Paschen ใช้ได้ดีสำหรับอุณหภูมิสูงถึง 1100 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นมากการเบรคดาวน์ไม่เป็น



รูปที่ 6.2 สักดาไฟฟ้าเบรคดาวน์ในอาร์กอนสำหรับตาโกลที่ทำด้วย แบเรียม แมกนีเซียม และอลูมิเนียม

ตามกฎของ Paschen การเบรคดาวน์จะเป็นการไหลย้อนในเซินเนื่องจากความร้อน (อุณหภูมิสูงกว่า 2000 °K) หรือเกิดจากการปล่อยอิเล็กตรอนจากความร้อน (Thermonic emission) ช่องว่างที่กว้างกว่า 0.01 ซม. ที่ความดันและอุณหภูมิปกติ (n.t.p.) มีค่า pd ไปทางขวาของจุดต่ำสุดของ Paschen และสักดาไฟฟ้าเบรคดาวน์เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับ pd สักดาไฟฟ้าเบรคดาวน์ในอากาศจะเป็นไปตามสมการ

$$V = \frac{24.22}{760T} \sqrt{293pd} + \frac{6.08}{\sqrt{760T}} \sqrt{293pd} \quad \text{KV} \quad (6.1)$$

p คือ ความดันของอากาศ mmHg

T คือ อุณหภูมิ

d คือ ระยะช่องว่าง ซม.

จากสมการที่ 6.1 ในสนามสม่ำเสมอ สักดาไฟฟ้าเบรคดาวน์มีค่าไม่คงที่แม้ว่าความดันและอุณหภูมิจะคงที่ สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอที่ความดัน 760 mmHg และ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เขียนได้ดังสมการ

$$V = 24.22 + \frac{6.08}{\sqrt{760}} \sqrt{pd} \quad \text{kV/cm} \quad (6.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา \sqrt{pd} เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ระยะช่องว่างมาก ๆ สนามไฟฟ้ามีค่า 24.22 kV/cm สำหรับอากาศโดยทั่วไปจะคิดเป็น 30kV/cm ใช้สำหรับอากาศที่มีค่า

$$\frac{293p d}{760T} = 1$$

นั่นคือศักดาไฟฟ้าเบรตดาวน์ของอากาศในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ มีค่า 30 kV/cm ที่ระยะช่องว่าง 1 cm ความดัน 760 mmHg อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

6.2 ศักดาไฟฟ้าเบรตดาวน์ที่ความถี่สูง (breakdown voltage at high frequency)

ความสัมพันธ์ระหว่างศักดาไฟฟ้าเบรตดาวน์และความถี่สามารถแสดงออกได้เป็น 5 ช่วง ดังแสดงในรูปที่ 6.3 และศักดาไฟฟ้าเบรตดาวน์ที่ขึ้นกับความถี่ในแต่ละช่วงนั้นมีกระบวนการทางด้านฟิสิกส์ต่าง ๆ กันดังนี้



รูปที่ 6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างศักดาไฟฟ้าเบรตดาวน์และความถี่

ที่ความถี่ ต่ำกว่า f_c ศักดาไฟฟ้าเบรตดาวน์ไม่ขึ้นกับความถี่ ทั้งนี้เป็นเพราะไอออนบวกหรือประจุบวกที่เกิดในระหว่างไอออนไนเซชัน ในช่วงครึ่งไซเคิลแรกมีเวลามากพอที่จะเคลื่อนที่เข้าอิเล็กโทรด และครึ่งไซเคิลต่อไปจึงไม่มีประจุบวกเหลือจากครึ่งไซเคิลแรก และกระบวนการก็เริ่มใหม่เหมือนเดิม เมื่อความถี่ที่เพิ่มมากขึ้นจนมากกว่า f_c ส่วนหนึ่งของไอออนบวกในครึ่งไซเคิลแรกยังหลงเหลืออยู่ทำให้ประจุบวกสะสมไปเรื่อย ๆ ทำให้ศักดาไฟฟ้าเบรตดาวน์ต่ำลง สำหรับความถี่วิกฤตหรือ f_c นั้นขึ้นกับความดันของภาชนะและระยะระหว่างอิเล็กโทรด เช่นในช่องว่างอากาศในสนามสม่ำเสมอที่ความดันบรรยากาศ ความถี่วิกฤตมีค่า 1000 kHz ที่ระยะช่องว่าง

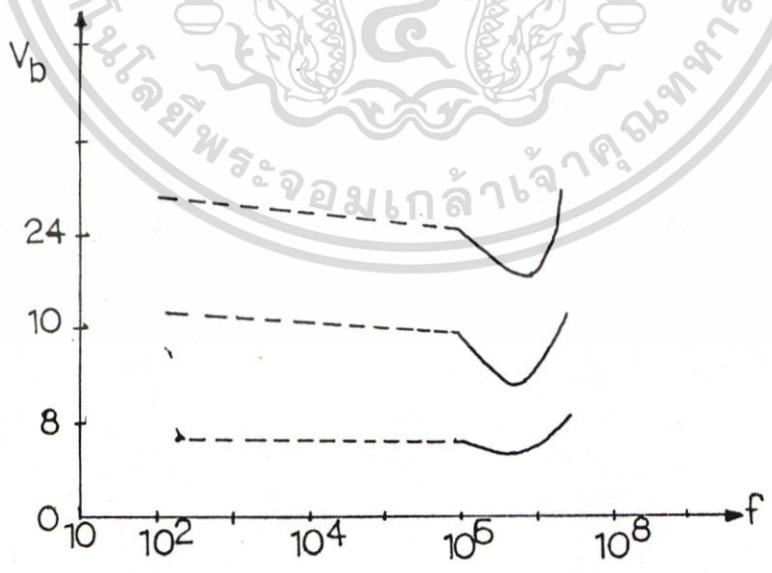
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.09 ซม. ความถี่วิกฤตมีค่า 110 kHz ที่ระยะช่องว่าง 0.45 ซม. และความถี่วิกฤตมีค่า 20 kHz ที่ระยะช่องว่าง 2.5 ซม. จะเห็นได้ว่าความถี่ผกผันกับระยะช่องว่าง ถ้าความดันของก๊าซเพิ่มขึ้น ความถี่วิกฤตต้องมีค่าลดลง

เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจนถึง f_1 แล้วหลังจากนั้นสีกดาไฟฟ้าเบรตความถี่ค่าเกือบคงที่เมื่อความถี่เพิ่มต่อไป ที่เป็นเช่นนั้นเพราะประจุอากาศที่เกิดขึ้นในช่องว่างไม่เพิ่มขึ้นต่อไปแล้วเนื่องจากเกิดสภาวะสมดุลระหว่างอัตราการเกิดของไอออนและการกระจายของประจุอากาศไปยังอิเล็กโทรด ความถี่เพิ่มขึ้นจนถึง f_2 ต่อจากนั้นสีกดาไฟฟ้าเบรตความถี่ก็ลดลง ที่ความถี่ในช่วงนี้ระยะเวลาในครึ่งไซเคิลสั้นเกินไปสำหรับที่จะให้อิเลคตรอนเคลื่อนที่ในอิเล็กโทรด ดังนั้นอิเล็กตรอนบางส่วนไม่สามารถข้ามอิเล็กโทรดภายในช่วงครึ่งไซเคิลและหลงเหลืออยู่ภายในช่องว่างและทำให้การไอออนในเซชันในช่วงครึ่งไซเคิลหลังดับ ดังนั้นสีกดาไฟฟ้าเบรตความถี่จึงลดลง

ที่ความถี่สูงกว่า f_3 สีกดาไฟฟ้าเบรตความถี่เริ่มเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ และสูงกว่าสีกดาไฟฟ้าเบรตความถี่ที่ความถี่เพาเวอร์ (power frequency) ที่เป็นเช่นนั้นเพราะระยะเวลาในครึ่งไซเคิลนั้นสั้นมากจนอิเล็กตรอนไม่สามารถทำให้เกิดไอออนในเซชันชุดแรกสมบูรณ์ได้ ดังนั้นจึงต้องเพิ่มสีกดาไฟฟ้าให้สูงขึ้นเพื่อเร่งให้อิเลคตรอนมีความเร็วเพิ่มขึ้น

ในรูปที่ 6.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสีกดาไฟฟ้าเบรตความถี่และความถี่สำหรับช่องว่างอากาศในสนามสม่ำเสมอ ความถี่ที่ให้สีกดาไฟฟ้าเบรตความถี่ค่าสุดสำหรับระยะช่องว่าง 2- 10 มม อยู่ระหว่าง 1-10 MHz



รูปที่ 6.4 สีกดาไฟฟ้าเบรตความถี่ค่าต่าง ๆ กัน สำหรับระยะช่องว่างอากาศในสนามสม่ำเสมอ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า **เพิ่มบทความค้น บรรณาการ** ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีก้นำไปใช้

6.3 ผลของความชื้นของอากาศต่อศักดาไฟฟ้าเบรตดาร์วิน

ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ความชื้นของอากาศมีผลต่อแรงดันไฟฟ้าเบรตดาร์วินน้อยมาก จากตัว
 ล่างการทดลองของ Bitz เมื่อเพิ่มความชื้นสัมบูรณ์ (absolute humidity) ของอากาศจาก
 10 ถึง 25 ม.ม.ปรอทที่ความดันบรรยากาศในช่องว่างระยะห่าง 1 ซม. ระหว่างอิเล็กโทรด
 ทำให้ศักดาเบรตดาร์วินเพิ่มขึ้น 2 x Ritz ได้เสนอสมการเบรตดาร์วินดังสมการ

$$V = 6.66 \sqrt{ps} + [24.55 + 0.41 (0.1e^{-1.0})] \sqrt{ps} \quad (6.8)$$

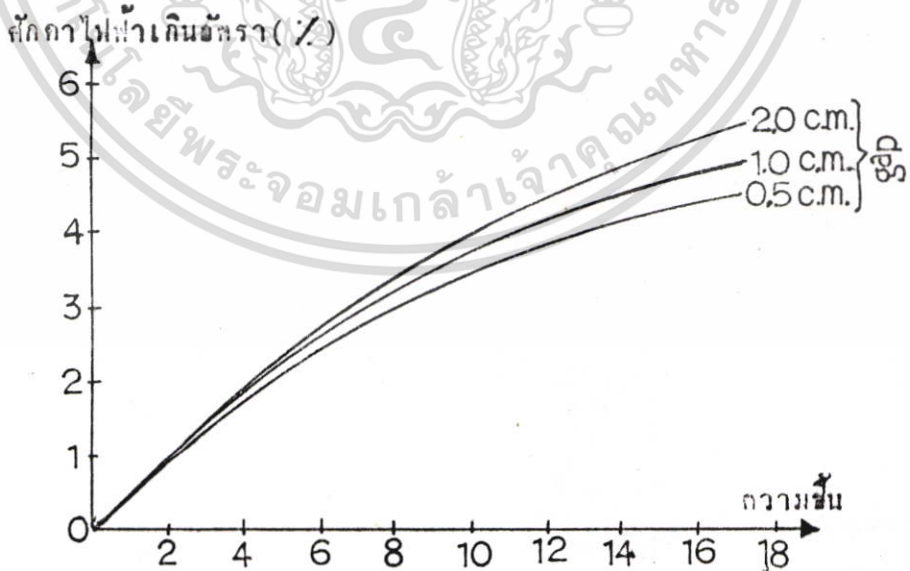
เมื่อ V คือ ศักดาไฟฟ้าเบรตดาร์วิน KV peak

s คือ ระยะช่องว่าง cm

p คือ ความหนาแน่นของก๊าซ

e คือ ความดันไอของน้ำ mmHg

Kohrmann ได้สังเกตผลของความชื้นที่มีต่อศักดาไฟฟ้าเบรตดาร์วิน และพบว่าระยะเบรต
 ดาร์วินของช่องว่าง 0.5 ซม. เพิ่มขึ้น 2.4% เมื่อความดันไอของน้ำเพิ่มจากศูนย์ไปเป็น
 10 ม.ม.ปรอท Kuffel ได้สังเกตผลของความชื้นที่ระยะช่องว่างต่างกัน รูปที่ 6.4 แสดง
 จำนวนเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นของศักดาไฟฟ้าเบรตดาร์วิน เมื่อความชื้นเปลี่ยนจากศูนย์ไปเป็น
 17 ม.ม.ปรอท ตารางเปลี่ยนแปลงของศักดาไฟฟ้าไม่สัมพันธ์โดยตรงไม่ว่ากับความชื้นสำหรับช่องว่าง
 ที่กำหนดให้ หรือกับระยะช่องว่างสำหรับความชื้นใด ๆ ที่กำหนดให้ การเพิ่มของศักดาไฟฟ้าเบรต
 ดาร์วินเมื่อปริมาณไอของน้ำเพิ่มขึ้นนั้นอาจอธิบายได้ว่าเป็นผลจากความสามารถในการรวมตัวกันของอิ
 เลกตรอนและโมเลกุลหรือของอะตอมในอากาศซึ่งมีค่าสูง



รูปที่ 6.5 การเพิ่มขึ้นของศักดาไฟฟ้าเบรตดาร์วินกับความชื้นสำหรับระยะช่องว่าง 0.5,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 1.0 และ 2.0 เซนติเมตร ในสนามสม่ำเสมอ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

Prasad และ Craggs ได้แสดงให้เห็นว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์การรวมตัวกัน (attachment coefficient) มีค่าสูงกว่าสัมประสิทธิ์การไอออนในเซินเมื่อความดันไอน้ำเพิ่มมากขึ้นนอกจากนี้สัมประสิทธิ์การไอออนในเซินตัวที่สอง (secondary ionization coefficient) ลดลงเมื่อความดันไอน้ำเพิ่มขึ้นทำให้ศักดาไฟฟ้าเบรคดาวน์เพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น

จากการทดลองที่ได้ทำมาสำหรับสนามสม่ำเสมอ ศักดาไฟฟ้าเบรคดาวน์เนื่องจากกระแสดวง และกระแสดับไม่แตกต่างกัน

6.4 การคำนวณแรงดันเบรคดาวน์ในอากาศของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ $n^+ = 1$ นั้นจากสมการ

$$V_b = E_c \cdot d$$

ค่า E_c ของอากาศหาได้จากตารางที่ 5.1 ซึ่งเขียนแทนได้ด้วยสมการ

$$d(E_c - E_c^0)^2 = K/C \tag{6.4}$$

โดยที่ $E_c^0 = 24.4 \text{ Kv/cm}$

$$K/C = 45.1 \text{ Kv}^2/\text{cm}$$

ดังนั้นจะได้

$$E_c = \frac{24.4 + \frac{6.72}{\sqrt{d}}}{\text{Kv/cm}} \tag{6.5}$$

เมื่อ d มีหน่วยเป็น cm

จากเงื่อนไขการเบรคดาวน์

$$\alpha d = K$$

ดังนั้นจาก $\alpha d = p \cdot d \cdot f(U/p \cdot d) = K$

$$\alpha = \frac{C(E - E_c^0)^2}{p \cdot d} \tag{6.6}$$

ซึ่งสอดคล้องกับสมการของชูมันน์ (Schumann's equation) ที่ได้จากเส้นกราฟการวัดสัมประสิทธิ์

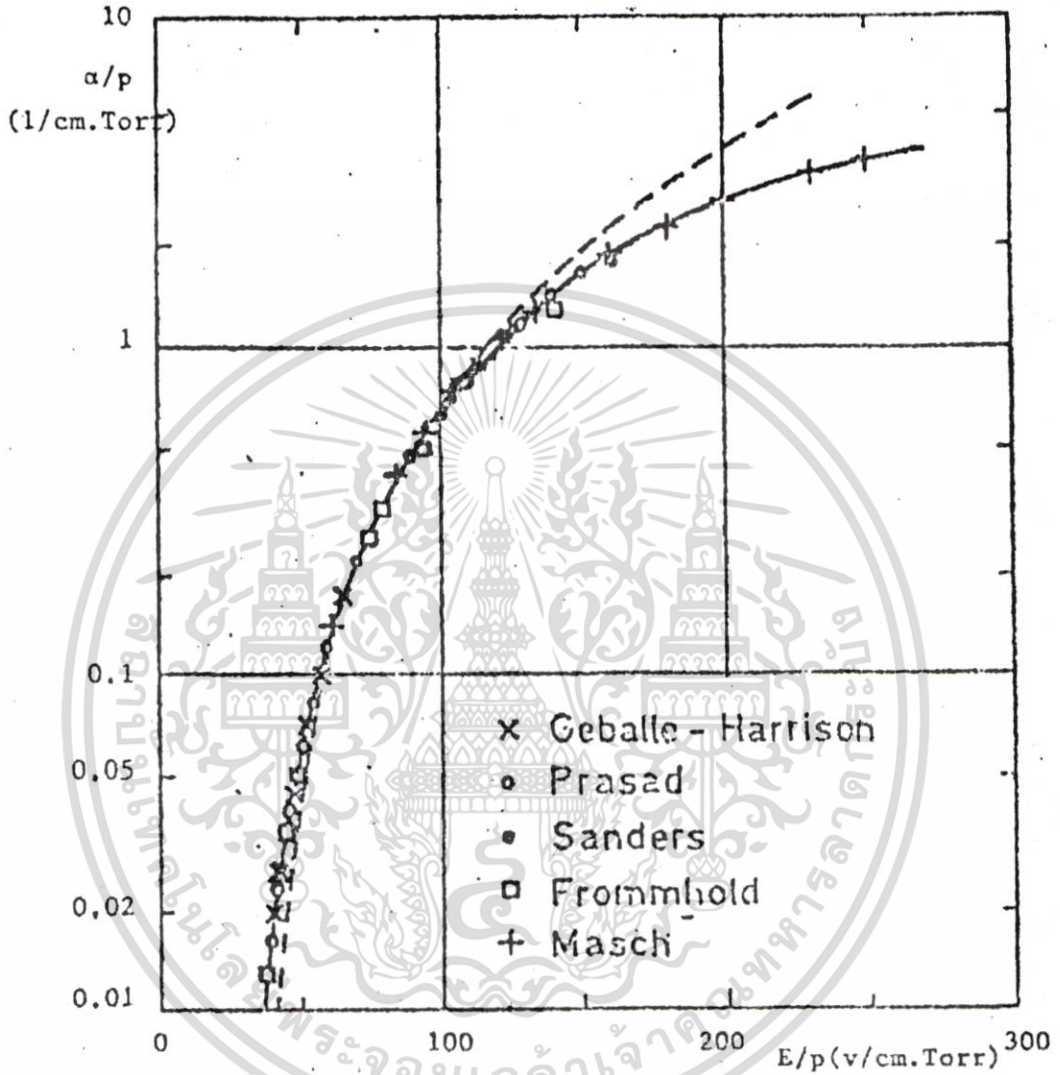
α/p ของอากาศดังรูปที่ 6.6 จะได้ค่า $c = 0.191 \text{ Kv}^{-2}$ และ E_c^0 เท่ากับ 24.4 Kv/cm

ดังนั้นจากสมการทั่วไปจึงเขียน α/p ของอากาศได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\alpha/p}{p} = \frac{0.191(E - 24.4)}{p} \quad (6.7)$$



_____ $\alpha/p = \exp(p_01(E/p))$
 - - - - - สมการของชุกมันน์ $\alpha/p = 1.43 \times 10^{-4} (E/p - 32.5)^2$
 รูปที่ 6.6 สัมประสิทธิ์การไอออไนเซชันของอากาศ

ที่ความดันอากาศ p และระยะยก d (สนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ) ค่าแรงดันเบรกดาวน์อากาศได้

โดยใช้เงื่อนไข $\alpha d = K$ แทนในสมการ (6.7) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_u = 24.4pd + 2.29\sqrt{pd} + K \quad (6.8)$$

Zaeng ได้วิเคราะห์ค่า K จากเส้นกราฟ α/p ของชุนันน์ และได้ค่า K ของอากาศเท่ากับ 8.63
 นั้นสมการ(6.8) จึงเป็น

$$V_u = 24.4 pd + 6.72\sqrt{pd} + K_v \quad (6.9)$$

ค่าแรงดันเบรคดาวน์ที่หาจากสมการนี้ถูกต้องใกล้เคียงกันมากกับค่าที่ได้จากการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

การเบรคดาวนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

คุณสมบัติที่สำคัญของสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอคือ การกระจายของความเข้มสนามไฟฟ้าในช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดไม่เท่ากัน ถ้าอิเล็กโทรดมีรูปร่างเหมือนกัน สนามไฟฟ้าจะมีค่าสูงมากที่สุดที่ผิวอิเล็กโทรดและมีค่าต่ำสุดที่จุดกึ่งกลางระหว่างอิเล็กโทรด ถ้าอิเล็กโทรดมีรูปร่างต่างกัน ความเข้มสนามไฟฟ้ามีค่าสูงที่ผิวของอิเล็กโทรดที่มีรัศมีความโค้งของอิเล็กโทรดมาก

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าดิสชาร์จมีสองแบบคือ แบบสนับสนุนตัวเองได้ และแบบสนับสนุนตัวเองไม่ได้ (self sustaining and non-self-sustaining) ดิสชาร์จที่จะเกิดขึ้นในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอจะเป็นไปได้สามกรณีดังนี้

- 1) ละวาลานซ์ เริ่มแรกก๊าซช่องว่างได้อ่างสมบูรณ์และหลังจากนั้นเกิดการไอออไนซ์ของสตรีมเมอร์มาก ตัวไอออนที่อยู่ในช่องว่างถูกทรงกอนน้อยกว่ารัศมีของลูกทรงกลม
- 2) ละวาลานซ์เริ่มแรกก๊าซช่องว่างไปบางส่วนเท่านั้น แต่หลังจากเกิดการไอออไนซ์ของสตรีมเมอร์ ความเข้มสนามในส่วนช่องว่างที่เหลือนั้นมีส่วนช่วยทำให้ สตรีมเมอร์ขยายตัวไปถึงอิเล็กโทรดตรงกันข้าม
- 3) ละวาลานซ์ เริ่มแรกก๊าซช่องว่างไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้นและการไอออไนซ์ของสตรีมเมอร์ไม่สามารถขยายตัวไปถึงอิเล็กโทรดตรงกันข้ามได้ ซึ่งดิสชาร์จแบบนี้เรียกว่า โครนาดีสชาร์จ (corona discharge) บางส่วนของช่องว่างยังไม่ได้เกิดการไอออไนซ์เช่นนี้ ดังนั้นกระแสในช่องว่างจึงมีค่าไม่สูงมากนัก เหมือนกับการเบรคดาวน ในการที่จะทำให้เกิดการเบรคดาวนในช่องว่างได้ในกรณีนี้ต้องเพิ่มศักดาให้สูงขึ้นไปอีก

สนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการดิสชาร์จในแบบที่ 1 และ 2 เรียกว่าสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมออย่างอ่อน (weakly non-uniform field) ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมออย่างอ่อนนี้ไม่มีการไอออไนซ์ของโครนาและดิสชาร์จที่เกิดขึ้นจะนำไปสู่การเบรคดาวนภายในช่องว่าง สนามไฟฟ้าที่มีการดิสชาร์จแบบที่ 3 เรียกว่าสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมออย่างเข้ม (sharply non-uniform field) และมีการไอออไนซ์ของโครนาเกิดขึ้น ศักดาไฟฟ้าเบรคดาวนมีค่าสูงกว่าศักดาที่ทำให้เกิดโครนามากและตัวของอิเล็กโทรดมีผลต่อการดิสชาร์จในแบบหลังนี้ด้วย

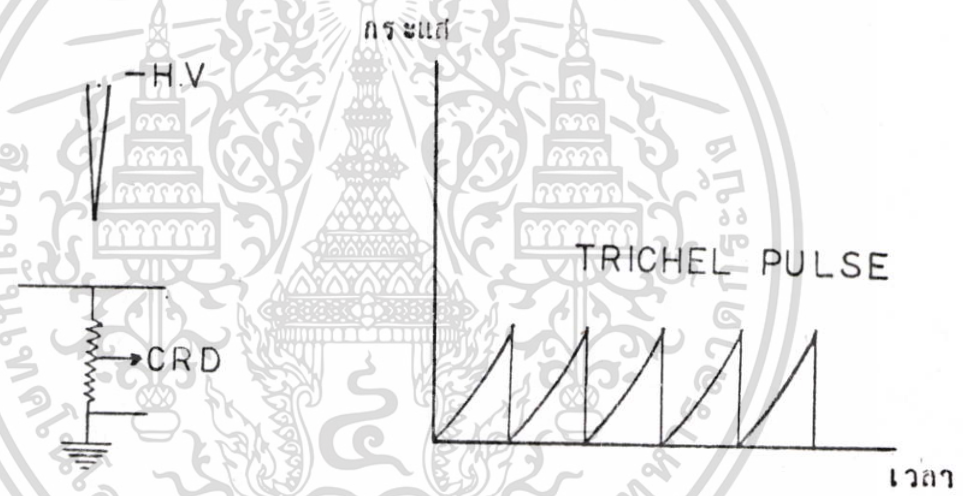
7.1 โครนาดีสชาร์จ (corona discharge)

โครนาดีสชาร์จที่เกิดขึ้นในส่วนช่องว่างให้ทั้งแสงและเสียงออกมา ศักดาไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น ๆ ใ้ค่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โตโรนาค่ากว่าศักดาไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรคดาวน์ปรากฏการณ์โตโรน่าเกิดขึ้นในสนามไม่สม่ำเสมออย่างเข้ม และเมื่อเกิดโตโรน่าขึ้นในสายส่งทำให้เกิดพลังงานสูญเสียในสายส่ง นอกจากนี้โตโรน่ายังทำให้ถนนเสื่อมสภาพด้วยเนื่องมาจากการกระแทกของไอออนที่ผิวของถนน และเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีอาจเกิดขึ้นระหว่างการดีสชาร์จ และยังมีผลต่อระบบสื่อสารด้วย

7.1.1 โตโรน่าของปลายแหลมข้าวอบและระนาบ

เครื่องมือสำหรับศึกษาโตโรน่าประกอบด้วย ช่องว่างแบบปลายแหลมข้าวอบและระนาบโตโรที่ปลายแหลมต่อกับศักดาไฟฟ้าข้าวอบ และระนาบต่อลงดินผ่านความต้านทาน ดังรูปที่ 7.1 และ รูปคลื่นของศักดาไฟฟ้าที่วัดพร้อมความต้านทานที่ได้จากจอร์จหรือโอสโคปแสดงในรูปที่ 7.2



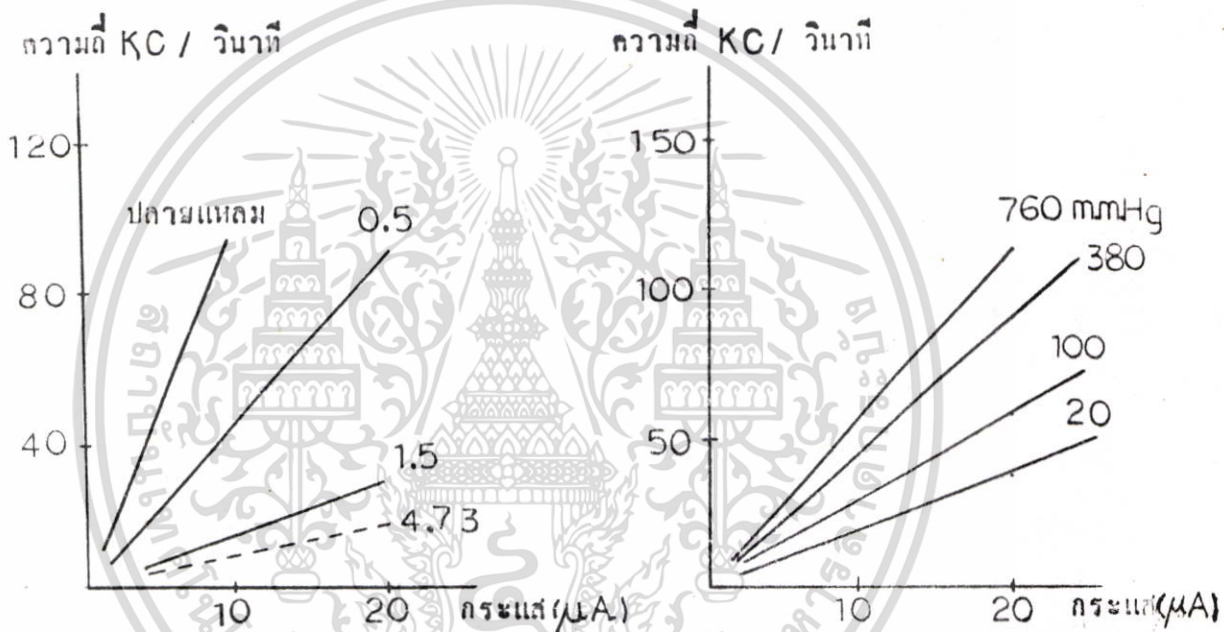
รูปที่ 7.1 การต่อวงจรเพื่อศึกษาโตโรน่า

รูปที่ 7.2 พัลส์ของปลายแหลมข้าวอบและระนาบ

กระแสโตโรน่าที่เกิดขึ้นเป็นพัลส์แบบสม่ำเสมอ ซึ่งความถี่ที่เพิ่มขึ้นตามขนาดของกระแสตามความถี่ของพัลส์ (pulse) ไม่ต่อเนื่องอยู่กับระยะช่องว่าง แต่ขึ้นอยู่กับปลายแหลมของความแหลมความถี่จะมากขึ้นถ้าปลายแหลมมากขึ้น Trichel ได้ทำการศึกษาโตโรน่าข้าวอบ ดังนั้นพัลส์ที่เกิดดังรูปที่ 7.2 จึงมีชื่อว่าพัลส์ของ Trichel ความถี่ของพัลส์เพิ่มขึ้นเมื่อศักดาไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และกระแสที่ขนาดของพลาสมาแหลมต่าง ๆ กันแสดงได้ดังรูปที่ 7.3 รูปที่ 7.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และกระแสที่ความดันต่าง ๆ กัน ความถี่มากขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้น Trichel ได้สามารถเกิดพัลส์สม่ำเสมอของโตโรน่าข้าวอบไว้ดังนี้ ไอออนบวกใด ๆ ใดวิ่งเข้ามาที่ปลายแหลม เมื่อสนามไฟฟ้าที่ปลายแหลมสูงมากพอที่จะทำให้ไอออนบวกมีความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

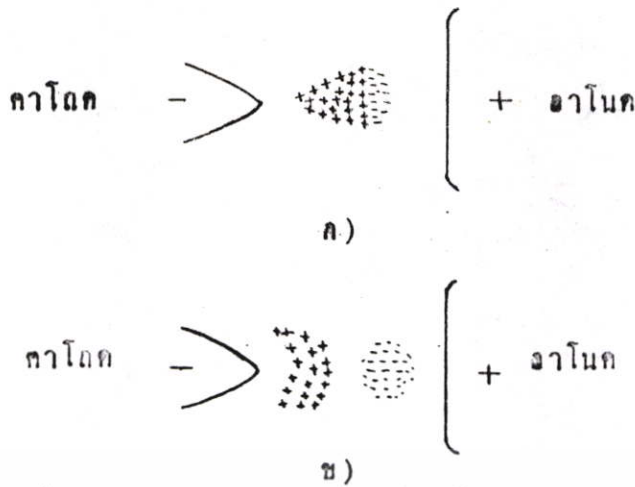
เร่ง และเมื่อชนกับคาโอดทำให้เกิดอิเล็กตรอนหลุดออกมา อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นทำให้เกิดไอออนใน เซ็นตัวส กลไกของ Townsend ที่บริเวณปลายแหลมดังแสดงในรูปที่ 7.5 ก) โฟตอนที่เกิดขึ้น ที่บริเวณที่มีการไอออนในเซ็น จะทำให้เกิดการหลุดออกจากคาโอดอีกทำให้เกิดอะวาลานซ์ใหม่ เพิ่มขึ้น และกระบวนการเช่นนี้ทำให้กระแสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว กลุ่มของไอออนบวก เกิดขึ้น บริเวณรอบ ๆ ปลายแหลมและกลุ่มอิเล็กตรอนวิ่งไปฟอร์มเป็นไอออนลบโดยกระบวนการรวมตัวกัน (attachment) ดังแสดงในรูปที่ 7.5 ข) การเกิดประจุวภาคของไอออนบวกชั้นนั้น



รูปที่ 7.3 การเปลี่ยนแปลงของความถี่กับกระแส ที่ขนาดของปลายแหลมต่าง ๆ กัน

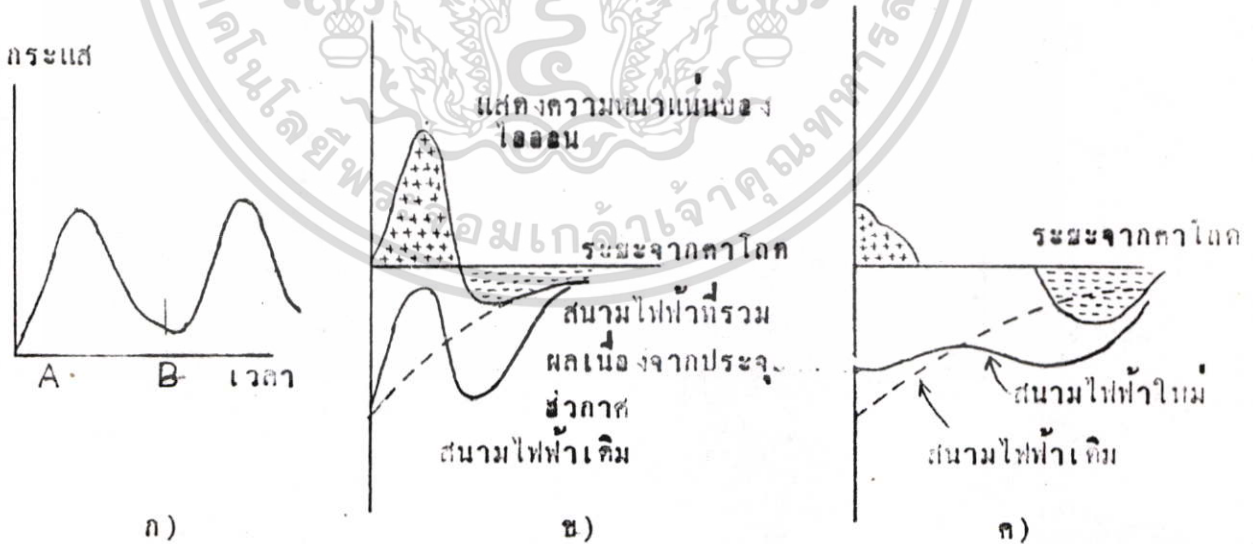
รูปที่ 7.4 การเปลี่ยนแปลงของความถี่กับ กระแสที่ความดันต่าง ๆ กันสำหรับปลาย แหลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 มม.

แม้ว่าจะทำให้สนามบริเวณหน้าคาโอดสูงขึ้นแต่ก็เป็นบริเวณแคบ ๆ เท่านั้น ทำให้อิเล็กตรอนไม่มีความเร่งพอที่จะทำให้เกิดไอออนในเซ็นและการดีสชาร์จก็จะหยุด เมื่อไอออนบวกวิ่งเข้าคาโอด นั้น ไอออนบวกสองสามตัวสุดท้ายอาจมีความเร่งมากพอเมื่อไปชนกับคาโอดทำให้เกิดอิเล็กตรอน หลุดมาอีกตามกระบวนการ ข และกระบวนการก็จะเริ่มเกิดซ้ำใหม่จึงเกิดเป็นพัลส์ดังในรูปที่ 7.2



รูปที่ 7.5 ก) การเกิดไอออนในเข็้นที่บริเวณปลายแหลมหัวลบ
ข) ประจุอากาศที่เกิดขึ้นในช่องว่าง

รูปแสดงการกระจายของประจุในช่องว่างทบนปลายแหลมและระนาบได้แสดงดังรูปที่ 7.6 Hudson และ Bennet ได้สรุปว่าการเคลื่อนที่ของไอออนบวกไปที่ปลายแหลมไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการหลุดซ้งักได้ เขาได้ศึกษาถึงกระบวนการฟอว์มตัวของไอออนลบที่เกิดขึ้นในช่องว่างที่ทำให้การดิษฐ์าร์หลุดซ้งัก ประจุอากาศไอออนลบเพิ่มขึ้นมากอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ประจุไอออนบวกถูกดึงเข้าไปที่ปลายแหลม การฟอว์มตัวของไอออนลบจำนวนมากทำให้สนามไฟฟ้าลดลงและการดิษฐ์าร์จึงหลุดจนกระทั่งประจุอากาศทั้งหมดถูกดึงเข้าไปที่อิเล็กโตรด และกระบวนการเดิมก็เกิดซ้ำขึ้นอีกเช่นนี้จึงทำให้เกิดเป็นพัลส์ซ้ำๆ เสมอขึ้น



รูปที่ 7.6 การกระจายของประจุอากาศในโคโรน่าของปลายแหลมหัวลบ

ก) พัลส์ของ Trichen

ข) การกระจายของประจุอากาศในช่วงเวลา A ของรูป ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณะชนโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์

ค) การกระจายของประจุอากาศในช่วงเวลา b ของรูป ก) รังที่มีการนำไปใช้

7.2 การเบรตควานในสนามไม่สม่ำเสมอ (break down in non-uniform field gap)

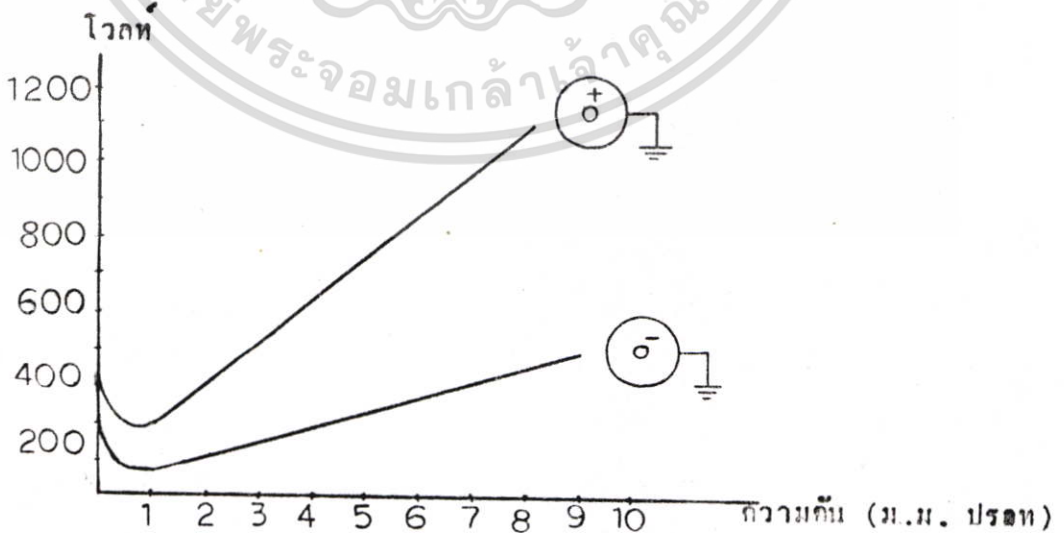
เนื่องจากสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเช่นอิเล็กโตรดปลายแหลมและระนาบ ทวีตทรงกลม ระนาบ สัมประสิทธิ์การไอออนในเซชัน α มีค่าเปลี่ยนแปลงไปภายในช่องว่าง ดังนั้นกฎเกณฑ์การเบรตควานของ Town send สำหรับสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอจึงเขียนได้ว่า

$$\int_0^d \alpha dx [\exp(\int_0^x \alpha dx) - 1] = 1 \tag{7.1}$$

หรือ

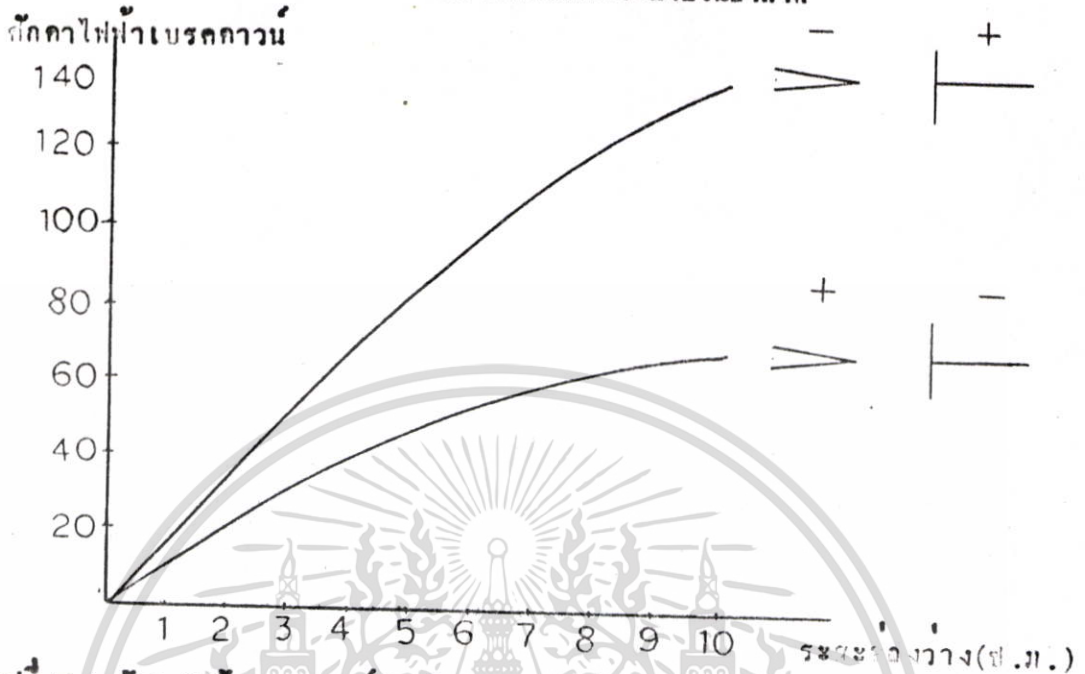
$$\int_0^d \alpha dx = \ln(1 + \frac{1}{\gamma}) \tag{7.2}^*$$

เมื่อ γ คือ สัมประสิทธิ์ การไอออนในเซชันที่ช่องของทวารเส้นผ่าศูนย์กลาง d คือ ระยะกบการเบรตควานในสนามสม่ำเสมอการเบรตควานขึ้นอยู่กับหลายองค์ประกอบ เช่น ความดัน อากาศ อิเล็กโตรด ชนิดของก๊าซภายในช่องว่าง ความชื้นและความถี่ ความดันต่ำ ๆ สักดาไฟฟ้าเบรตควานของอ่าวเล็กที่เป็นลบมีค่าต่ำกว่าอ่าวบวก ดังแสดงในรูปที่ 7.7 ซึ่งเป็นของทรงกระบอกโคเนกเซียล (coaxial cylinder) ที่เป็นเช่นนี้เพราะสนามไฟฟ้าที่สูง ๆ ของคาโอด สัมประสิทธิ์การไอออนในเซชัน γ มีค่าสูงกว่าดังนั้นจากสมการที่ 7.2 ทำให้ พจน์ของเอกโพเนนเชียลมีค่าน้อย สักดาไฟฟ้าเบรตควานของอ่าวบวกจึงต่ำกว่าอ่าวบวก รูปที่ 7.7 แสดงสักดาไฟฟ้าเบรตควานในภาชนะในโตรเจนที่ความดันต่ำของทรงกระบอกโคเนกเซียล



เอกสารรูปที่ 7.7 สักดาไฟฟ้าเบรตควานสำหรับในโตรเจนในทรงกระบอกโคเนกเซียล ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ 0.083 และ 2.3 เซนติเมตร ตามลำดับ

ที่ความดันสูง ๆ สัปดาห์ไฟฟ้าเบรคควานเมื่อชั่วเล็กที่เป็นลบมีค่าสูงกว่าเป็นบวกดังแสดงในรูปที่ 7.8
ซึ่งเป็นสัปดาห์ไฟฟ้าเบรคควานในอิเลคโตรดปลายแหลมและระนาบในอากาศ



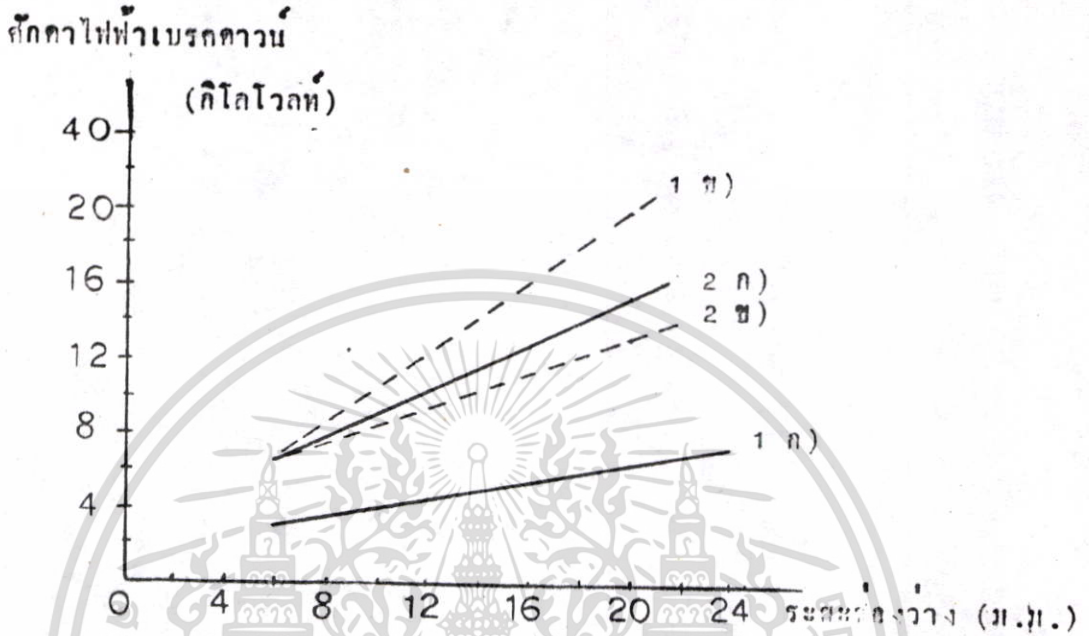
รูปที่ 7.8 สัปดาห์ไฟฟ้าเบรคควานสำหรับอากาศระหว่างปลายแหลม (30°) กับระนาบ

การเบรคควานในสนามแบบไม่สม่ำเสมอที่ความดันสูงนั้นขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของไอออนที่ผิวของอิเลคโตรดเป็นพวกอิเลคโตรดจะตกลงเข้าไปหาภายในและเกิดไอออนในเส้น ทำให้เกิดประจุบวกของไอออนบวกที่ผิวหน้าของอิเลคโตรด ซึ่งเปรียบเสมือนกับอิเลคโตรดที่แหลมมา ดังนั้นสัปดาห์ไฟฟ้าจึงต่ำลง แต่เมื่อชั่วเล็กของอิเลคโตรดเป็นลบ อิเลคโตรดภายในช่องว่างวิ่งไปหาภายในและทำให้เกิดไอออนในเส้นขึ้นในกรณีของกาซแบบรวมตัวกันง่าย อิเลคโตรดที่เกิดขึ้นจะรวมตัวกันกับโมเลกุลเกิดเป็นประจุบวกลบ ภายในสนามไฟฟ้าค่า ส่วนไอออนบวกที่เกิดขึ้นวิ่งเข้าไปหาคาโอด อิทธิพลของของประจุบวกลบทำให้สนามไฟฟ้าที่หน้าคาโอดมีค่าลดลงทำให้เกิดการเบรคควานได้ยากขึ้น ดังนั้นสัปดาห์ไฟฟ้าสำหรับชั่วเล็กที่เป็นลบจึงมีค่าสูงกว่า เมื่อระยะช่องว่าง (gap) มากขึ้น สัปดาห์ไฟฟ้าเบรคควานเนื่องจากชั่วต่างกันก็แตกต่างกันมากขึ้นทั้งนี้เนื่องจากเกิดสนามแบบไม่สม่ำเสมอมากขึ้น ในกรณีของกาซไม่รวมตัวกันง่าย (non-attaching gas) สัปดาห์ไฟฟ้าเบรคควานสำหรับชั่วเล็กที่เป็นลบมีค่าต่ำกว่าชั่วเล็กที่เป็นบวกทั้งนี้เนื่องจากไม่มีการฟอร์มตัวของหกประจุบวกลบเกิดขึ้นรูปที่ 7.9 แสดงสัปดาห์ไฟฟ้าของอิเลคโตรดปลายแหลม ระนาบ ซึ่งสัปดาห์เบรคควานของชั่วเล็กบวกมีค่าสูงกว่าสัปดาห์เบรคควานของชั่วเล็กลบสำหรับอากาศที่ความดันสูง

เพิ่มความชื้นหรือไอน้ำเข้าไปทำให้สัปดาห์เบรคควานของชั่วเล็กบวกมีค่าสูงมากขึ้นดังแสดงในส่วนสัปดาห์เบรคควานของชั่วเล็กบวกไม่เปลี่ยนแปลงมากนักที่เป็นเช่นนั้นเพราะประจุบวกลบที่เกิดขึ้นใน

แม้ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การที่ความชื้นเพิ่มขึ้นทำให้ศักดาไฟฟ้าเบรคควานของฉนวนมีค่าสูงขึ้น

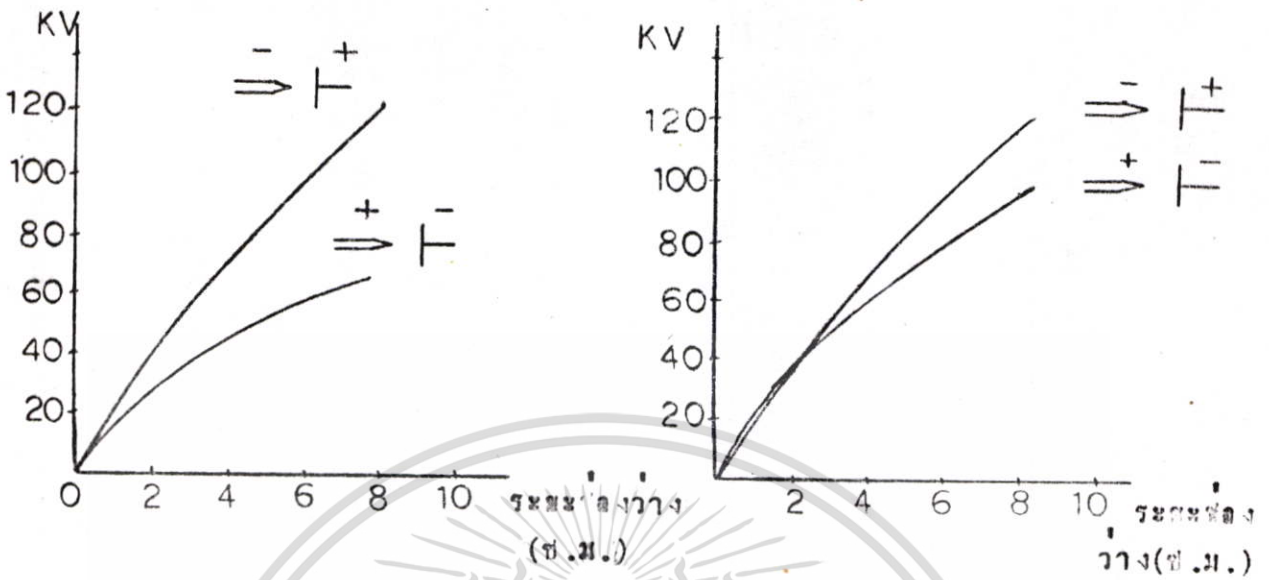


รูปที่ 7.9 ศักดาไฟฟ้าเบรคควานของห้องว่างปลายนทอมกับระยะห่างในลาร์กอน
 ปลายนทอมฉนวน 1 ค) ในลาร์กอนบริษัท 1 ข) ในลาร์กอนผสมไอน้ำ
 ปลายนทอมฉนวน 2 ค) ในลาร์กอนบริษัท 2 ข) ในลาร์กอนผสมไอน้ำ

7.3 เบรคควานในช่องว่างแบบก้าน- ก้าน กับแบบ ก้าน - ระนาบ (rod-rod and rod-plane gap)

ตามที่กล่าวมาว่าศักดาเบรคควานในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอขึ้นต้นอยู่กับความดันชนิดของก๊าซว่าเป็นแบบรวมตัวง่าย เชื้อฟอร์มประจุอากาศลบได้ง่ายหรือไม่ รูปที่ 7.10 แสดงศักดาเบรคควานของอิเล็กโตรดแบบก้านที่มีปลายนต่างกันและระยะห่างในอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.10 สักดาไฟฟ้าเบรคดาวน์ของช่องว่างแบบก้านระนาบในอากาศ

ก) แท่งปลายแหลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 0.4 ซม. และปลายแหลมมาก

ข) แท่งปลายแหลมขนาดเดียวกันแต่ปลายมน

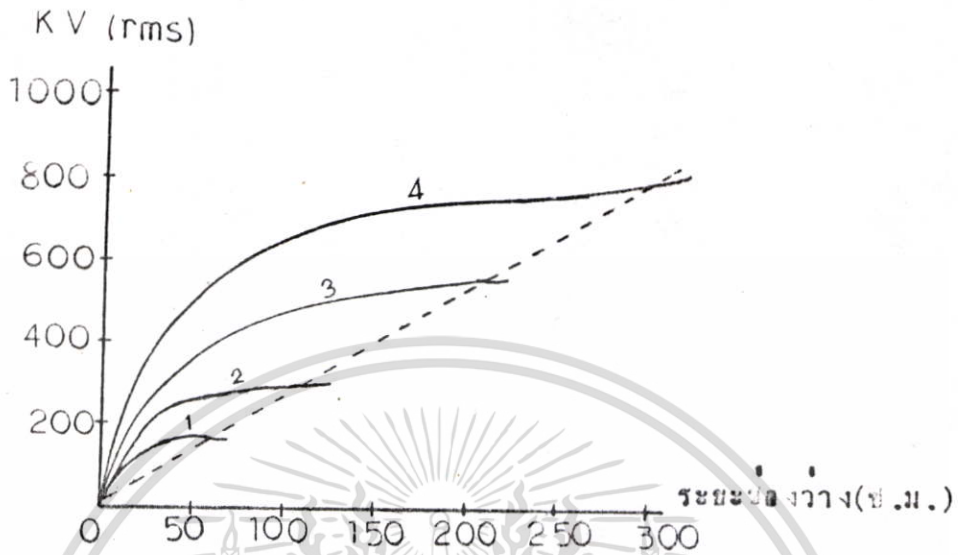
ถ้าระยะช่องว่างมีค่าไม่มากสักดาไฟฟ้าเบรคดาวน์ของช่องว่างแบบ ก้าน-ระนาบ ขึ้นอยู่กับขนาดของปลายแหลมมากโดยเฉพาะเมื่อหัวของปลายแหลมเป็นบวก ทั้งนี้เพราะประจุบวกอากาศบวกที่เกิดขึ้นหน้าปลายแหลมมากมีลักษณะอันยาวออกมา ทำหน้าที่คล้ายอิเล็กโตรดมากกว่าปลายแหลมแบบมน สักดาไฟฟ้าเบรคดาวน์จึงต่ำกว่า เมื่อเป็นหัวบวกปลายแหลมมาก

ในรูปที่ 7.10 ข) กราฟของก้านหัวบวกและลบติดกัน โดยที่สนามไฟฟ้าเปลี่ยนจากแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอแบบก่อนเป็นสนามไม่สม่ำเสมอแบบเข้มขึ้น ทางด้านหัวบวกของจุดตัดไม่เกิดโคโรนาก่อนการเบรคดาวน์ ส่วนทางด้านหัวลบจะเกิดโคโรนาคือสว่างขึ้นและเมื่อเพิ่มสักดาไฟฟ้าให้สูงมากขึ้นจึงเกิดการเบรคดาวน์

ถ้าระยะช่องว่างมีค่ามากขึ้น ขนาดของปลายอิเล็กโตรดจะไม่ค่อยมีอิทธิพลต่อสักดาไฟฟ้าเบรคดาวน์ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากนัก รูปที่ 7.11 แสดงสักดาไฟฟ้าเบรคดาวน์ของทรงกลมและระนาบด้วยขนาดของทรงกลมต่าง ๆ กันซึ่งเป็นการอธิบายว่าขนาดของปลายอิเล็กโตรดไม่มีความสำคัญเมื่อระยะช่องว่างมากขึ้นเห็นประจักษ์ในรูป 7.11 แสดงสักดาไฟฟ้าเบรคดาวน์ของช่องว่างแบบปลายแหลม - ระนาบ และในรูปที่ 7.12 แสดงสักดาไฟฟ้าของอิเล็กโตรดแบบก้าน - ก้านกับแบบ ก้าน - ระนาบ เมื่อใช้สักดาไฟฟ้ากระแสสลับ

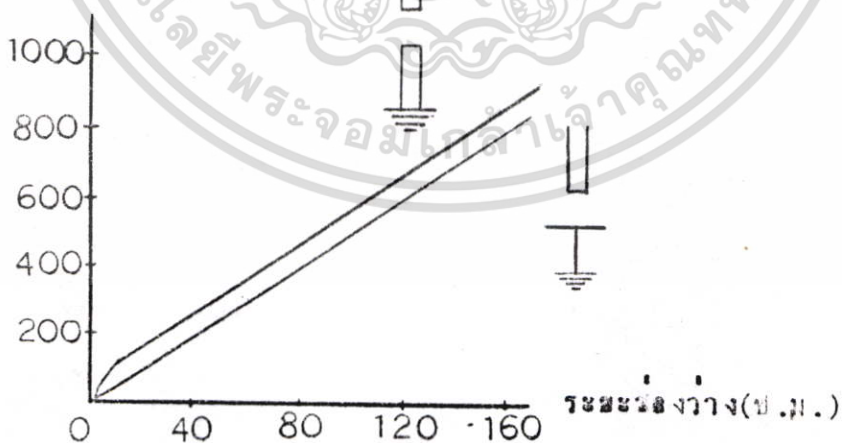
ช่องว่างแบบก้าน-ก้านมีประโยชน์ในการป้องกันความในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้ โดยช่องว่างแบบ ก้าน-ก้าน นั้นทนทานกับแรงดันไฟฟ้าขึ้นเพื่อการศึกษาย่างนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

flashover บนฉนวนดังนั้นการศึกษาใช้ฟ้าเบรตดาวน์ของช่องว่างแบบก้าน- ก้านจึงมีความสำคัญ



รูปที่ 7.11 พิกัดไฟฟ้าเบรตดาวน์ของช่องว่างแบบทรงกลมและระนาบที่ความถี่หัวใจด้วย เส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมต่าง ๆ กันดังนี้ 1-12.5 ซ.ม., 2-12.5 ซ.ม., 3-50 ซ.ม., 4-75 ซ.ม.

รูปที่ 7.12 แสดงพิกัดไฟฟ้าเบรตดาวน์ของอิเล็กโตรดแบบ ก้าน-ก้าน กับแบบ ก้าน-ระนาบเพื่อ ใช้พิกัดไฟฟ้ากระแสสลับ



รูป 7.12 พิกัดไฟฟ้าเบรตดาวน์ที่ความถี่หัวใจ

ก) ช่องว่างแบบก้าน-ก้าน

ข) ช่องว่างแบบก้าน-ระนาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามที่ได้อธิบายมาแล้วเกี่ยวกับศักดาไฟฟ้าเบรคดาวน์เนื่องจากอิเลคโตรดตัวบวกและตัวลบมีค่าต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซ ถ้าเป็นก๊าซโมเลกุลที่รวมตัวกับอิเลคตรอนเพื่อเป็นไอออนลบได้ง่าย ศักดาไฟฟ้าของอิเลคโตรดตัวลบมีค่าสูงกว่าตัวบวกดังรูป ก), ค) และ ง) เพราะไอออนลบที่เกิดขึ้นมีมวลมากดังนั้นจึงเกิดไอออนลบได้ยากขึ้น ส่วนรูป ข) ในก๊าซไฮโดรเจนการฟอร์มตัวของไอออนลบเป็นไปได้ยากกว่าจึงไม่มีประจุของอวกาศของไอออนลบ ที่ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าค้างในกรณีที่มีอิเลคโตรดเป็นตัวบวกศักดาไฟฟ้าเบรคดาวน์จึงมีค่าต่ำกว่าตัวลบ ในรูป ก), ค) และ ง) สำหรับอิเลคโตรดตัวบวกศักดาไฟฟ้าเบรคดาวน์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงความดันค่าหนึ่งที่มีความดันไฟฟ้าเบรคดาวน์ตกลงอย่างรวดเร็วแล้วค่อยเพิ่มขึ้นอีกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ สามารถอธิบายได้ดังนี้ พิจารณารูปที่ 7.14



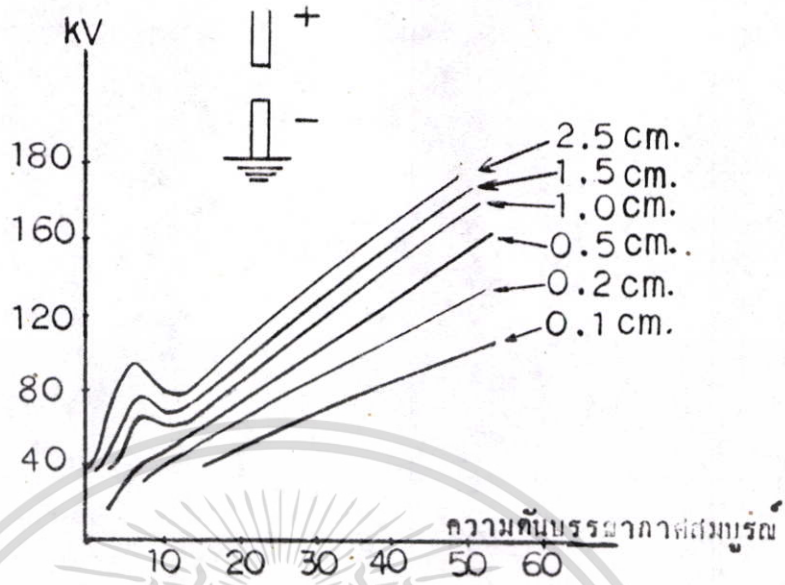
รูปที่ 7.14 การเกิดประจุอวกาศภายในช่องว่างของหลอดหลอดตัวบวกและระนาบ

- ก) การเกิดวอลานซ์ ชึ่งตรงไปถึงคาโนด
- ข) การเกิดสตรีมเมอร์ ภายในช่องว่าง

เมื่อเพิ่มความดันมากขึ้น ความหนาแน่นของไอออนลบก็มากขึ้นที่หน้าคาโนดทำให้ศักดาไฟฟ้าเบรคดาวน์เพิ่มขึ้น แต่เมื่อความดันเพิ่มมากขึ้นจนถึงจุดที่การฟอร์มตัวของประจุอวกาศของไอออนลบไม่เสถียรภาพทำให้ศักดาไฟฟ้าเบรคดาวน์ตกลงอย่างรวดเร็ว สำหรับศักดาไฟฟ้าเบรคดาวน์ของอิเลคโตรดตัวบวกของไฮโดรเจนไม่มีปรากฏการณ์เช่นนี้เกิดขึ้นเพราะไม่มีการฟอร์มตัวของไอออนลบเกิดขึ้น ดังนั้นอิเลคตรอนที่เกิดเนื่องจากไอออนในเซ้นวิ่งไปหาคาโนดอย่างรวดเร็ว

รูปที่ 7.15 แสดงศักดาไฟฟ้าเบรคดาวน์ในช่องว่างแบบก้าน-ก้านลักษณะของสนามไฟฟ้าเบรคดาวน์ในรูปก็คล้ายกับช่องว่างแบบ ก้าน- ระนาบเมื่อระยะช่องว่างมีค่ามากแต่ที่ระยะช่องว่างน้อยไม่มีการลดลงของศักดาไฟฟ้าเบรคดาวน์ เมื่อความดันเพิ่มมากขึ้นทั้งนี้ก็เป็นเพราะที่ระยะช่องว่างน้อยของสนามไฟฟ้าในช่องว่างก็สม่ำเสมอมากขึ้น

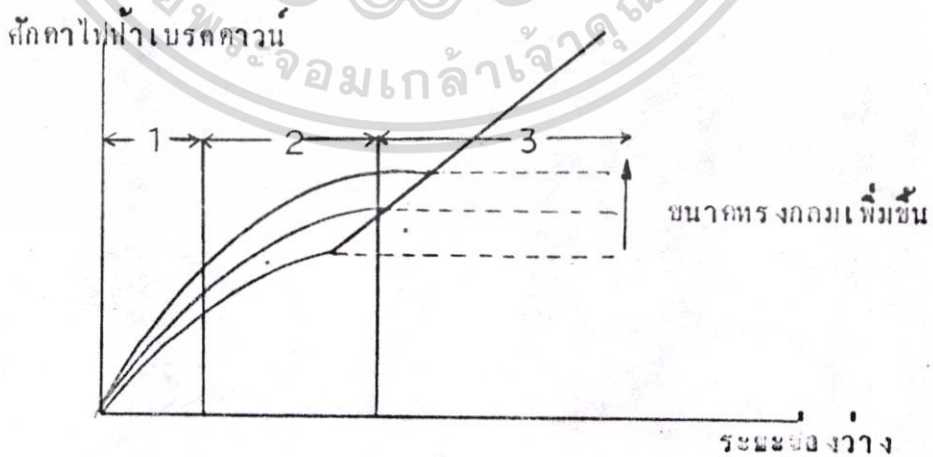
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.15 สักคาไฟฟ้าเบรตความของอิเล็กโตรดชั่ววอกกับความดัน

7.4 การเบรตความในช่องว่างแบบทรงกลมระนาบ

สักคาไฟฟ้าเบรตความของอิเล็กโตรดและชั่ววอกต่างกัน ถ้าเป็นภาวที่นำารรวมตัวกันของโมเลกุลและอิเล็กตรอนได้ง่าย สักคาไฟฟ้าเบรตความของชั่ววอกมีค่าต่ำกว่าชั่ววอกดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้นแนวโน้มคุณสมบัติของสักคาไฟฟ้าเบรตความของช่องว่างแบบทรงกลมและระนาบที่จะกล่าวถึงเป็นของทรงกลมชั่ววอกและระนาบเท่านั้นจึงได้แสดงไว้ในรูปที่ 7.16



รูปที่ 7.16 ความสัมพันธ์ระหว่างสักคาไฟฟ้าเบรตความและระยะช่องว่างของช่องว่างแบบ

ทรงกลม และ ระนาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

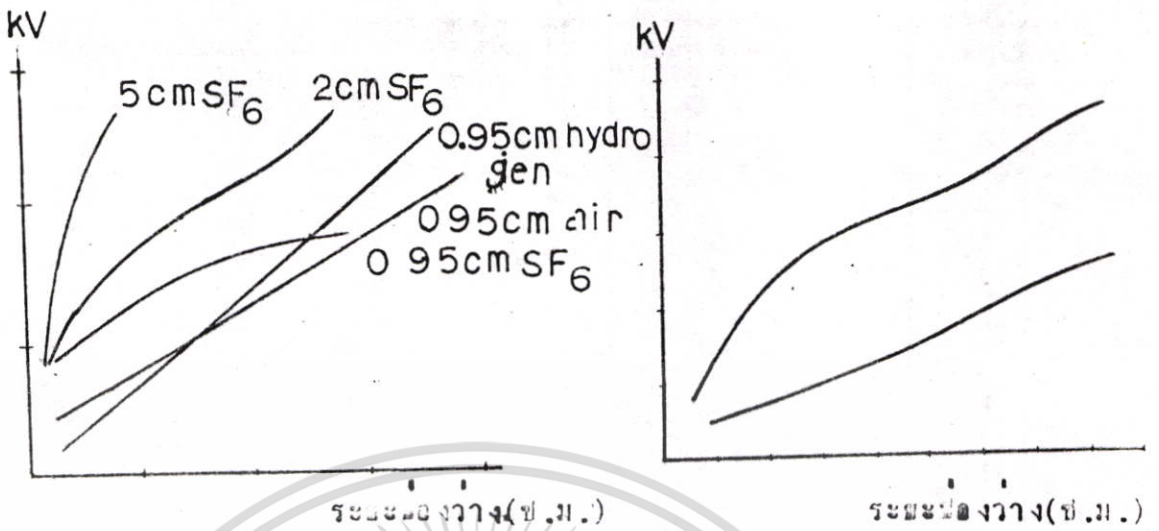
คุณสมบัติของสัปดาห์เบรคตามระยะช่องว่างของทรงกลมและระนาบได้แบ่งออกเพื่อศึกษาเป็น 3 ช่วงดังนี้

ช่วงที่ 1 สัปดาห์ไฟฟ้าเบรคตามเพิ่มขึ้นเมื่อระยะช่องว่างเพิ่มขึ้นช่วงที่ 1 ระยะช่องว่างมีค่าน้อยทำให้สนามไฟฟ้าภายในช่องว่างสม่ำเสมอ(uniform) มาก

ช่วงที่ 2 สัปดาห์ไฟฟ้าเบรคตามเพิ่มขึ้นอย่างช้าเมื่อระยะทางมากขึ้น และสนามไฟฟ้าในช่องว่างนี้เริ่มไม่สม่ำเสมอ นอกจากนั้นสัปดาห์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของทรงกลมเพิ่มมากขึ้นด้วย

ช่วงที่ 3 สนามไฟฟ้าในช่วงนี้เป็นแบบสม่ำเสมอ ดังนั้นเมื่อเพิ่มสัปดาห์ไฟฟ้าสูงจะเกิดโคโรนาก่อน ระดับสัปดาห์ไฟฟ้าโคโรนารับขึ้นกับขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกลม คือมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทรงกลมใหญ่ขึ้น

รูปที่ 7.17 แสดงสัปดาห์ไฟฟ้าเบรคตาม และระยะช่องว่างของทรงกลมและระนาบในก๊าซไฮโดรเจนและ SF_6 โดยใช้ทรงกลมขนาดต่าง ๆ กันซึ่งคุณสมบัติของสัปดาห์ไฟฟ้าเบรคตามเป็นไปตามพอร์มดังรูปที่ 7.16 ส่วนคุณสมบัติสัปดาห์ไฟฟ้าเบรคตามของช่องว่างแบบทรงกลมระนาบเนื่องจากสัปดาห์ไฟฟ้าแบบอิมพัลส์ต่างกันออกไป คุณสมบัติของสัปดาห์เบรคตามและระยะช่องว่างของทรงกลมและระนาบเนื่องจากสัปดาห์ไฟฟ้าอิมพัลส์ได้แสดงไว้ในรูปที่ 7.18 สัปดาห์ไฟฟ้าเบรคตามเนื่องจากทรงกลมฉาบวในรูปที่ 7.18 มีค่าต่ำกว่าทรงกลมฉาบวก็เนื่องมาจากประจุบวกที่เกิดขึ้นที่หน้าทรงกลมทำหน้าที่เหมือนอิเล็กโตรด สิ้นเข้าไปในช่องว่าง การเบรคตามเมื่อทรงกลมเป็นฉาบวเนื่องจากอิมพัลส์เกิดขึ้นโดย leader เริ่มจากอานอนและข้ามไปหาคาโอด ส่วนการเบรคตามของฉาบวมีกลไกการเบรคตามต่าง ๆ กันจากการทดลองเนื่องจากผลงานของ Alibone และ Heek และของ Kuffel และ Abdullah ได้พบว่า leader ที่เริ่มจากคาโอดไม่ได้ข้ามช่องว่างตลอด ในขณะที่ฉาบวกับ leader บวกก็เริ่มจากอานอนและมาต่อกับ leader ลบในช่องว่างและกราฟในรูปที่ 7.18



รูปที่ 7.17 คุณสมบัติของสัปดาห์ฟ้าเบรคดาวน ในอากาศ ไฮโดรเจน และ SF₆ รูปที่ 7.18 คุณสมบัติของสัปดาห์ฟ้าเบรคดาวนเนื่องจากสัปดาห์ฟ้าอิมพัลส์(หน้าคลื่นขนาด 2×10^{-6} วินาที)

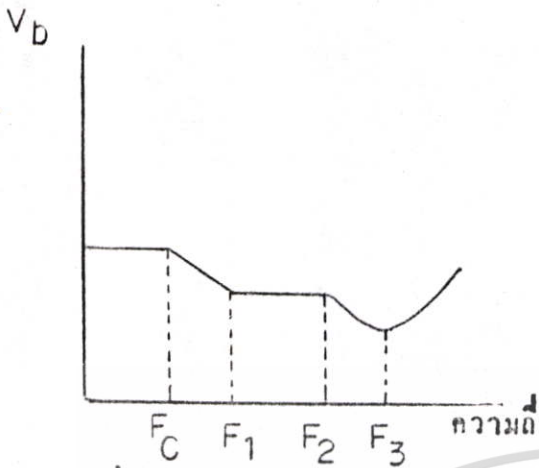
ไม่เรียบเนื่องจากมีทั้ง leader นวคและขบเกิดขึ้นและสัปดาห์ฟ้าเบรคดาวนในช่วงนี้เปลี่ยนแปรปรวนส่วนนักค้นคว้าผู้อื่นได้แสดงให้เห็นว่าการเบรคดาวนเกิดขึ้นโดย leader นวคเริ่มจากระนาบและข้ามช่องว่างไปยังทรงกลมขั้วลบ

7.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสัปดาห์ฟ้าเบรคดาวนความถี่และความขึ้น

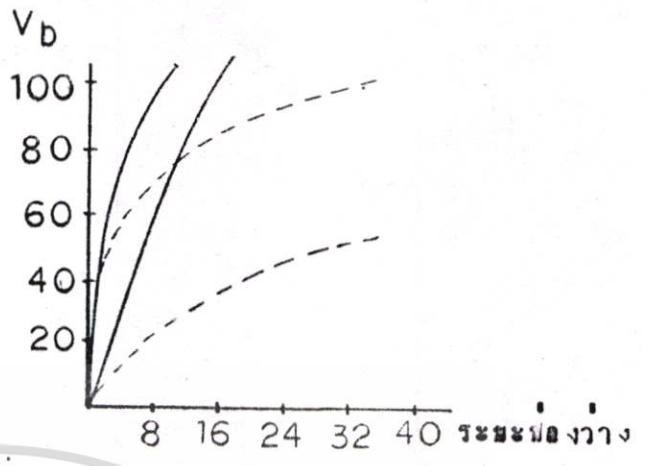
สัปดาห์ฟ้าเบรคดาวนที่ความถี่สูง ๆ ในสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอคล้ายกับแบบสม่ำเสมอซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างสัปดาห์ฟ้าเบรคดาวนและความถี่ที่ได้นำมาเขียนไว้ดังรูปที่ 7.19 คุณสมบัติของสัปดาห์ฟ้าเบรคดาวนและระยะช่องว่างที่ความถี่ต่างกันได้แสดงไว้ในรูปที่ 7.20

ตามที่ศึกษามาแล้วว่าความถี่มีผลต่อสัปดาห์ฟ้าเบรคดาวนในสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ สัปดาห์ฟ้าเบรคดาวนที่ความถี่มากขึ้นนั้นมีความถี่เพิ่มขึ้นทั้งนี้เนื่องจากไอของน้ำทำหน้าที่เป็นภาชนะรวมตัวง่ายทำให้เกิดการฟอร์มตัวของไอออนลบ จำนวนของอนุภาคที่เกิดขึ้นจากการไอออนไนเซชันลดน้อยลง ในสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอ ความถี่มีผลต่อสัปดาห์ฟ้าเบรคดาวนมากนั่นคือสัปดาห์ฟ้าเบรคดาวนมีความถี่สูงขึ้นเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นโดยทั่วไปผลเนื่องจากความถี่ที่มีต่อสัปดาห์ฟ้าเบรคดาวนพิจารณาได้จากการเบี่ยงเบนจากสัปดาห์ฟ้าเบรคดาวนที่ความถี่มาตรฐาน ความถี่มาตรฐานที่ใช้คือ 11 กรัฟของไอไนใน 1 ลูกบาศก์เมตร หรือเทียบได้กับความดันของไอไนเท่ากับ 8.7 มม.ปรอท หรือความถี่สัมพันธ์ 64 % ที่ 20 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.19 สัปดาห์ไฟฟ้าเบรคดาวและควมถี่



รูปที่ 7.20 สัปดาห์ไฟฟ้าเบรคดาวและควมถี่ (ข.ม.)

ทดลอง

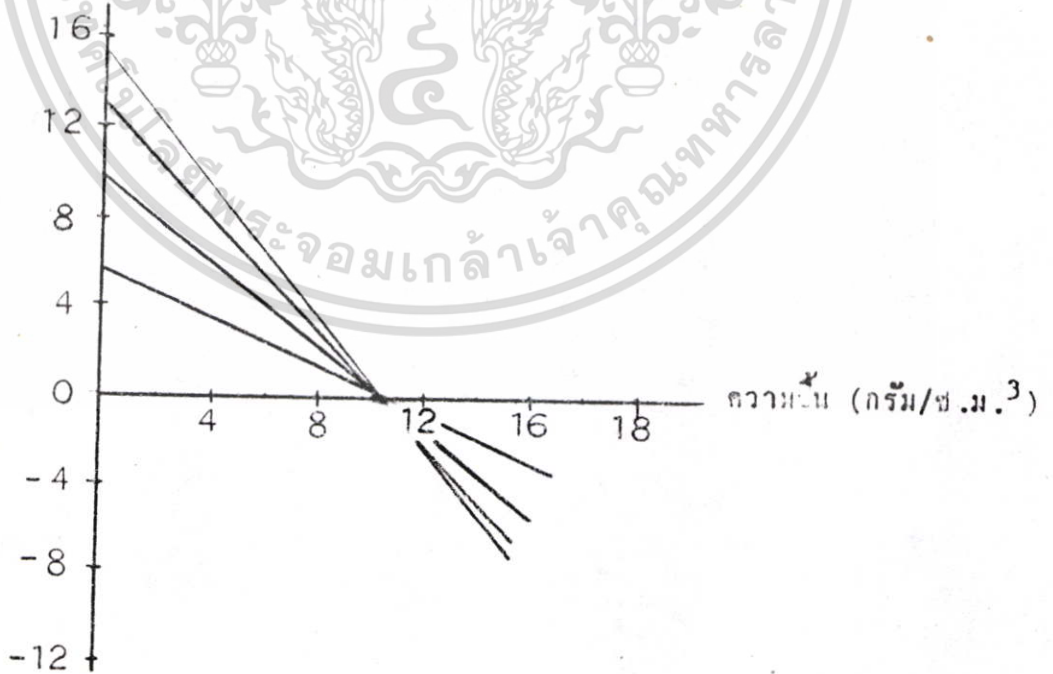
(1,2) ในสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ

(3,4) ในสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอ

ความถี่ 50 Hz/sec

ความถี่ 50 KHz/sec

แปลเตอร์ของหลักวิชา
ไฟฟ้าที่วัดได้



รูปที่ 7.21 กราฟค่าที่วัดได้เนื่องมาจากความชื้นที่แปรเปลี่ยนแบบ ถ้าน-ถ้าน ด้านการค้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงแฟคเตอร์แก้ไข (correction factor) ที่ให้ความเบี่ยงเบนของศักดาไฟฟ้าเบรตดาร์น ให้เป็นศักดาไฟฟ้าเบรตดาร์นที่ความถี่มาตรฐานได้แสดงไว้ดังรูปที่ 7.21 สำหรับช่องว่างแบบ ก้าน ๆ ซึ่งจะเห็นว่าศักดาไฟฟ้าเบรตดาร์นขึ้นอยู่กับการวางของคลื่นศักดาไฟฟ้า หัวของอิเล็กโทรด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8

แพคเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อแรงดันเบรคดาวน์

8.1 แพคเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อแรงดันเบรคดาวน์

แพคเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวน เช่น ระยะยกป, รัศมีความโค้ง r , ลักษณะผิว s_r , ช่วงเวลาป้อนแรงดัน, ความถี่ f , รูปคลื่นแรงดัน, อุณหภูมิ T , ความดันอากาศ p , ความชื้น h , รั้วแรงดันบนอิเล็กโทรดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในพื้นที่ จะอธิบายถึงผลของแพคเตอร์ต่าง ๆ เหล่านี้ที่มีผลต่อแรงดันเบรคดาวน์ของภาพ โดยกำหนดระยะยกปให้

8.1.1 รูปลักษณะอิเล็กโทรด (Electrode configuration)

รูปลักษณะอิเล็กโทรดจะมีผลต่อแรงดันเบรคดาวน์มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะสนามไฟฟ้าเป็นแบบสม่ำเสมอ ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย หรือไม่สม่ำเสมอมาก (ดูข้อ 1.2) ในกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดกับค่าเฉลี่ยจะแตกต่างกันไม่มาก ค่าแรงดันเริ่มต้น (threshold-voltage) กับค่าแรงดันเบรคดาวน์เป็นค่าเดียวกัน กล่าวคือเมื่อระยะเวลาฉนวนชั้วถูกตามเงื่อนไขก็จะเกิดเบรคดาวน์ทันที จะไม่มีไครนาเกิดขึ้นก่อนเบรคดาวน์ จึงเรียกลักษณะเบรคดาวน์แบบนี้ว่า เบรคดาวน์โดยตรง (direct breakdown) เช่น เบรคดาวน์ที่เกิดขึ้นในยกปของทรงกลมที่มีระยะห่างไม่มากนักเมื่อเทียบกับเส้นผ่าศูนย์กลาง ($d < D/2$) ความต่างของรั้วแรงดันมีผลต่อค่าแรงดันเบรคดาวน์เพียงเล็กน้อย

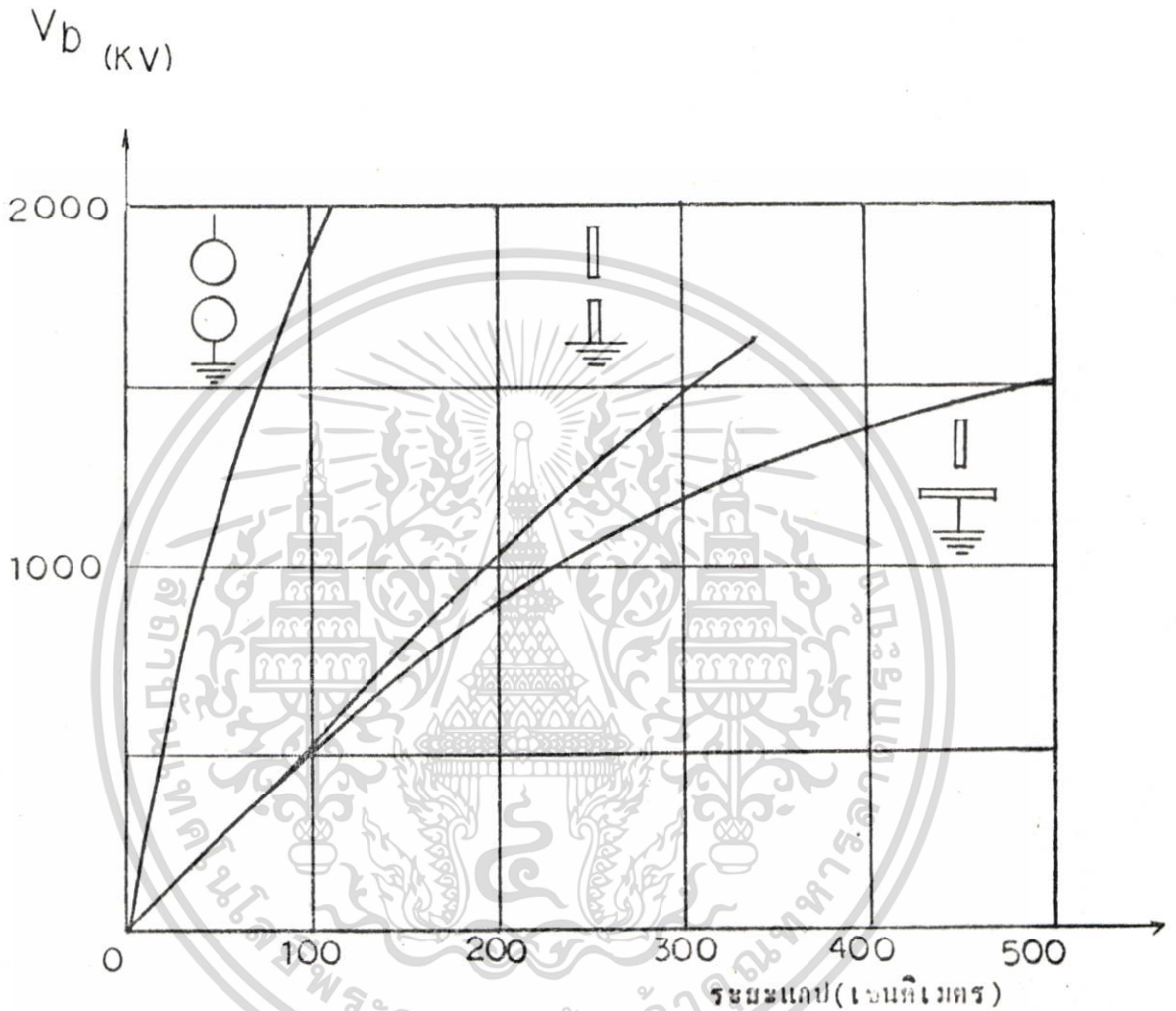
ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (highly nonuniform field) ระยะห่างเมื่อเทียบกับรัศมีของอิเล็กโทรด ค่าแรงดันเริ่มต้นจะต่ำกว่าแรงดันเบรคดาวน์อย่างเห็นได้ชัด ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอแบบสมมาตร เช่น แท่งกลม-แท่งกลมมีปลายเหมือนกัน รูปลักษณะอิเล็กโทรดไม่มีผลต่อแรงดันเบรคดาวน์จะมีผลในกรณีที่มีอิเล็กโทรดเป็นแบบไม่สมมาตรมากๆ เช่น แท่งกลมกับแผ่นระนาบ เบรคดาวน์จะเกิดขึ้นเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด E_m เท่ากับความเครียดสนามไฟฟ้าเบรคดาวน์ E_b นั่นคือแรงดันเบรคดาวน์คำนวณได้จากสมการ (2.6) คือ

$$V_b = E_b \cdot d \cdot n^m$$

เมื่อ d คือ ระยะยกป และ $n^m =$ แพคเตอร์สนามไฟฟ้า

สมการนี้ใช้ได้เฉพาะสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ คือ แบบเกิดเบรคดาวน์โดยตรงเท่านั้น ในกรณีสนาม

ไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง คือ เกิดโคโรนาก่อนเบรคความถี่ สมการ (2.5) นี้ใช้คำนวณแรงดันเบรคความถี่ไม่ได้ แต่ใช้สำหรับคำนวณหาแรงดันโคโรนาเริ่มต้นเท่านั้น สมการ (2.6) ดูข้อ 2.2



รูปที่ 8.1 แรงดันเบรคความถี่เฉลี่ยค่ายอดของกระแสสลับ 50/60 Hz ในอากาศที่สภาวะมาตรฐาน IEC ในเทอมระยะแก๊ป d ของอิลเลคโตรดแบบต่าง ๆ

รีด-ระนาบ V_b ดูในกราฟ

รีด-รีด $V_b \approx 20 + 5.1d$ (KV) d เป็น cm

ทรงกลม-ทรงกลม 200cmφ V_b ดูในกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.1.2 ผลของความหนาแน่นของก๊าซ

จากสมการที่ (3.4) จะเห็นได้ว่าระยะอิสระ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ T และเป็นสัดส่วนกลับกับความดัน p ($\propto T/P$) และในสมการ (4.6) ค่าคงตัว A และ B ก็ สามารถแทนด้วย P/T ได้ ในทางภาคปฏิบัติความหนาแน่นของอากาศมีบทบาทสำคัญต่อการถ่วง กลางแจ้ง (สายส่งไฟฟ้ากำลังสวิตช์เกียร์ในสถานีจ่ายไฟส่ง การทดสอบในห้องทดลอง) บรรณา กาศเปลี่ยนแปลงไม่มากนักจึงถือได้ว่าค่าแรงดันเบรคดาวน์ หรือ วาบไฟ (flashover) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า P/T ซึ่งแสดงถึงความหนาแน่นของก๊าซ ให้ความหนาแน่นของอากาศ $= 1$ เมื่อความดันบรรยากาศ $P=760 \text{ Torr}$, อุณหภูมิ $t = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (ซึ่งเท่ากับ $T=273+20 = 293 \text{ K}$) เป็นสภาวะมาตรฐานของ IEC

$$\text{โดยที่ } V_{50} = V_{50n}$$

โดยที่ V_{50} เป็นค่าแรงดันเบรคดาวน์ที่ความหนาแน่นอากาศ $= 1$
 V_{50n} เป็นค่าแรงดันเบรคดาวน์ที่สภาวะมาตรฐาน

ค่าความหนาแน่นอากาศคำนวณได้จาก

$$= \frac{P/760 \cdot 293/273+t}{1} = 0.386 \frac{p}{273+t}$$

เมื่อ p คือความดันอากาศเป็น Torr

t อุณหภูมิ เป็น $^{\circ}\text{C}$

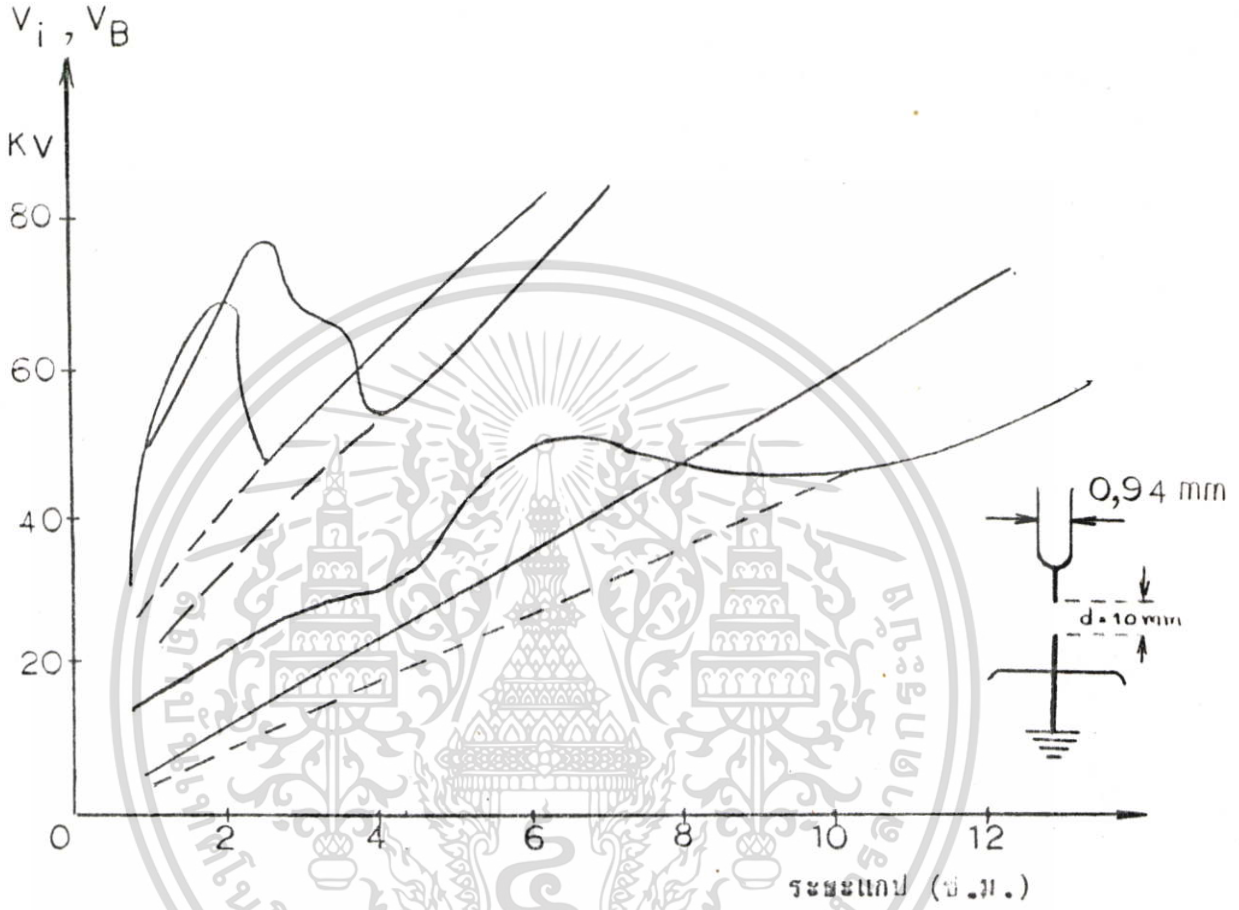
ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอแรงดันเบรคดาวน์จะแปรตามความหนาแน่นอากาศดังในรูป 5.3 แต่ ในกรณีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ คือ ที่ขั้วแคเตอร์สนามไฟฟ้า $E < 20 \dots 30 \times$ ลักษณะของ แรงดันเบรคดาวน์ในเทอมของความดันก๊าซจะมีลักษณะสูงสุด-ต่ำสุด (Maximum - minimum characteristics) กล่าวคือที่ความดันต่ำๆ จะมีโคโรนาเกิดขึ้นก่อนจะเกิดเบรคดาวน์ และ เรียกว่าเบรคดาวน์ตามโคโรนา ถ้าเป็นแบบโคโรนาคงสถานะ (stabilized corona) จะทำให้แรงดันเบรคดาวน์สูงกว่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดมาก แต่เมื่อเพิ่มความดันให้สูงขึ้น โคโรนาคงสถานะจะลดน้อยลงและทำให้ค่าแรงดันเบรคดาวน์ลดต่ำลงด้วย จนกระทั่งค่าแรงดัน เบรคดาวน์และค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดมีค่าเท่ากัน และเป็นความดันที่แรงดันมีค่าต่ำ หลังจาก จุดนี้หากเพิ่มความดันก๊าซต่อไปอีก ค่าแรงดันเบรคดาวน์จะเพิ่มเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความดันก๊าซ ในช่วงหลังจุดแรงดันต่ำสุดนี้ ($p > p_c$) เบรคดาวน์จะเป็นแบบเบรคดาวน์โดยตรง ปรากฏการณ์ ลักษณะแรงดันเบรคดาวน์ในเทอมของความดันก๊าซที่มีลักษณะสูงสุดจะปรากฏเห็นเด่นชัดในกรณีของ ก๊าซประจุไฟฟ้าลบ เช่น SF_6 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ V_{50} ในเทอมของความดัน p ของ SF_6

ในสนามไฟฟ้าระหว่างแท่งปลายมน (rod) กับระนาบ ซึ่งมีขั้วแคเตอร์สนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$n^* = 14 \times$ และในรูป 8.1 แสดงให้เห็นลักษณะสูงสุดต่ำสุดของแรงดันเบรคดาวน์กระแสตรง
 ที่ความถี่ $V_B = f(p)$ ของก๊าซฟลูออรีน (CF_4, Cl_2) ในโตรเจน อากาศ เปรียบเทียบ
 กับของอากาศ SF_6 ซึ่งได้จากสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดปลายเข้มนัดรูป (n^* ต่ำมาก)



รูปที่ 8.2 ลักษณะแรงดันเบรคดาวน์ระหว่างปลายแหลมในอากาศ
 ในโตรเจน ฟลูออรีน และ SF_6

8.1.3 ผลของความชื้นในอากาศ

โมเลกุลของ H_2O ในอากาศมีลักษณะเป็นสารละลายขุ่นๆ เพราะมีอะตอมของออกซิเจน
 ประกอบอยู่ ทำให้อากาศที่มีความชื้นมีความคงทนต่อแรงดันสูงขึ้นตามเท่าที่ความชื้นถึงไม่กลั่นตัว
 เป็นหยดน้ำหรือถึงไม่ถึงจุดน้ำค้าง ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอที่ไม่ดีสฟาร์จก่อน (predischage)
 หรือในแนวของทรงกลม ($d < D/2$) ผลของความชื้นมีผลต่อแรงดันเบรคดาวน์น้อยมากจะได้
 แต่ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอที่เกิดสฟาร์จก่อน ความชื้นที่มีผลต่อค่าแรงดันเบรคดาวน์ และมีผล
 มากที่สุดสำหรับแรงดันกระแสตรง ด้านแรงดันมีช่วงเวลาน้อย เช่น แรงดันอิมพัลส์ความชื้นมีผลต่อ
แรงดันเบรคดาวน์น้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันเบรคความถี่กระแสตรงในแกปของแท่งกระบอกกลม (rod-rod gap) จากผลการทดลองจะให้ความสัมพันธ์ (Zaengl) คือ

$$V_b = (a+bd) \cdot 5.1 \times 10^{-2} (ha+8.65) \text{ KV} \quad (8.1)$$

เมื่อ $a = 20 \text{ KV}$ (สำหรับ DC^+)

$= 15 \text{ KV}$ (สำหรับ DC^-)

$b = 5.1 \text{ KV/cm}$, $d =$ ระยะแกป เป็น cm

$h_u = 4 \dots 40 \text{ g/m}^3$ (ความชื้นสัมบูรณ์)

$=$ ความหนาแน่นอากาศ

ในสมการ (8.1) เป็นค่าแรงดันเบรคความถี่ความชื้นสัมบูรณ์ตามมาตรฐาน IEC (publ, No. 60) คือ $11 \text{ gH}_2\text{O/m}^3$ ซึ่งเท่ากับความชื้นสัมพัทธ์ 64 % ที่ 20°C ความดันอากาศ 760 Torr ถ้าความชื้นเพิ่มขึ้น 5 g/m^3 จะทำให้ V_b เพิ่มขึ้น +6% แต่ถ้าความชื้นลดลง 5 g/m^3 ค่า V_b จะลดลง 7% ซึ่งแสดงว่าแรงดันเบรคความถี่เพิ่มขึ้นหรือลดลงตามความชื้นสัมบูรณ์ในอากาศ ฉะนั้นในการวัดแรงดันเบรคความถี่หรือวาบไฟตามผิว (flashover voltage) ที่สภาวะมีไ้ความชื้นมาตรฐาน ถ้าต้องการเทียบค่าแรงดันเบรคความถี่ V_{b0} นี้กับค่ามาตรฐาน กำหนดจะต้องแก้ค่าที่วัดได้ไปสู่ค่าที่สภาวะมาตรฐาน (V_{bN}) ด้วยตัวประกอบแปลงผันความชื้นในอากาศ (k_h) ซึ่งเป็นสัดส่วนกลับกับความชื้นดังรูปที่ 1 ในภาคผนวกที่ 4 ซึ่งเป็นเส้นกราฟของตัวประกอบแปลงผันความชื้นในอากาศของปลอกฉนวนนำสาย (bushing) ตามมาตรฐาน ANSI ที่กำหนดความชื้นสัมบูรณ์ไว้ 15 g/m^3 ที่อุณหภูมิ 25°C ความดัน 760 Torr ค่า k_h ขึ้นอยู่กับความชื้นสัมบูรณ์ในอากาศ ขึ้นอยู่กับชนิดของแรงดัน (AC, DC หรือ อิมพัลส์ชั่ววอกหรือชั่วลบ) และชนิดของอุปกรณ์ที่ต้องการหาค่าแรงดันวาบไฟตามผิว

8.1.4 ผลของสิ่งเปราะและน้ำฝน

ความล้าพังทลายอย่างเดือวไม่สามารจะทำหน้าที่การฉนวนได้อย่างสมบูรณ์ ทั้งนี้เพราะว่าการฉนวนส่วนมากนอกจากจะต้องรับความเครียดสนามไฟฟ้าแล้วยังต้องรับแรงกลอีกด้วย จะต้องมีการยึดหรือรับน้ำหนักของส่วนที่มีไฟฟ้าในระบบให้อยู่ได้อย่างมั่นคง นั่นคือจะต้องใช้วัสดุฉนวนที่เป็นของแข็งทำหน้าที่ดังกล่าว ตัวอย่างเช่น ใ้ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า (insulators) แบบลูกถ้วยแขวนลูกถ้วยท่อนยาว

ในการยึดสายส่งแรงสูง หรือลูกถ้วยเสา (post insulators) ยึดบัสบาร์ หรือสวิตช์เกียร์ในสถานีจ่ายไฟ เป็นต้น ลูกถ้วยเหล่านี้ติดตั้งอยู่กลางแจ้ง หนึ่งผิวของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าเหล่านี้จะสัมผัสกับน้ำฝนหรือหิมะที่ตกลงมาบนผิวของลูกถ้วย ฉะนั้นเมื่อฝนตกลงมาบนผิวของลูกถ้วยเหล่านี้จะทำให้ความชื้นสัมบูรณ์ในอากาศเพิ่มขึ้น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นี้มีโอกาสที่จะได้รับฝุ่นละอองหรือความเปรอะเปื้อนเกาะอยู่ ดังนั้นความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนดังกล่าวจึงกำหนดด้วยวิธีขึ้นแนวต่อระหว่างภาวกับฉนวนแข็ง โดยทั่วไปความชื้นในอากาศจะทำให้ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าตามผิวฉนวนลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีน้ำค้าง ผลเหล่านี้จะมีมากเมื่อผิวฉนวนมีสิ่งเปรอะเปื้อนสกปรกเกาะอยู่ เช่น เกลือตามชายฝั่งทะเล เขม่าควันละอองเคมีจากโรงงานอุตสาหกรรม ฝุ่นละอองจากถนนหนทาง

ฝุ่นและหมอก เป็นอีกสิ่งหนึ่งที่ทำให้ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าตามผิวฉนวนลดลง ผลของสิ่งเปรอะเปื้อนและน้ำฝนที่ทำให้ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าตามผิวฉนวนลดลงหรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์จากฉนวนแห้งและสะอาดได้โดยประมาณดังต่อไปนี้

ผิวฉนวนแห้งสะอาด เป็น	100 %
ฝน	60-70 %
น้ำค้าง, หมอก	25-50 %
สิ่งเปรอะเปื้อน+หมอก	< 25 % (ขึ้นอยู่กับรูปลักษณะของฉนวน)

8.1.5 ผลของรูปแบบแรงดัน

แรงดันเบรคความชื้นอยู่กับรูปคลื่นของแรงดันดังตัวอย่างในรูป 8.5 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันเบรคความชื้นในอากาศในเชิงกึ่งเส้นของระยะแถบในสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอ และไม่สมมาตร คือระหว่างแท่งกับแผ่นระนาบ (rod-plate) จะเห็นได้ว่า

แรงดันแบบอิมพัลส์สวิตชิ่งซึ่งมีค่าเบรคความชื้นต่ำสุด แรงดันชั่วขณะกระแสตรง (DC⁻) มีค่าเบรคความชื้นสูงสุด แต่สูงกว่าแรงดันเบรคความชื้นอิมพัลส์ (แบบฟ้าผ่า และ สวิตชิ่ง) ซึ่งวลเล็กน้อย ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าความคงทนของอากาศต่อแรงดันชั่วขณะทุกรูปแบบมีค่าใกล้เคียงกัน แรงดันชั่วขณะอิมพัลส์และกระแสตรง (DC⁺) จะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนเชิงเส้นโดยตรงกับระยะแถบแบบอิมพัลส์ฟ้าผ่าซึ่งมีค่าสูงกว่าแบบแรงดันกระแสตรงชั่วขณะเล็กน้อย แต่ชั่วขณะทั้ง 1.2/50 และ DC⁺ มีค่าเบรคความชื้นต่ำกว่าชั่วขณะและสูงกว่าแบบอิมพัลส์สวิตชิ่งชั่วขณะแรงดัน ส่วนแรงดันกระแสสลับความถี่พลังงาน (50-60 Hz) จะมีค่าเบรคความชื้นต่ำๆ กับแรงดันเบรคความชื้นกระแสตรงในแถบที่ระยะห่างไม่เกิน 150 cm ที่ระยะห่างที่กว้างกว่านี้แรงดันเบรคความชื้นกระแสสลับจะต่ำกว่าแรงดันกระแสตรงมากขึ้นเมื่อระยะแถบเพิ่มขึ้น แต่กลับไปใกล้เคียงกับสวิตชิ่งชั่วขณะแรงดันเบรคความชื้นสูงที่แรงดันยังมีผลการวิจัยน้อย แต่โดยทั่วไปแสดงให้เห็นว่าความถี่สูงจากหม้อแปลงเตสลาทำให้ค่าเบรคความชื้นต่ำ แรงดันเบรคความชื้นอิมพัลส์ขึ้นอยู่กับความถี่

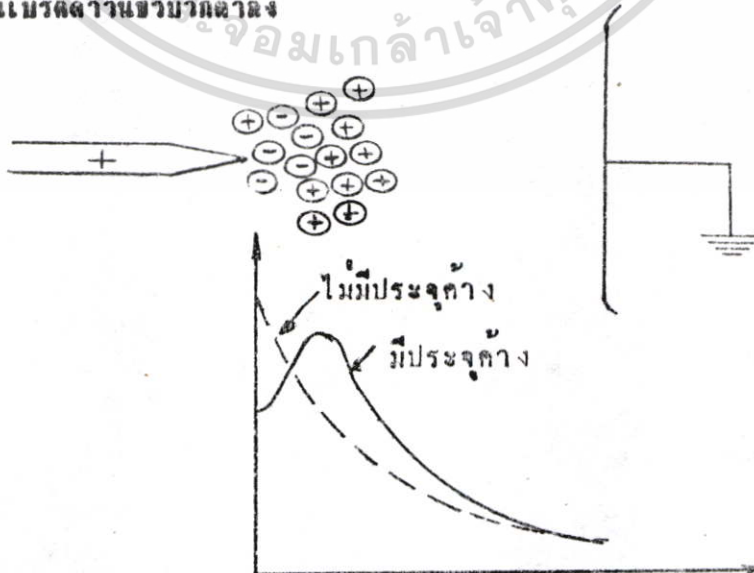
(steepness) ของรูปคลื่นและยังขึ้นอยู่กับชั้นเวกต์รอนด์นิกค์ด้วย

8.1.6 ผลของประจุค้างมีต่อแรงดันเบรคดาวน์ล่าง

ประจุค้าง (space charge) เกิดขึ้นในสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ เป็นผลให้แรงดันเบรคดาวน์ V_b มีค่าสูงกว่าแรงดันโตโรนาเริ่มเกิด (V_i) และผลของประจุค้างทำให้แรงดันเบรคดาวน์ของขั้วบวกและขั้วลบต่างกัน ในทางตรงข้ามกับแรงดันเบรคดาวน์โดยตรง (direct breakdown) กล่าวคือ แรงดันเบรคดาวน์โดยตรงหรือแรงดันเริ่มต้น (threshold voltage, or starting voltage) ของขั้วลบจะต่ำกว่าของขั้วบวกเสมอ แต่ผลของประจุค้างทำให้แรงดันเบรคดาวน์ขั้วลบสูงกว่าขั้วบวกปรากฏการณ์เช่นนี้เกิดขึ้นกับแรงดันทุกรูปแบบ (DC, AC และอิมพัลส์) และในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอของอิลเลคโตรดแบบไม่สม่ำเสมอ ดังตัวอย่างเช่นปลายแหลมกับแผ่นระนาบ การอ้างอิงแรงดันขั้วบวก หรือขั้วลบหมายถึงขั้วแรงดันบนอิลเลคโตรดที่มีความเค้นสนามไฟฟ้าสูงสุด

1) ปลายแหลมขั้วบวก

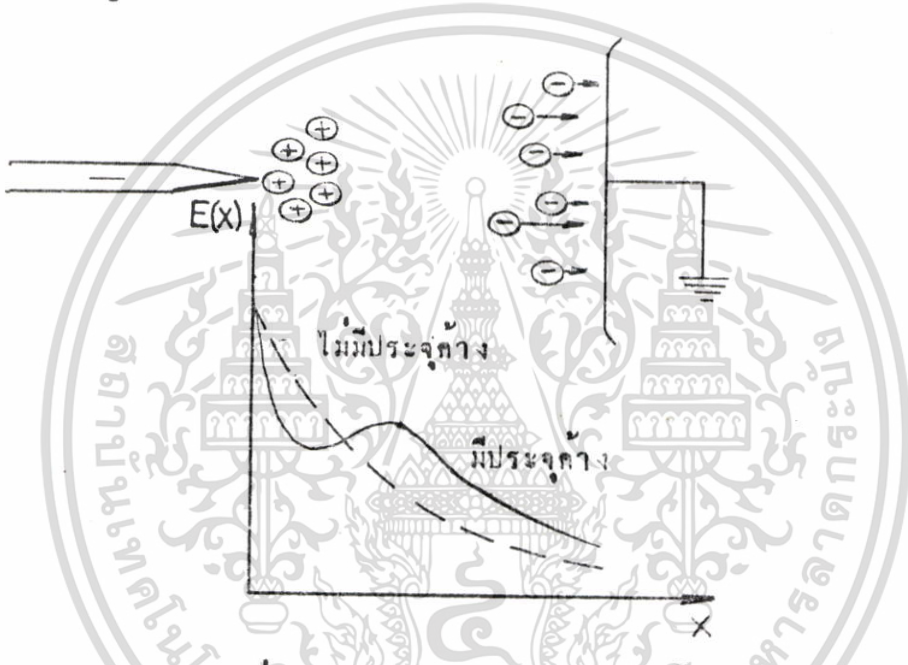
ที่ปลายแหลมเป็นขั้วบวกเค้นกับแผ่นระนาบดังรูปที่ 8.3a เมื่อแรงดันสูงมีค่าแรงดันโตโรนาเริ่มเกิด ภายในปริมาตรของแก๊สจะเกิดไอออนในเข็ญร้อนๆ ปลายแหลม อิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่ได้เร็วจะวิ่งเข้าหาอะโอดคือปลายแหลมและรวมตัวเป็นกลาง ปล่อยให้ไอออนบวกซึ่งเคลื่อนที่ได้ช้าค้างอยู่ที่หน้าปลายแหลม ทำให้สนามไฟฟ้าที่ปลายแหลมมีความเค้นของแต่ความเค้นสนามไฟฟ้าที่ทางเข้าหาอะโอดคือแผ่นระนาบจะมีค่าสูงขึ้น (ดังรูป 8.3b) ประจุไอออนบวกหน้าปลายแหลมเหมือนหนึ่งว่าทำให้อิลเลคโตรดสูงขึ้น เมื่อระยะแก๊สที่ลดลงและเวลาเดียวกับความเค้นสนามไฟฟ้าก็เพิ่มขึ้นเป็นผลให้เกิดเบรคดาวน์ได้ง่ายขึ้น นั่นคือประจุค้างทำให้แรงดันเบรคดาวน์ขั้วบวกต่ำลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไป X ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 8.3 ผลของประจุค้างของปลายแหลมขั้วบวก

2) ปลายแหลมข้าวลบ

ปลายแหลมเป็นข้าวลบตามรูปที่ 8.4a มีอิเล็กตรอนที่เกิดจากไอออนในเซ็นเคลื่อนที่ไปตามระนาบอะโนดซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำ มีอิเล็กตรอนอาจเกาะตัวบนโคมลูกได้และรวมตัวเป็นกลางที่อะโนด ส่วนประจุไอออนบวกเคลื่อนที่ได้ช้าเข้าหาอะโนดปลายแหลมจะค้างอยู่กับบริเวณหน้าปลายแหลม ทำให้สนามไฟฟ้าที่หน้าปลายแหลมมีความเครียดสูงขึ้น (ดูรูป 8.4b) แต่สนามไฟฟ้าระหว่างหมอกประจุค้างกับอะโนด (ระนาบ) จะกลับสม่ำเสมอมากขึ้น เนื่องจากประจุค้าง จึงทำให้เบรคดาวน์ได้ยากขึ้น ฉะนั้นผลของประจุค้างจะทำให้แรงดันเบรคดาวน์ข้าวลบมีค่าสูงขึ้น

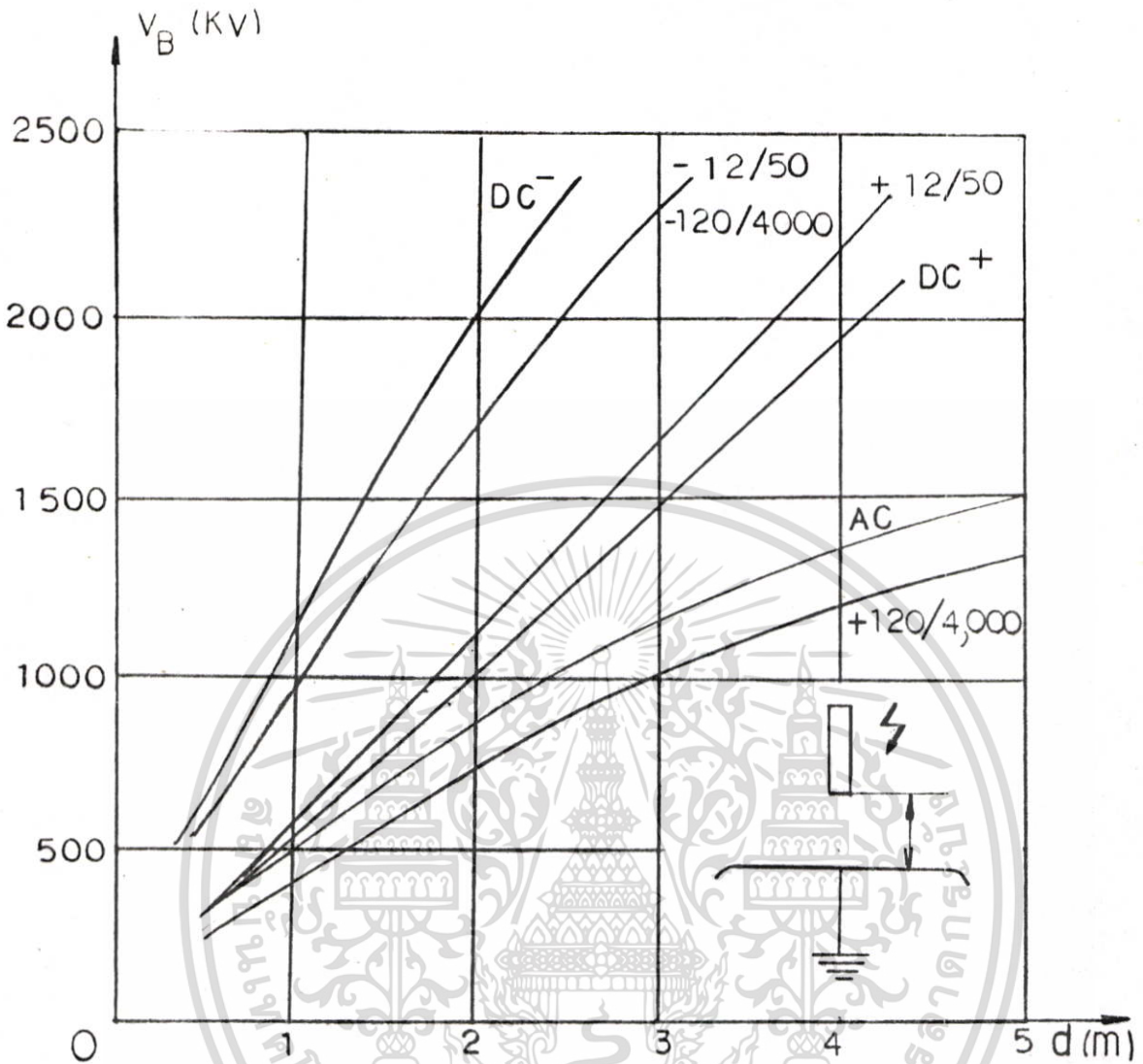


รูปที่ 8.4 ผลของประจุค้างปลายแหลมข้าวลบ

ปรากฏการณ์ผลของประจุค้างขึ้นอยู่กับช่วงเวลาที่ป้อนแรงดัน อยู่ในกรณีของแรงดันกระแสตรง DC และแรงดันกระแสสลับ AC (50-60 Hz) ผลของประจุค้างมีต่อข้าวลบแรงดันเบรคดาวน์เท่ากับแรงดันอิมพัลส์ก็แสดงให้เห็นผลแตกต่างของข้าวลบแรงดันเช่นกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งแรงดันอิมพัลส์ซึ่งยกเว้นแรงดันอิมพัลส์ที่มีช่วงเวลาสั้นมากๆ จะไม่มีผลของประจุค้างดังกล่าว

ที่ความดันสูงๆ เมื่อนำอิเล็กโตรดแบบสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอมาทดสอบ และป้อนด้วยสนามไฟฟ้าให้กับอิเล็กโตรดที่ไม่สม่ำเสมอ สักดาไฟฟ้าเบรคดาวน์เมื่อข้าวลบอิเล็กโตรดที่ไม่สม่ำเสมอเป็นลบมีค่าสูงกว่าเมื่ออิเล็กโตรดที่ไม่สม่ำเสมอเป็นบวก เช่นสักดาไฟฟ้าเบรคดาวน์ในอิเล็กโตรดปลายแหลมกับระนาบในอากาศ การเบรคดาวน์ในสนามแบบไม่สม่ำเสมอที่ความดันสูงนั้นขึ้นอยู่กับประจุอากาศและเมื่อระยะความห่างมากขึ้น (gap) มากขึ้น สักดาไฟฟ้าเบรคดาวน์เนื่องจากข้าวลว้างกันก็แตกต่างกันมากขึ้นทั้งนี้เนื่องจากเกิดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



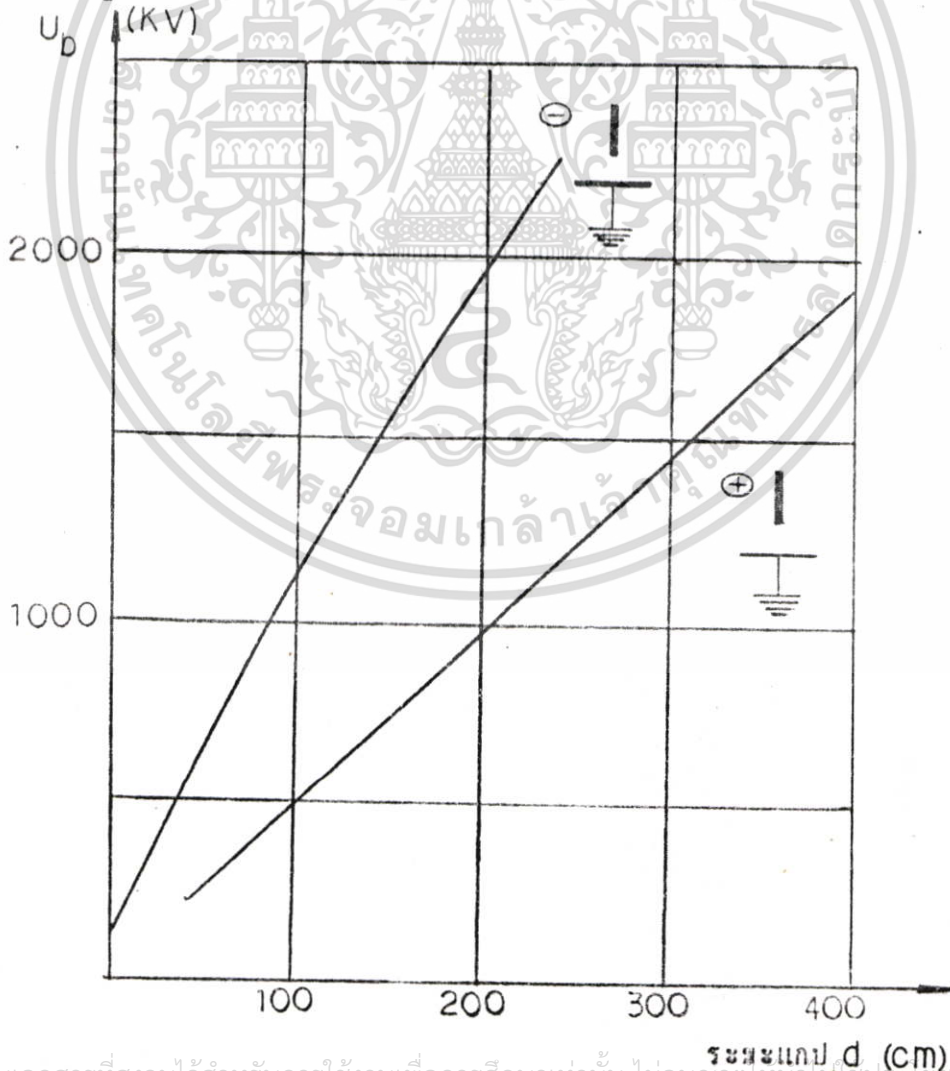
รูปที่ 8.5 แรงดันเบรคตาวาน V_b ของอิเล็กโตรดทรงท่งกับระยะในอากาศ ในเขตของระยะท่ง d เมื่อแรงดันป้อนมีรูปแบบต่าง ๆ ที่ สภาพมาตรฐาน IEC (760 Torr 20 °C 11 gmH₂O/m³)

1. DC บวก (+) , V_b 4.9 d (KV) d เป็น cm
DC ลบ (-) , V_b อ่านจากกราฟ
2. AC (50 Hz) ค่าของ V_b อ่านจากกราฟ
3. อิมพัลส์ฟ้าผ่าขนาด 1.2 /50 μ sec $V_{L_{50\%}}$ = 5.4 d
อิมพัลส์ฟ้าผ่าหัวลบ 1.2 /50 μ sec ดูจากกราฟ
4. อิมพัลส์ฟ้าผ่าครึ่ง 120/4000 μ sec หัวบวกและลบดูจากกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า. ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.1.7 ผลของแผ่นฉนวนบางกั้น

แผ่นฉนวนบางกั้นแต่ไม่มีความพรุนั้นระหว่างมิเชลโตรคแบบสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ โดยให้ระนาบแผ่นฉนวนบางตั้งฉากกับแนวเส้นสนามไฟฟ้า จะช่วยทำให้ค่านั่นทนต่อแรงดันเบรคดาวน์ได้สูงขึ้น แต่ไม่มีผลต่อแรงดันโตรนาเว้เกิด (corona inception voltage) เนื่องจากแผ่นฉนวนบางไม่ทำให้สนามไฟฟ้าเชิงเรขาคณิตเปลี่ยน ตัวอย่างเช่นในแผ่นฉนวนบางกั้นระหว่างปลายแหลมกับระนาบดังรูป 8.6 ผลของแผ่นฉนวนบางกั้นทำให้แรงดันเบรคดาวน์ของแท่งสูงขึ้น เนื่องจากแผ่นฉนวนบางจะกั้นการเคลื่อนที่ของไอออนประจุบวกที่เกิดจากการไอออไนเซชัน ที่บริเวณมิเชลโตรคปลายแหลมมิให้ลี้หนีไป ประจุบวกจะรวมตัวกระจุกอยู่บนระนาบของแผ่นฉนวนบาง ทำให้สนามไฟฟ้าระหว่างหลังแผ่นฉนวนบางกับระนาบมิเชลโตรคเป็นแบบสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ บางความเคียดสนามไฟฟ้าจะลดลง แรงดันเบรคดาวน์จะขึ้นอยู่กับความคงทนของแท่งในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ และขึ้นอยู่กับการวางกั้นของแผ่นฉนวนบางซึ่งอาจจะทำให้ค่านั่นทนแรงดันเบรคดาวน์ได้สูงขึ้นหรือลดลงก็ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ รูปที่ 8.6 แรงดันเบรคดาวน์ V_b กระแสตรงของอากาศในเทอมของระยะแกป

ในการมีของอีเลคโตรดปลายแหลมกับปลายแหลมควาริซึ่งนวนบางกันทั้งสองด้าน (ทางตะโอด
และอะโอด)

ผลของแ่งนวนบางกันทำให้ทณรงคันเขรคควาน้สูงชันในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง แต่
มีผลน้อยในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ มันจะเกิดขึ้นในกรณีนรงคันเป็น DCหรือ AC และอิมพัลส์ชั่ววอก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 9

การออกแบบและการสร้างอิเลคโตรด

เพื่อที่จะทำให้การศึกษาลักษณะของสนามไฟฟ้าของอิเลคโตรด ที่มีผลต่อการเบรคดาวนจึง
จำแนกสนามไฟฟ้าออกเป็นสามแบบคือ

1. สนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ(uniform field)
2. สนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย(slightly nonuniform field)
3. สนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูง(Hightly nonuniform field)

ดังนั้นเพื่อให้ได้สนามไฟฟ้าทั้งสามแบบเราจึงสร้างอิเลคโตรดออกเป็นสามรูปแบบคือ **แผ่น
ระนาบ ทรงกลม และแท่งปลายแหลม**

9.1 การออกแบบอิเลคโตรด

9.1.1. อิเลคโตรดทรงกลม

อิเลคโตรดทรงกลม เป็นทรงกลมมาตรฐานที่ใช้ในห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูง เป็นทรงกลม
ผิวเรียบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 เซนติเมตร



รูปที่ 9.1 แสดงอิเลคโตรดแบบทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 cm ที่ใช้ทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9.1.2. อิเลคโตรดปลายแหลม

ใช้วัสดุทองเหลืองแท่งกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร กลึงปลายแหลมมีมุม 30 องศา และ 60 องศา ขนาดความยาวของแท่ง 24.3 เซนติเมตร



รูปที่ 9.2 แสดงอิเลคโตรดแบบปลายแหลมที่ใช้ทดสอบ

9.1.3. อิเลคโตรดแบบแผ่นระนาบ

หลักการออกแบบเนื่องจากทรงกลมที่ใช้วัดไฟฟ้าแรงสูงมีขีดจำกัดของระยะแกปที่มีผลต่อความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้า ทรงกลมจะให้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอในย่านแกปหนึ่งเท่านั้น ดังนั้น Rowgowski ได้ริบการออกแบบรูปแบบของอิเลคโตรดที่ให้มีผลของสนามไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอ จากทฤษฎีที่แสดงให้เห็นว่า สนามไฟฟ้าเนื่องจากอิเลคโตรดที่เป็นทรงกลมขนาดเท่ากันจะให้ผลของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากที่สุด ในระยะอัตราส่วนระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดต่อรัศมีของทรงกลมน้อยกว่า 1/10 ความเที่ยงตรงของผลการทดลองที่เป็นได้จะอยู่ในเงื่อนไขเท่านั้น ถ้าเกิดสปาร์คในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ แรงดันไฟฟ้าสปาร์คโอเวอร์ (spark over voltage)

จะกำหนดได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

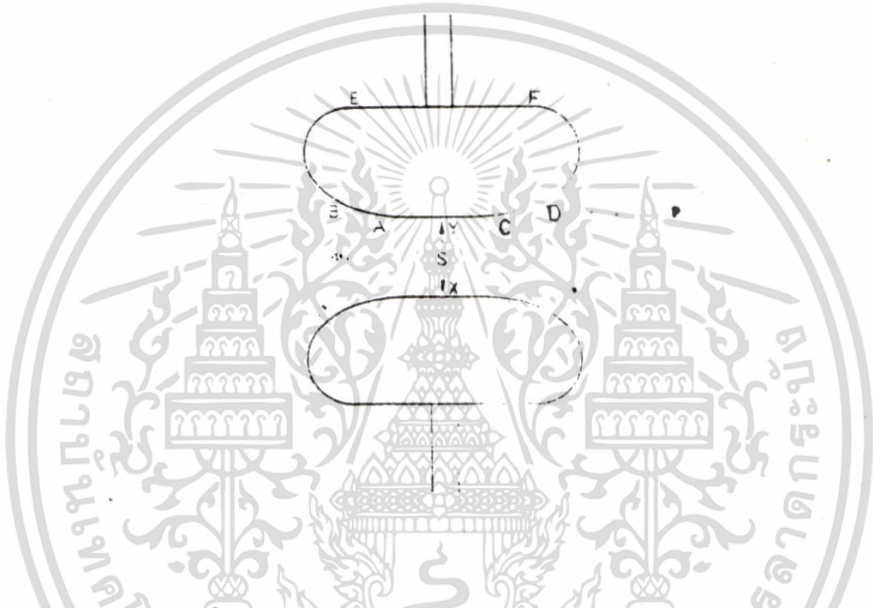
$$V = AS + B/S$$

เมื่อ A และ B คือค่าคงที่

V คือ แรงดันไฟฟ้าสปรอตไอเวอร์

S คือ ระยะนกป

นี่คือขีดจำกัดในการใช้ทรงกลมเพื่อให้อวลของสนามไฟฟ้าที่นกปสม่ำเสมอ



รูปที่ 9.3 แสดงรูปของอิเล็กโตรดแบบ uniform field

รูปที่ 9.3 แสดงให้เห็นถึงการออกแบบอิเล็กโตรดสำหรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz แรงดันสูงถึง 400 kV(peak) เส้นตรง AC เป็นระนาบที่มีความยาวหรือมากกว่าระยะ S และรัศมีของ A ถึง B และ C ถึง D มีค่ามากกว่า 10S เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดสปาร์คที่บริเวณมุมของความโค้ง B ถึง E และ D ถึง F ขนาดของความโค้งควรมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างค่อนเนื่อง ภาสได้รูปแบบที่กล่าวมานี้ได้ทำการทดลองการสปาร์คในถ่านของนกปผลของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ภาสได้สภาวะบรรยากาศปกติ จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีและจากผลการทดลองของ Stephenson ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรคดาวน์ที่ระยะนกปต่างๆ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความดัน 760 mmHg ได้แรงดันเบรคดาวน์เป็น

$$V = 24.4S + 7.50/S \text{ kV(peak)}$$

เมื่อ S คือระยะนกปที่มีหน่วยเป็นเซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการสปาร์ตขึ้นขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของก๊าซ(gas density) ρ ดังนั้นสมการที่แรงดันเบรคดาวน์ที่ขึ้นกับฟังก์ชันความหนาแน่นของก๊าซที่เปลี่ยนแปลงเขียนได้เป็น

$$V = 24.4\rho S + 7.50J/\rho S$$

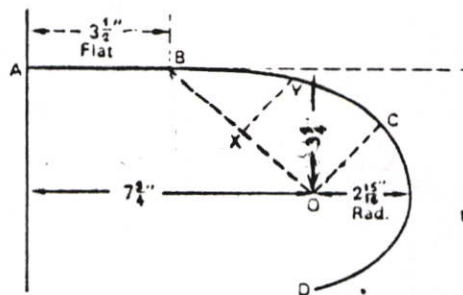
เมื่อ ρ คือความหนาแน่นของก๊าซที่สภาวะบรรยากาศ ปกติจะมีค่าเป็น 1

Bruce ได้ศึกษาคุณสมบัติของอิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอสำหรับไฟฟ้ากระแสสลับสูงถึง 315 kV รูปข้างของอิเล็กโตรดเชิงครึ่งโค้งเดี่ยวของ Bruce ได้แสดงให้เห็นดังรูป 9.1 ส่วนเวียน AB มีขนาดความยาวไม่น้อยกว่าความยาวกบสูงสุดที่ใช้ BC เป็นความโค้งของฟังก์ชัน SINE ที่อยู่บนฐาน OB และ OC โดยที่

$$XY = \frac{OC \sin(BX \cdot \frac{\pi}{2})}{BO} \quad (2)$$

CD เป็นส่วนโค้งของทรงกลมที่มีจุดศูนย์กลางที่ O ตามหลักการของ BRUCE เชื่อที่จะรักษาสภาพสนามไฟฟ้าให้สม่ำเสมอที่ระยะกบที่ห่างกันออกไป ความยาวของผิวเรียบ(flat surface) ที่ 2.25", 4.4", และ 7.8" ไว้สำหรับวัดแรงดันไฟฟ้าสูงถึง 140, 280 และ 420 kV ตามลำดับเหนืออิเล็กโตรดกับแรงดันไฟฟ้า 9 ถึง 315 kV(peak) BRUCE ได้แสดงให้เห็นถึงแรงดันไฟฟ้าเบรคดาวน์ที่ระยะกบ S ในอากาศที่ 25 องศาเซลเซียส ความดัน 760mmHg ในช่วง $\pm 2\%$ ค่าความสัมพันธ์หาได้ดังนี้

$$V = 24.22S + 6.08/S \quad \text{kV(peak)}$$



ดังนั้นเมื่อคำนึงถึงความหนาแน่นของอากาศจะได้สมการเป็น

$$V = 24.22 \rho S + 8.08 / \rho S \quad \text{kV(peak)}$$

จากหลักการที่ได้กล่าวมาแล้วเรานำมาออกแบบอิเล็กโตรดแบบระนาบที่มีผิวเรียบ 3.5 นิ้วและมีส่วนโค้งเป็นไปตามสมการบนอิเล็กโตรดคือ

$$XY = OC \text{ SINE} \left(\frac{BX}{BO} + \frac{y}{2} \right)$$

ทำการคำนวณโดยการเพิ่มค่า BX ไปที่ละ 0.5 cm ได้ระยะ XY แล้วนำมาพลอตเป็นรูปร่างของอิเล็กโตรด เพื่อนำไปทำการสร้างอิเล็กโตรด

การทำอิเล็กโตรดเนื่องจากใช้ทองเหลืองเป็นวัสดุจึงไม่สามารถที่จะหาวัสดุที่มีขนาดใหญ่มาทำการกลึงขึ้นรูปได้ จึงใช้วิธีการตีขึ้นรูป รูปของอิเล็กโตรดแบบระนาบที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 9.5



รูปที่ 9.5 แสดงอิเล็กโตรดแบบแผ่นระนาบที่สร้างขึ้นและใช้ทดสอบ

เมื่อเสร็จแล้วก็ได้นำมาทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า จากผลการทดสอบหาแรงดันเบรกดาวน์

เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากตารางที่ทดสอบโดย BRUCE ซึ่งทดสอบที่สภาวะแวดล้อม อุตสาหกรรม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติเห็นาไปใช้ประโยชน์อื่นใด ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

20 องศาเซลเซียส ความดัน 760 mmHg ค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียง เพราะเนื่องจากเราไม่สามารถควบคุมสภาวะแวดล้อมให้ได้ตามมาตรฐาน และเมื่อไปทดสอบกับมิเตอร์แบบอื่นๆที่ได้ก็เป็นไปตามทฤษฎี

ตาราง 9.1 เปรียบเทียบแรงดันเบรคควานของมิเตอร์แบบของBRUCE กับ มิเตอร์ที่ทำขึ้นเอง

gap length (cm)	แรงดันเบรคควานที่วัดโดย	
	BRUCE	มิเตอร์ที่ทำขึ้นเอง
0.5	16.41	15.54
1	30.30	29.1
2	57.04	56.4
3	83.19	83.4
4	109.00	105.3
5	134.70	130.2
6	160.20	156.6
7	185.60	180.9
8	211.00	209.2

9.2 การดำเนินงาน

เมื่อได้มิเตอร์แล้วได้นำมาทดลองหาการเบรคควานของสนามไฟฟ้าแบบต่างๆถึง 8 แบบ ตามที่ได้กล่าวมาแล้วและได้เปรียบเทียบว่าเมื่อทำการกั๊บตัวของมิเตอร์ทั้งสามแบบแล้ว จะมีผลการเบรคควานอย่างไร เมื่อมีสนามไฟฟ้าเป็นสนามไฟฟ้ากระแสตรงรั้วอบ และสนามไฟฟ้ากระแสสลับและศึกษาของการเบรคควานเปรียบเทียบ ระหว่างปลายแหลมมุม 30 องศา กับปลายแหลมมุม 60 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9.2.1 วิธีการทดลอง

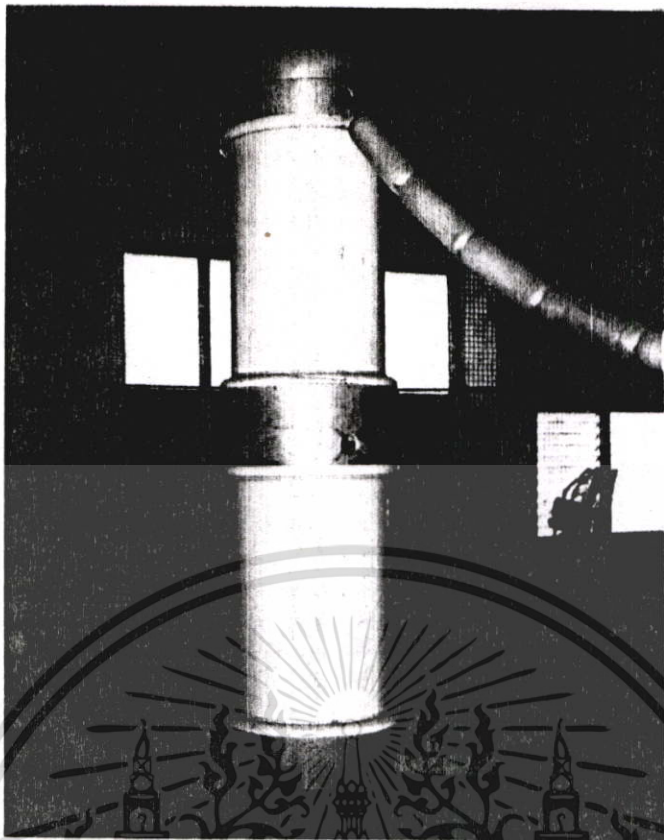
1. การเตรียมตัวก่อนการทดลอง

- 1.1 ก่อนทำการทดลองจะต้องทำความเข้าใจการทำงานของไฟฟ้าแรงสูง เครื่องผลิตแรงดัน เครื่องมิ้ววัด และหลักความปลอดภัยป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นแก่ผู้ทดลอง และอุปกรณ์
- 1.2 ทำการทำความสะอาดอิเล็กทรอนิกส์โดยการฉีดออกไซด์ ความสกปรก ความชื้น โดยทำให้เป็นมันและแห้ง ถ้าให้มีความบริสุทธิ์โดยเลเซอร์บริเวณจุดสปาร์ค
- 1.3 ปรับให้อิเล็กทรอนิกส์สัมพันธ์กันพอดี แล้วตั้งจุดศูนย์ที่แกนหมุนเพื่อปรับระยะห่างอิเล็กทรอนิกส์ให้ได้ตามขนาด
- 1.4 จัดบันทึกสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ก่อนการทดลอง

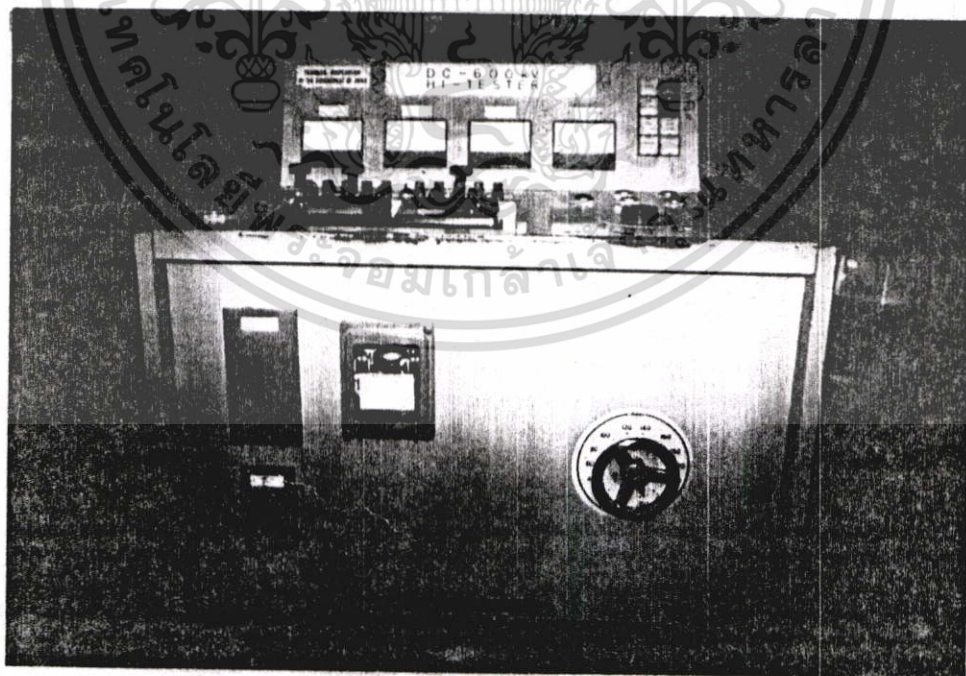
9.2.2 การทดลองด้วยสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง

- 2.1 ปรับระยะห่างระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ตามตารางการทดลองที่กำหนดขึ้น
- 2.2 ปรับ variac ของชุดควบคุมสำหรับป้อนแรงดันให้กับหม้อแปลงทั้ง main และ auxiliary ให้อยู่ในตำแหน่ง low limit
- 2.3 เปิดเครื่องชุดควบคุม จากนั้นกดปุ่ม PREPARE แล้ว "ON" เพื่อจ่ายไฟฟ้าวงจรโดยการปรับ variac ตัว main เพื่อปรับค่าทาบให้แรงดันเพิ่มขึ้นพอประมาณ จากนั้นปรับตัว Auxiliary transformer เพื่อจ่ายแรงดันเพิ่มขึ้นแบบละเอียด
- 2.4 ปรับแรงดันเพิ่มขึ้นทีละน้อย ๆ พร้อมกับเปลี่ยนแปลงช่องว่างระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ จนกระทั่งเกิดเบรคดาวน
- 2.5 จัดบันทึกค่าแรงดันเบรคดาวนลงในตารางการทดลอง
- 2.6 เมื่อเกิดเบรคดาวนไปแล้วให้ปรับ variac ทั้งสองลงมาที่ตำแหน่ง low limit
- 2.7 ทำการ discharge ประจุค้างที่อิเล็กทรอนิกส์ในทั้งกราวนด์สัมพันธ์กับอิเล็กทรอนิกส์
- 2.8 ทำการทดลองข้อ 2.3 ถึง 2.7 อีกสี่ครั้งที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กทรอนิกส์เดียวกัน
- 2.9 ปรับระยะแกปเพิ่มขึ้นตามการทดลอง
- 2.10 ทำการทดลองซ้ำข้อ 2.3 ถึง 2.8
- 2.11 เปลี่ยนอิเล็กทรอนิกส์แบบต่างๆแล้วทำการทดลองซ้ำจากข้อ 1.2 ถึง 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9.6 แสดงชุดผลิตไฟฟ้ากระแสตรงที่วอลทิจดแรงดัน 600 kV



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 9.7 แสดงชุดควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อแบบสงวนเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9.2.3 การทดลองด้วยสัญญาไฟฟ้ากระแสสลับ

ก่อนการทดลองให้ทำเช่นข้อ 1.1 ถึง 1.4

3.1 นำเอาอิเล็กทรอนิกส์ที่จะทดลองไปติดตั้งที่แท่นปรับระะยะแกป

3.2 ทำการเตรียมแหล่งจ่ายสัญญาไฟฟ้ากระแสสลับและอุปกรณ์การวัดให้เรียบร้อย breaker ต้องอยู่ในสภาวะ "OFF"

3.3 ต่อสายสัญญาไฟฟ้ากระแสสลับเข้าบนแท่นปรับระะยะแกป และต่อสายกราวด์ที่แท่นกราวด์ของแท่นปรับระะยะแกปดังรูปที่ 9.11

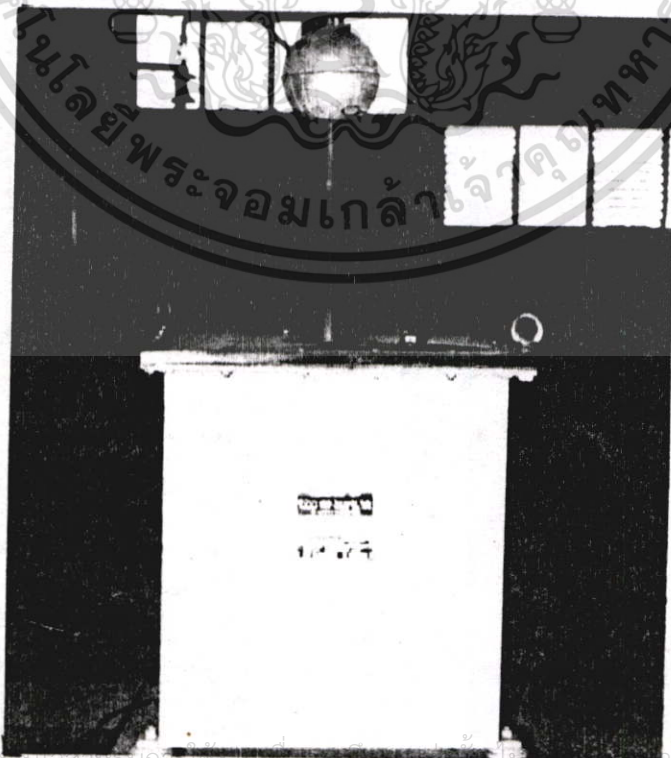
3.4 ทำการปรับระะยะศูนย์ของอิเล็กทรอนิกส์โดยปรับอิเล็กทรอนิกส์ให้เข้าไปชิดกันแล้วใช้กระดาษกาวปิด แล้วทำเครื่องหมายไว้ที่จุดศูนย์ของกระดาษกาวด้วยปากกาหรือดินสอ

3.5 ทำการปรับระะยะแกปดังที่แสดงไว้ในตาราง

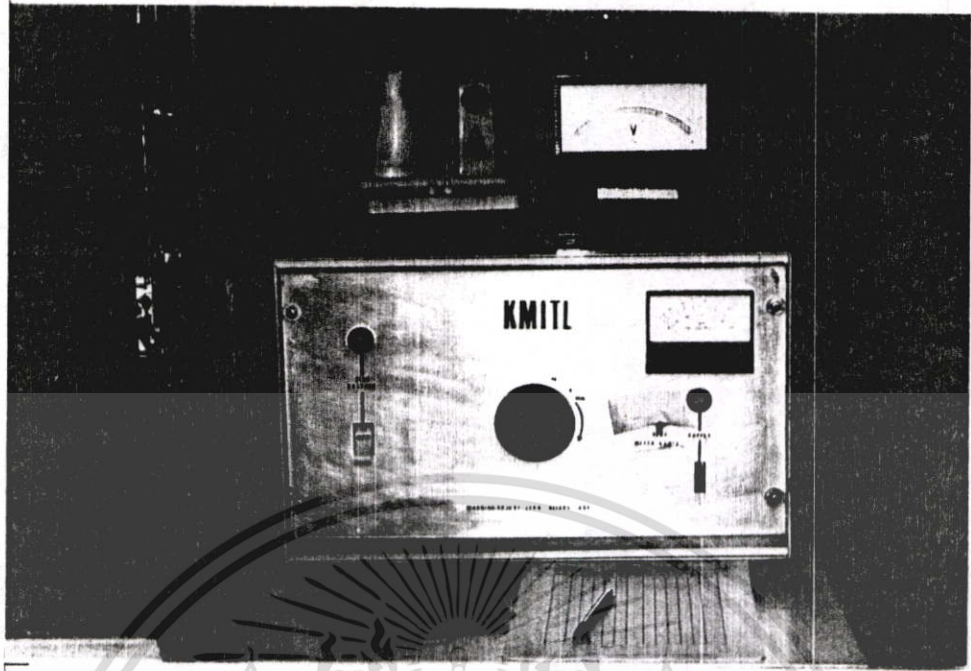
3.6 เปิดแหล่งจ่ายสัญญาจ่ายไฟเข้าไปที่อิเล็กทรอนิกส์ปรับค่าจากศูนย์โดยอัตราเร็วคงที่ 2 kV ต่อวินาที จนเกิดการเบรคดาวขึ้นบันทึกผลที่ได้จากการทดลอง (การบันทึกผลการทดลองโดยอ่านค่าจากเข็ม AC volt meter แล้วคูณด้วย 100kV/235V หลังจากการอ่านค่าแล้วปรับ variac มาที่ low limit ให้เวลาพักเครื่องประมาณ 3 นาที แล้วทำการทดลองอีก 4 ครั้งที่ระะยะแกปเดียวกัน

3.7 ทำการทดลองซ้ำในข้อ 3.5 และ 3.6

3.8 เปลี่ยนรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์แบบใหม่แล้วทดลองซ้ำในข้อ 3.4 ถึง 3.7



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 9.8 แสดงหม้อแปลงชนิดแรงดันไฟฟ้าไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูง 100 kV

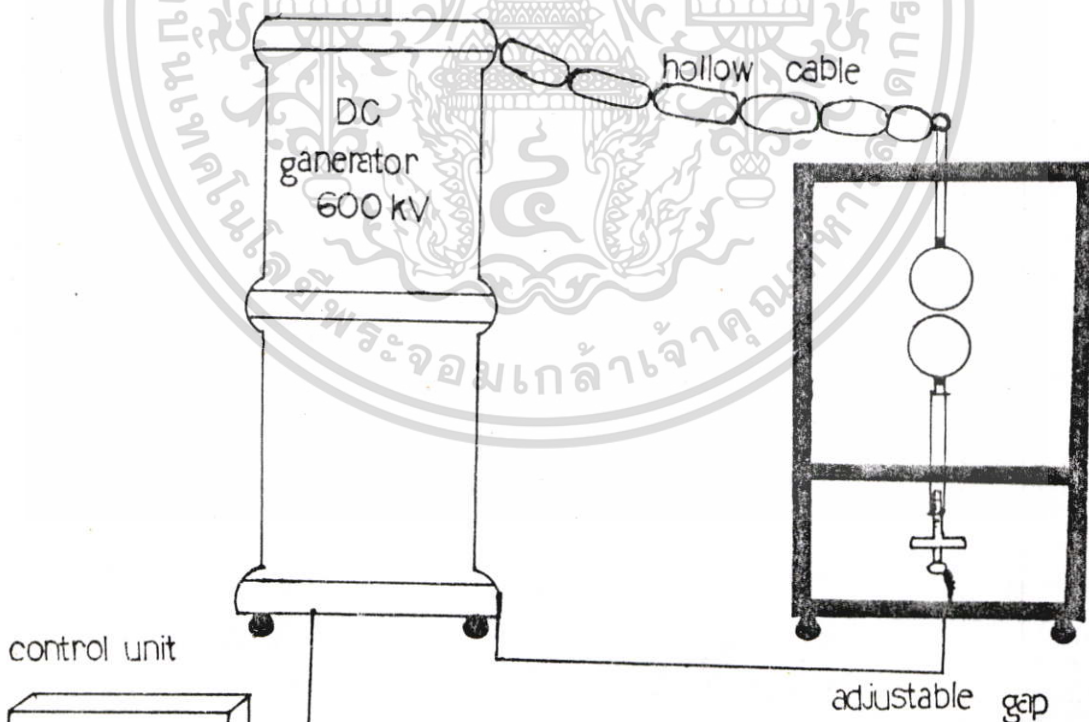
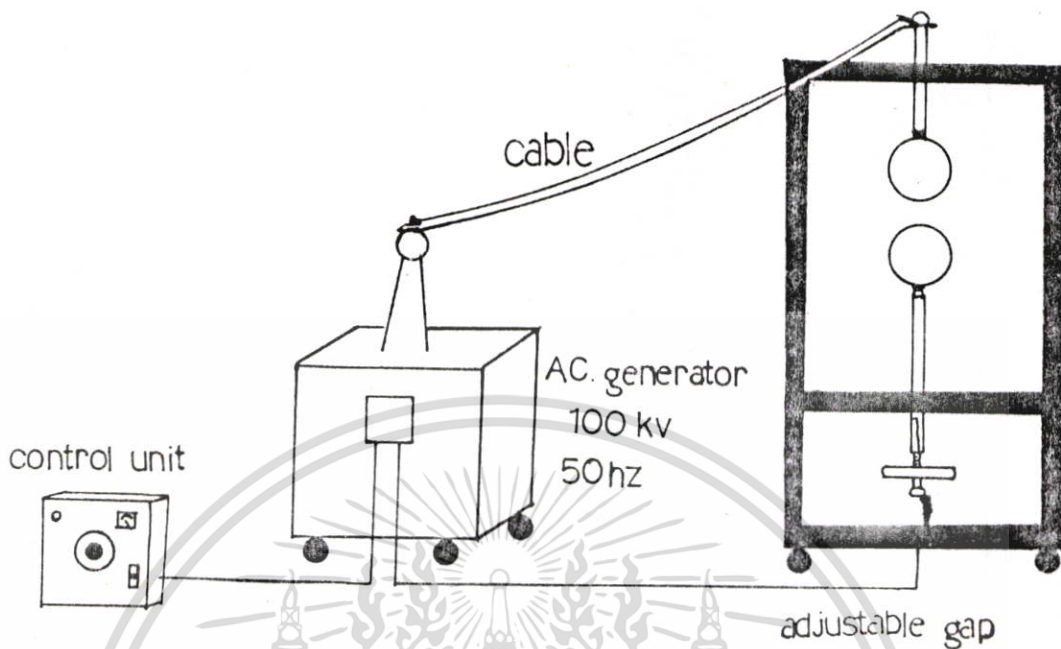


รูปที่ 9.9 แสดงชุดควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ 9.10 แสดงขณะเกิดเบรคควาร์ตเมื่ออิเล็กทรอนิกส์เป็นแบบจุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่ในที่เห็นหรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า โดยทศสมบัติน้ำฟ้ากระแสตรง เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 9.11 แสดงการทดสอบทดลอง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลอง

สภาวะแวดล้อม: ความดัน 765.3 ม.ม.ปรอท
 ความชื้น 82 %
 อุณหภูมิ 27.5 °C

รูปแบบของอิเล็กโทรดที่ใช้ทดลอง: แผ่นระนาบ ต่อเข้าสวิตช์ขนาดไซฟ้ากระแสตรง
 แผ่นระนาบ ต่อลงกราวด์

ระยะห่าง(cm.)	แรงดันเบรคดาวนเริ่มตัน(kv.)	ระดับแรงดันเบรคดาวน(kv.) 5 ครั้ง					ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5	
0.5	4.35	15	15.3	16.2	15.9	15.3	15.54
1.0	4.05	28.8	29.1	29.4	29.1	29.1	29.1
1.5	3.9	43.5	43.2	44.1	44.1	44.1	43.8
2.0	3.45	55.5	56.4	55.8	57.0	57.3	56.4
3.0	3.6	84.3	84.0	81.0	83.7	84.0	83.4
3.5	3.6	93.0	94.5	93.5	91.5	94.5	93.4
4.0	3.6	102.0	105.0	108.0	109.5	105.0	105.3
4.5	3.3	112.5	117.0	115.5	120.0	120.0	117.0
5.0	3.6	120.5	132.0	130.5	126.0	132.0	130.2
5.5	3.45	145.5	145.5	144.0	141.0	145.5	144.3
6.0	3.45	156.0	156.0	156.0	159.0	156.0	156.6
6.5	3.45	165.0	169.5	169.5	168.0	162.0	166.8
7.0	3.45	175.5	175.5	184.5	184.5	184.5	180.9
7.5	3.0	193.5	192.0	198.0	198.0	196.5	195.6
8.0	3.0	210	210	212	207	207	209.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ **วิทยุภาค ไซฟ้ากระแสตรง** อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางการทดลอง

สภาวะแวดล้อม: ความดัน 765.5 ม.ม.ปรอท

ความชื้น 75 %

อุณหภูมิ 29 °C

รูปแบบของอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ทดลอง: แผ่นระนาบ คอ้เข้าสัญญาณไฟฟ้ากระตริงชั่วลบ
ทรงกลม คอ้ลงกราวด์

ระยะห่าง(cm.)	แรงดันเบรคดาวนเริ่มต้น(kv.)	ระดับแรงดันเบรคดาวน(kv.) 5 ครั้ง					ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5	
0.5	1.5	15.45	15.8	15.6	15.6	15.6	15.57
1.0	1.8	30.6	30.8	30.6	30.0	30.3	30.42
1.5	1.8	45.0	45.6	45.0	44.7	45.6	45.2
2.0	1.65	58.8	58.8	58.2	58.6	58.2	58.52
2.5	1.8	71.1	71.1	70.2	70.2	70.6	70.18
3.0	1.6	85.2	84.6	84.9	84.6	84.6	84.78
3.5	1.8	91.5	92.4	91.5	93.0	93.0	92.3
4.0	2.1	103.5	102.6	102.6	105.6	105.0	103.8
4.5	2.1	117.0	117.0	114.0	115.5	114.0	115.5
5.0	2.1	126.0	126.0	124.5	126.0	124.5	125.4
5.5	2.25	138.0	135.0	136.5	136.5	138.0	136.8
6.0	2.37	147.0	147.0	147.0	147.0	147.0	147.0
6.5	2.37	156.0	153.0	156.0	153.0	150.0	153.6
7.0	2.4	160.5	163.5	165.0	162.0	165.0	163.2
7.5	2.55	175.5	175.0	174.0	168.0	175.5	173.6
8.0	2.55	183.0	181.5	183.0	181.5	181.5	182.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อที่ และตียงอย่างยงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลอง

สภาพแวดล้อม: ความดัน 765 ม.ม.ปรอท
 ความชื้น 82 %
 อุณหภูมิ 27 °c

รูปแบบของอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ทดลอง: แผ่นระนาบ ต่อเข้ามีสายไฟเข้ากระแสตรงที่วอน
 ปลายแหลมมุม 30 องศา ต่อลงกราวด์

ระยะห่าง (cm.)	แรงดันเบเรตดาวเริ่มต้น (kv.)	ระดับแรงดันเบเรตดาว (kv.) 5 ครั้ง					ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5	
0.5	3	5.1	5.2	5.2	5.1	5.2	5.16
1.0	3	13.5	13.5	13.5	13.2	13.2	13.38
1.5	3	17.85	17.85	17.7	17.7	17.7	17.76
2.0	3	21	21	21	21	21	21
2.5	3	24.5	24.0	24.15	24.15	24.0	24.1
3.0	3.15	28.4	28.4	28.1	28.7	28.4	28.4
3.5	3	29.1	29.1	29.1	29.1	29.1	29.1
4.0	3	31.8	31.8	31.8	31.8	31.5	31.74
4.5	2.7	33.6	33.3	33.6	33.3	33.3	33.42
5.0	3	34.2	34.5	34.5	34.5	34.5	34.44
5.5	3	36.0	36.0	36.0	35.4	35.4	35.75
6.0	3	38.1	38.1	38.4	38.1	38.1	38.16
6.5	2.7	40.5	40.5	40.8	40.8	40.8	40.68
7.0	3	43.2	43.2	43.5	43.5	43.2	43.32
7.5	2.7	45.9	45.9	46.2	45.9	46.2	46.02
8.0	3	48.6	48.6	48.6	48.6	48.6	48.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลอง

สภาพแวดล้อม: ความดัน 764 ม.ม.ปรอท
 ความชื้น 61 %
 อุณหภูมิ 30.5 °C

รูปแบบของมิเตอร์ที่ใช้ทดลอง: ย่านระนาบ ต่อเข้าสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงที่วอน
 ปริมาณโหลดรวม 60 องศา ต่อตงกราวน์

ระยะห่าง (cm.)	แรงดันเบรตดาวน์เริ่มต้น (kv.)	ระดับแรงดันเบรตดาวด์ (kv.) 5 ครั้ง					ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5	
0.5	3	8.1	10.65	9.05	9.9	7.5	9.12
1.0	3.3	18.3	18.15	18.3	18.0	18.3	18.21
1.5	3.3	23.4	23.4	23.25	23.55	23.25	23.37
2.0	3.3	26.4	26.7	26.4	26.4	26.7	26.52
2.5	3.3	30.0	29.7	29.7	29.4	29.4	29.64
3.0	3.15	32.7	33.0	32.4	32.4	32.7	32.64
3.5	3.3	35.4	35.1	35.4	35.1	35.4	35.28
4.0	3.3	37.5	37.5	37.8	37.8	37.5	37.62
4.5	3.3	40.5	40.5	40.8	41.1	40.2	40.62
5.0	3.15	42.0	43.2	43.2	42.6	43.2	42.84
5.5	3.3	45.0	45.3	45.0	45.0	45.0	45.06
6.0	3.3	46.8	47.4	47.4	46.8	47.4	47.16
6.5	3.15	49.5	49.2	49.2	49.2	48.6	49.14
7.0	3.3	51.0	51.0	51.0	51.3	51.3	51.12
7.5	3.3	53.4	53.1	53.1	53.4	53.1	53.22
8.0	3.0	54.6	55.2	55.2	55.2	54.9	55.02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลอง

สภาวะแวดล้อม: ความดัน 765 ม.ม.ปรอท
 ความชื้น 82 %
 อุณหภูมิ 27 °C

รูปแบบของอิเล็กโทรดที่ใช้ทดลอง: ทรงกลม ต่อเข้ามีดงาไฟฟ้ากระแสตรงมีวอล
 เลย์นระนาบ ต่อลงกราวด์

ระยะห่าง(cm.)	แรงดันเบรกดาวน์เริ่มต้น(kv.)	ระดับแรงดันเบรกดาวน์(kv.) 5 ครั้ง					ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5	
0.5	2.55	13.2	14.4	15.0	15.6	15.15	14.67
1.0	2.4	28.8	20.4	29.1	29.1	29.7	29.22
1.5	2.4	44.1	43.8	44.1	44.1	44.1	44.04
2.0	2.4	58.4	57.0	58.4	57.0	58.1	56.58
2.5	2.4	69.8	69.0	69.0	69.0	69.0	69.12
3.0	2.7	82.8	82.8	83.4	82.2	83.1	82.86
3.5	2.55	91.5	90.0	90.0	91.5	87.0	90.0
4.0	2.55	99.0	102.0	102.0	103.5	103.5	102.0
4.5	2.4	112.5	112.5	111.6	111.0	109.5	111.4
5.0	2.4	121.5	126.0	126.0	126.0	126.0	125.1
5.5	2.4	136.5	135.0	129.0	133.5	127.5	132.3
6.0	2.55	145.5	145.5	145.5	144.0	144.0	145.0
6.5	2.4	154.5	154.5	156.0	154.5	156.0	155.1
7.0	2.55	162.0	162.0	162.0	162.6	163.5	162.42
7.5	2.55	166.5	168.0	171.0	171.0	168.0	169.0
8.0	2.55	180	180	180	180	179.7	180.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาสาระสำคัญของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลอง

สภาพแวดล้อม: ความดัน 766.8 ม.ม.ปรอท

ความชื้น 75 %

อุณหภูมิ 30 °C

รูปแบบของอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ทดลอง: ทรงกลม ต่อเข้ามีศูนย์กลางไฟฟ้ากระแสตรงชีวอบ

ทรงกลม ต่อลงกราวด์

ระยะห่าง(cm.)	แรงดันเบรคดาว์เริ่มต้น(kv.)	ระดับแรงดันเบรคดาว์(kv.) 5 ครั้ง					ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5	
0.5	11.1	15.9	15.9	15.9	15.0	15.0	15.6
1.0	10.95	29.7	30.3	30.6	30.0	30.3	30.18
1.5	10.35	45.6	44.4	44.4	45.9	46.5	45.36
2.0	9.9	58.2	63.0	57.0	59.4	61.5	59.82
2.5	10.2	72.6	72.0	72.6	72.0	72.6	72.36
3.0	9.9	84.0	85.5	84.0	84.0	87.0	84.9
3.5	9.9	96.0	96.6	94.5	96.0	96.0	95.82
4.0	10.2	106.5	108.0	108.0	108.0	108.0	107.7
4.5	10.95	121.5	120.0	118.5	123.0	120.0	120.6
5.0	10.95	135.0	135.0	135.0	132.0	133.5	134.1
5.5	10.35	144.0	147.0	147.0	145.5	147.0	146.1
6.0	10.65	159.0	154.5	153.0	154.5	159.0	156.0
6.5	10.8	171.0	162.0	171.0	171.0	171.0	169.2
7.0	10.65	181.5	180.0	183.0	185.5	180.0	181.2
7.5	10.65	189.0	193.5	192.0	193.5	192.0	192.0
8.0	11.1	204.0	204.0	204.0	204.0	195.0	202.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตียังไปยังสิ่งใดๆของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลอง

สภาพแวดล้อม: ความดัน 766 ม.ม.ปรอท
 ความชื้น 74 %
 อุณหภูมิ 27.5 °c

รูปแบบของอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ทดลอง: ทรงกลม ต่อเข้าสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงที่วอล
 ปลายแหลมมุม 30 องศา ต่อดวงกราวด์

ระยะห่าง (cm.)	แรงดันเบรกดาวด์เริ่มต้น (kv.)	ระดับแรงดันเบรกดาวด์ (kv.) 5 ครั้ง					ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5	
0.5	5.7	8.1	8.1	8	8.1	7.95	8.05
1.0	6.9	13.5	12.6	12.9	13	13.5	13.1
1.5	7.5	17.7	17.7	17.7	17.4	17.4	17.58
2.0	7.5	22.2	22.2	22.2	22.2	22.2	22.2
2.5	8.1	30.3	28.5	27.3	27.6	27.0	28.14
3.0	8.1	30.6	30.0	30.0	30.0	30.0	30.12
3.5	7.95	32.9	32.1	33.3	33.0	33.0	32.86
4.0	7.8	35.7	36.0	36.0	36.0	36.0	35.94
4.5	8.1	41.4	42.0	41.7	41.4	41.7	41.64
5.0	8.1	45.9	46.2	45.6	45.9	45.9	45.9
5.5	8.1	48.6	48.6	48.9	48.9	49.0	48.8
6.0	8.25	52.8	51.6	51.6	52.8	51.6	52.08
6.5	7.8	54.6	55.2	55.8	55.8	55.8	55.44
7.0	8.1	57.6	58.2	57.6	57.0	57.6	57.6
7.5	8.1	59.4	57.0	57.0	55.2	55.2	56.76
8.0	8.1	55.8	59.1	59.1	59.1	59.1	59.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อที่เอกสารโดยเด็ดขาดของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลอง

สภาวะแวดล้อม: ความดัน 767 ม.ม.ปรอท
 ความชื้น 68 %
 อุณหภูมิ 30.8 °C

รูปแบบของมิเตอร์ที่ใช้ทดลอง: ทรงกลม ต่อเข้ามีศูนย์กลางไขว้กันตรงหัวลบ
 ปลานพหุมุม 60 องศา ต่อลงกราวด์

ระยะห่าง(cm.)	แรงดันเบรคดาวเริ่มต้น(kv.)	ระดับแรงดันเบรคดาว(kv.) 5 ครั้ง					ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5	
0.5	7.2	7.5	7.95	7.2	7.5	7.5	7.53
1.0	7.2	18.6	18.9	18.9	19.5	19.2	19.02
1.5	8.1	24.0	24.3	24.6	25.2	24.6	24.54
2.0	8.1	28.8	28.5	28.5	28.8	28.5	28.62
2.5	8.25	31.2	31.8	31.8	32.1	30.9	31.56
3.0	8.25	34.2	33.6	36.0	33.6	34.2	34.32
3.5	8.25	34.8	36.6	30.8	34.8	34.2	35.04
4.0	8.4	38.4	37.8	38.1	38.4	38.4	38.22
4.5	8.1	45.0	45.8	46.8	45.6	44.4	45.42
5.0	8.1	45.6	45.0	44.4	43.2	45.6	44.76
5.5	8.1	45.6	46.5	47.4	47.7	47.7	46.98
6.0	8.1	48.9	50.1	49.2	49.8	49.5	49.5
6.5	8.55	51.6	54.0	52.8	52.8	53.1	52.86
7.0	8.25	55.5	56.7	54.0	55.2	55.2	55.32
7.5	7.86	58.5	58.8	57.0	59.0	58.2	58.30
8.0	7.65	63.0	62.4	63.0	62.4	62.4	62.64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตียังอ้างอิงผลของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลอง

สภาพแวดล้อม: ความชื้น 764 ม.พ.ปรอท
 ความชื้น 68 ๕
 อุณหภูมิ 30 °c

รูปแบบของมิเตอร์ที่ใช้ทดลอง: ปลายแหลมมุม 30 องศา ต่อก้าวเข้ามีขนาดไฟฟ้ากระแสตรง
 ย่านระนาบ ต่อดงกราวน์

ระยะห่าง (cm.)	แรงดันเบรตดาว์นเริ่มต้น (kv.)	ระดับแรงดันเบรตดาว์ด (kv.) 5 ครั้ง					ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5	
0.5	3	9.3	9.0	9.0	9.0	9.0	9.06
1.0	3	19.2	19.2	19.5	19.2	19.5	19.32
1.5	3	29.25	30.0	29.25	29.5	29.25	29.45
2.0	2.7	36.0	37.2	36.0	36.0	36.0	36.24
2.5	3	43.9	44.4	45.0	44.7	43.8	44.37
3.0	3	51.3	51.3	51.5	51.6	51.3	51.4
3.5	2.7	57.9	59.1	57.9	58.8	57.9	58.32
4.0	2.7	65.1	64.5	64.8	64.5	64.8	64.74
4.5	3	69.9	69.9	69.9	71.4	70.2	70.26
5.0	3	76.5	76.5	77.5	79.8	76.6	77.38
5.5	3	83.4	84.0	82.2	81.0	82.2	82.56
6.0	3	90.0	87.0	88.5	88.5	87.0	88.2
6.5	2.7	90.0	90.0	87.0	93.0	88.5	89.7
7.0	3	93.0	100.5	99.0	96.0	94.5	96.6
7.5	3	102.0	103.5	103.5	100.5	103.5	102.6
8.0	3.3	108.0	109.5	106.5	103.5	105.0	106.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลอง

สภาพแวดล้อม: ความดัน 767.3 ม.ม.ปรอท
 ความชื้น 69 %
 อุณหภูมิ 32 °c

รูปแบบของอิเล็กโทรดที่ใช้ทดลอง: ปลายแหลมมุม 30 องศา ต่อเข้ามีขนาดไฟฟ้ากระแสตรงที่ควบคุม
 ทรงกลม ต่อลงกราวด์

ระยะห่าง (cm.)	แรงดันเบเรตดาร์เริ่มต้น (kv.)	ระดับแรงดันเบเรตดาร์ (kv.) 5 ครั้ง					ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5	
0.5	5.25	9.1	9	9	9	9	9.02
1.0	6.6	18.9	19.05	19.5	19.5	19.2	19.23
1.5	7.5	28.8	28.8	28.8	28.5	28.8	28.74
2.0	8.01	38.4	38.1	39.0	39.0	38.4	38.58
2.5	8.1	47.4	47.4	47.4	46.8	46.8	47.16
3.0	8.34	55.2	53.4	55.2	54.0	54.0	54.36
3.5	8.34	61.5	61.5	61.5	61.5	61.5	61.5
4.0	8.1	69.0	69.0	70.5	69.0	69.0	69.3
4.5	8.25	73.5	57.0	75.0	78.0	75.0	75.3
5.0	8.55	83.7	81.1	81.0	81.0	81.0	81.54
5.5	8.55	87.0	87.0	87.0	87.0	89.7	87.54
6.0	8.1	94.5	94.5	96.0	96.6	96.0	95.52
6.5	8.1	102.0	102.0	102.0	102.0	102.0	102.0
7.0	8.1	108.0	108.0	108.0	108.0	108.0	108.0
7.5	8.7	115.5	117.0	117.0	115.5	115.5	116.1
8.0	8.4	123.0	123	123.0	123.0	123.3	123.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องขออนุญาตจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลอง

สภาวะแวดล้อม: ความดัน 765 ม.ม.ปรอท
 ความชื้น 75 %
 อุณหภูมิ 30 °c

รูปแบบของอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ทดลอง: ปลายแหลมมุม 30 องศา ต่อเข้ามีศูนย์กลางเข้ากระแสนตรงหัวบ
 ปลายแหลมมุม 30 องศา ต่อลงกราวด์

ระยะห่าง (cm.)	แรงดันเบเรคตาว์เริ่มต้น (kv.)	ระดับแรงดันเบเรคตาว์ (kv.) 5 ครั้ง					ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5	
0.5	6.9	7.35	7.35	7.2	7.2	7.2	7.26
1.0	7.2	8.46	8.4	8.37	8.4	8.4	8.4
1.5	7.29	13.2	12.3	12.6	12.9	12.6	12.72
2.0	7.5	21.6	22.5	21.9	22.2	21.9	22.02
2.5	7.65	27.0	27.0	27.0	27.0	27.3	27.06
3.0	7.8	32.4	32.7	32.7	33.0	32.7	32.7
3.5	8.19	37.8	37.2	37.2	37.2	36.6	37.2
4.0	8.4	42.0	42.0	42.0	42.0	42.0	42.0
4.5	8.55	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6
5.0	8.1	47.8	48.8	48.8	49.2	48.6	48.72
5.5	8.1	51.6	51.3	51.3	51.0	51.3	51.3
6.0	8.34	53.4	53.1	54.0	54.0	53.4	53.58
6.5	7.89	55.2	55.5	55.7	55.2	56.4	55.6
7.0	8.1	57.3	58.8	58.5	58.7	58.5	57.96
7.5	8.1	60.0	61.5	60.8	60.8	59.7	60.48
8.0	7.89	61.2	61.2	61.5	61.5	62.1	61.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตีพิมพ์อย่างจงใจของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลอง

สภาวะแวดล้อม: ความดัน 767 ม.ม.ปรอท
 ความชื้น 58 %
 อุณหภูมิ 26 °c

รูปแบบของอิเล็กโทรดที่ใช้ทดลอง: ปลายแหลมมุม 30 องศา ต่อเข้ามีดงาไฟฟ้ากระแสตรงข้าม
 ปลายแหลมมุม 60 องศา ต่อดงกราวด์

ระยะห่าง(cm.)	แรงดันเบรคดาว์เริ่มต้น(kv.)	ระดับแรงดันเบรคดาว์(kv.) 5 ครั้ง					ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5	
0.5	8.0	6.6	6.6	6.45	6.6	6.45	6.54
1.0	7.8	9.3	9.6	9.3	9.6	9.6	9.48
1.5	8.25	11.7	11.85	11.7	11.8	11.85	11.79
2.0	8.1	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3
2.5	7.5	26.7	27.6	26.7	27.0	25.9	26.78
3.0	8.4	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7
3.5	7.5	35.7	35.7	35.7	35.7	35.7	35.7
4.0	7.8	40.2	40.2	40.2	40.2	40.2	40.2
4.5	7.65	43.8	43.8	42.6	43.5	43.5	43.44
5.0	7.8	45.3	45.3	45.3	45.6	45.6	45.42
5.5	8.1	48.0	48.5	48.6	48.0	48.0	48.22
6.0	8.1	49.8	49.2	49.2	49.2	49.2	49.32
6.5	7.65	51.9	50.4	51.0	51.6	51.0	51.18
7.0	7.5	51.9	51.9	51.9	51.9	51.9	51.9
7.5	8.4	52.0	51.9	52.0	52.0	52.0	51.98
8.0	7.95	53.1	52.5	52.0	52.4	53.0	52.52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องยกย่องเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลอง

สภาพแวดล้อม: ความดัน 765.9 ม.ม.ปรอท

ความชื้น 75 %

อุณหภูมิ 29 °c

รูปแบบของมิเตอร์ที่ใช้ทดลอง: ปลายแหลมหมม 60 องศา ต่อเข้าสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงที่วอม
แม่นยำขนาด 100 มิลลิแอมป์

ระยะห่าง(cm.)	แรงดันเบรคดาว์นเริ่มต้น(kv.)	ระดับแรงดันเบรคดาว์น(kv.) 5 ครั้ง					ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5	
0.5	2.1	9.3	9.9	9.0	9.3	9.0	9.3
1.0	2.1	18.9	18.75	18.6	18.6	18.9	18.75
1.5	2.1	27.9	27.6	27.6	27.6	27.6	27.68
2.0	2.04	35.4	35.4	35.4	35.4	35.1	35.34
2.5	2.1	42.6	42.6	42.6	42.6	43.2	42.72
3.0	2.25	49.5	49.8	49.8	49.5	49.8	49.68
3.5	2.4	57.6	56.1	56.4	56.1	57.0	56.64
4.0	2.4	62.4	63.9	63.6	63.3	64.2	63.48
4.5	2.4	71.7	70.8	72.0	72.3	72.6	71.88
5.0	2.55	79.2	78.6	79.8	79.2	79.2	79.2
5.5	2.64	84.9	86.4	85.8	87.0	84.9	85.8
6.0	2.64	90	91.5	90	90	90	90.3
6.5	2.55	93	94.5	96.9	96.0	95.4	95.16
7.0	2.7	99	100.5	103.5	102	103.5	101.7
7.5	2.7	106.5	105	108.6	111	109.5	108.12
8.0	2.61	114	114	114	114.6	114	114.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องขออนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลอง

สภาวะแวดล้อม: ความดัน 765 ม.ม.ปรอท
 ความชื้น 67 %
 อุณหภูมิ 29 °c

รูปแบบของอิเล็กโทรดที่ใช้ทดลอง: ปลายแหลมมุม 60 องศา ต่อเข้าสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงที่ฉาบ
 ทรงกลม ต่อลงกราวด์

ระยะห่าง (cm.)	แรงดันเบรคความไวเริ่มต้น (kv.)	ระดับแรงดันเบรคตัววัด (kv.) 5 ครั้ง					ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5	
0.5	8.9	9	8.85	9	8.1	8.1	8.61
1.0	8.4	18	18.3	18.3	18.3	18.0	18.18
1.5	9.15	28.5	28.8	28.8	28.8	28.8	28.74
2.0	8.4	37.2	37.2	36.6	36.9	37.5	37.08
2.5	9.1	44.4	44.1	45.0	45.0	45.0	44.7
3.0	8.7	52.8	53.4	52.2	52.8	58.2	52.8
3.5	8.55	60.8	60.3	60.0	60.3	60.0	60.12
4.0	9.15	68.4	68.3	68.4	67.2	68.4	67.74
4.5	8.7	76.2	76.8	86.8	76.2	76.8	76.56
5.0	8.7	86.1	86.1	87.0	87.0	84	86.04
5.5	9.1	93.0	94.5	91.5	91.5	93	92.7
6.0	8.55	100.5	100.5	100.5	100.5	99	100.2
6.5	8.55	106.5	106.5	105.0	106.5	106.5	106.2
7.0	8.7	115.5	117.0	115.5	117.0	117.0	116.4
7.5	9.1	123.0	121.5	121.5	123.0	121.5	122.1
8.0	9.1	136.5	133.5	135.0	136.5	135.0	135.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลอง

สภาวะแวดล้อม: ความดัน 766.5 ม.ม.ปรอท

ความชื้น 75 %

อุณหภูมิ 29.5 °c

รูปแบบของอิเล็กโทรดที่ใช้ทดลอง: ปลาหมึกหมึก 60 องศา ต่ำเข้ามีขนาดไฟฟ้ากระแสตรงข้าม
ปลาหมึกหมึก 60 องศา ต่ำลงกราวด์

ระยะห่าง(cm.)	แรงดันเบรคดาวเริ่มต้น(kv.)	ระดับแรงดันเบรคดาว(kv.) 5 ครั้ง					ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5	
0.5	7.8	9.15	9.3	9.3	9.15	9.3	9.24
1.0	8.4	11.4	11.4	11.25	11.4	11.4	11.37
1.5	8.4	13.5	14.1	14.3	13.8	14.1	13.96
2.0	8.4	15.9	16.2	16.8	16.2	16.2	16.26
2.5	8.48	22.5	22.8	23.4	23.5	22.6	22.96
3.0	8.4	33.0	32.4	32.4	33.0	33.0	32.71
3.5	8.4	37.2	37.2	37.8	37.5	37.2	37.38
4.0	8.37	42.0	42.0	42.0	42.3	42.0	42.06
4.5	8.25	45.0	45.0	45.1	45.1	44.4	44.93
5.0	8.19	47.7	48.3	48.3	48.3	48.0	48.72
5.5	7.5	50.1	50.1	49.2	50.1	49.8	49.86
6.0	7.5	51.6	51.9	51.0	51.3	51.6	51.48
6.5	7.71	53.7	52.8	52.8	51.9	51.0	52.44
7.0	7.8	55.2	53.4	52.2	55.8	55.8	54.48
7.5	7.8	57.0	57.0	56.7	55.8	54.6	56.22
8.0	8.4	57.9	59.4	60.0	59.4	59.4	59.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลอง

สภาพแวดล้อม: ความดัน 767 ม.ม.ปรอท
 ความชื้น 68 %
 อุณหภูมิ 30 °c

รูปแบบของอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ทดลอง: ปลายแหลมมุม 60 องศา ต่อเข้ามีศูนย์กลางไฟฟ้ากระแสตรงหัวบน
 ปลายแหลมมุม 30 องศา ต่อดวงกราวด์

ระยะห่าง (cm.)	แรงดันเบรตดาวเริ่มต้น (kv.)	ระดับแรงดันเบรตดาว (kv.) 5 ครั้ง					ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5	
0.5	7.5						
1.0	9.3	11.7	11.7	11.4	11.7	11.4	11.52
1.5	8.7	13.2	13.65	13.4	13.35	13.85	13.33
2.0	8.4	18.0	18.0	17.8	17.85	17.85	18.0
2.5	8.85	15.5	26.0	26.0	26.0	25.8	25.86
3.0	9.0	23.0	33.0	33.0	32.7	33.0	32.94
3.5	9.3	37.8	38.0	38.0	38.0	37.5	37.86
4.0	8.7	42.8	42.8	42.8	42.8	42.9	42.6
4.5	9.3	44.5	45.0	44.8	45.0	45.0	44.86
5.0	8.7	47.4	48.0	48.0	48.9	48.9	48.36
5.5	9.3	50.0	49.5	50.0	50.0	50.0	50.0
6.0	8.7	52.2	51.8	52.2	51.9	52.8	52.14
6.5	8.85	54.2	54.5	54.0	54.0	54.0	54.14
7.0	8.85	55.2	56.1	57.3	57.9	57.0	56.7
7.5	8.48	60.0	59.4	59.0	59.5	59.0	59.3
8.0	8.4	61.2	61.2	61.5	61.8	61.2	61.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ศึกษานาน ไฟฟ้ากระแสตรง
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลอง

สภาวะแวดล้อม: ความดัน 763 ม.ม.ปรอท
 ความชื้น 82 %
 อุณหภูมิ 27 °c

รูปแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ทดลอง: แผ่นระนาบ ต่อเข้าสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ
 แผ่นระนาบ ต่อลงกราวด์

ระยะห่าง (cm.)	ระดับแรงดันเบรตควาน์ (กิโลโวลท์) 5 ครั้ง					ค่าเฉลี่ย
0.5	8.93	8.93	8.93	8.93	9.78	8.94
1.0	19.14	19.14	19.57	19.57	19.57	19.4
1.5	28.3	28.7	28.7	28.7	29.1	28.7
2.0	38.7	39.1	39.1	38.7	39.1	38.9
2.5	47.2	47.6	47.2	47.1	46.8	47.2
3.0	55.32	55.7	55.74	55.32	55.7	55.5
3.5						
4.0						
4.5						
5.0						
5.5						
6.0						
6.5						
7.0						
7.5						
8.0						

สัญญาณ ไซน่ากระแสสลับ (บันทึกเป็นค่า r.m.s.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลอง

สภาวะแวดล้อม: ความดัน 763 ม.ม.ปรอท
 ความชื้น 82 %
 อุณหภูมิ 26 °c

รูปแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ทดลอง: แผ่นระนาบ ต่อเข้ามีสายพานโซ่ฟ้ากระแสสลับ
 ทรงกลม ต่อลงกราวด์

ระยะห่าง (cm.)	ระดับแรงดันเบรตดาวน์ (มิโครโวลท์) 5 ครั้ง					ค่าเฉลี่ย
0.5	10.85	10.85	11.06	10.85	11.06	10.93
1.0	20.85	21.9	21.5	21.9	21.5	21.53
1.5	30.1	30.1	30.85	30.1	30.1	30.25
2.0	40.0	40.0	39.57	39.57	39.57	39.74
2.5	48.5	48.9	48.5	48.5	48.5	48.58
3.0	56.6	57.02	57.02	57.02	57.02	56.94
3.5						
4.0						
4.5						
5.0						
5.5						
6.0						
6.5						
7.0						
7.5						
8.0						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตีพิมพ์แปลงเนื้อหา และต้องยกย่องแหล่งที่มาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลอง

สภาพแวดล้อม: ความดัน 762.9 ม.ม.ปรอท

ความชื้น 82 %

อุณหภูมิ 26 °c

รูปแบบมิเตอร์ที่ใช้ทดลอง: แผ่นระนาบ ต่อเข้าสายอุณหภูมิเข้ากระแสสลับ

ปลายแหลมหมม 30 องศา ต่อลงกราวด์

ระยะห่าง(cm.)	ระดับแรงดันเบรตดาว์(มิโวลท์) 5 ครั้ง					ค่าเฉลี่ย
0.5	4.59	4.68	4.25	4.46	4.46	4.55
1.0	11.25	11.7	11.7	11.7	11.7	11.6
1.5	15.3	14.6	14.9	14.9	14.9	14.92
2.0	17.23	17.02	18.08	18.08	17.8	17.6
2.5	20.2	20.42	20.21	20.21	20.2	20.24
3.0	22.8	23.2	23.2	23.2	23.2	23.12
3.5	25.0	24.9	25.0	24.9	25.1	24.98
4.0	26.38	26.8	26.38	26.38	26.38	26.46
4.5	28.3	28.3	28.3	28.5	28.3	28.34
5.0	30.6	29.36	30.2	29.36	28.7	29.64
5.5	31.0	31.4	31.4	31.4	31.0	31.24
6.0	32.3	32.3	32.3	32.3	32.3	32.3
6.5	34.0	33.6	34.4	34.0	34.0	34.0
7.0	35.7	35.7	34.9	35.3	34.9	35.3
7.5	36.6	36.6	35.7	36.1	36.6	36.32
8.0	37.8	37.8	37.4	37.4	37.4	37.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 มิใช่การเผยแพร่ข้อมูล (บันทึกเป็นค่า r.m.s.)
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตีพิมพ์หรือเผยแพร่ข้อมูลนี้ไปยังสื่อใดๆก็ตาม โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางสถาบัน

ตารางผลการทดลอง

สภาพแวดล้อม: ความดัน 762.8 ม.ม.ปรอท

ความชื้น 74 %

อุณหภูมิ 27.5 °C

รูปแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ทดลอง: แผ่นระนาบ ต่อเข้าสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ

ปลายแหลมมุม 60 องศา ต่อลงกราวด์

ระยะห่าง(cm.)	ระดับแรงดันเบรกดาวน์(กิโลโวลท์) 5 ครั้ง					ค่าเฉลี่ย
0.5	5.74	6.6	6.6	7.6	7.2	6.75
1.0	10.6	10.2	10.2	10.2	10.2	10.3
1.5	14.46	14.6	14.4	14.6	14.4	14.52
2.0	17.8	18.0	17.8	17.8	17.8	17.8
2.5	20.2	20.4	20.2	20.2	20.4	20.8
3.0	23.0	22.8	22.5	22.0	22.3	22.42
3.5	24.2	23.8	24.2	24.2	24.2	24.12
4.0	25.5	25.5	25.5	25.9	25.9	25.66
4.5	28.1	27.2	27.4	28.0	27.2	27.7
5.0	28.7	28.7	28.5	28.7	28.5	28.62
5.5	30.8	30.8	31.0	30.6	30.6	30.76
6.0	31.9	32.3	31.9	31.5	30.9	31.9
6.5	34.0	33.6	33.6	33.6	33.6	33.68
7.0	35.3	35.3	34.8	35.3	35.7	35.28
7.5	36.2	36.2	36.6	36.2	36.2	36.28
8.0	37.8	37.4	37.8	37.8	37.8	37.72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต (บันทึกเป็นค่า r.s.s.) ครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลอง

สภาวะแวดล้อม: ความดัน 763.5 ม.ม.ปรอท

ความชื้น 82 %

อุณหภูมิ 26.5 °c

รูปแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ทดลอง: ทรงกลม ต่อเข้ากับสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ

แผ่นระนาบ ต่อดวงกราว์น

ระยะห่าง(cm.)	ระดับแรงดันเบรตดาวน์(กิโลโวลต์) 5 ครั้ง					ค่าเฉลี่ย
0.5	10.63	10.76	10.63	10.63	10.63	10.66
1.0	20.0	20.13	20.2	20.2	20.2	20.15
1.5	29.5	29.8	30.0	30.0	30.12	30.0
2.0	39.57	39.57	39.57	39.1	39.1	39.4
2.5	46.8	47.2	47.2	47.8	47.23	47.05
3.0	57.0	56.6	57.0	57.0	57.0	56.92
3.5						
4.0						
4.5						
5.0						
5.5						
6.0						
6.5						
7.0						
7.5						
8.0						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตีแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณ ไซฟ้ากระแสสลับ (บันทึกเป็นค่า r.m.s.)

ตารางผลการทดลอง

สภาพแวดล้อม: ความดัน	766.6	ม.ม.ปรอท
ความชื้น	74	%
อุณหภูมิ	27	-

รูปแบบของมิเตอร์ที่ใช้ทดลองจะตรงกลม ต่อเข้ากับสายไฟฟ้ากระแสสลับ
ตรงกลม ต่อลงกราวด์

ระยะห่าง(cm.)	ระดับแรงดันเบรตควาน(กิโลโวลท์) 5 ครั้ง					ค่าเฉลี่ย
0.5	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6
1.0	20.4	20.85	20.85	20.6	20.85	20.7
1.5	32.2	30	30.2	30.2	30.2	30.16
2.0	39.1	38.7	39.1	39.5	39.1	39.1
2.5	48.5	48.5	48.5	48.5	48.1	48.42
3.0	57	57	56.8	56.2	57	56.76
3.5						
4.0						
4.5						
5.0						
5.5						
6.0						
6.5						
7.0						
7.5						
8.0						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตีพิมพ์ลงนิตยสาร และหนังสือพิมพ์ใดๆ ทั้งสิ้น (บันทึกเป็นคำ ร.บ.ร.) ครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลอง

สภาวะแวดล้อม: ความดัน 766.5 ม.ม.ปรอท
 ความชื้น 67 %
 อุณหภูมิ 28.5 °c

รูปแบบของอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ทดลอง: ทรงกลม ต่อเข้าสายอากาศไฟฟ้ากระแสสลับ
 ปลายแหลมมุม 30 องศา ต่อลงกราวด์

ระยะห่าง(cm.)	ระดับแรงดันเบรตดาวน(กิโลโวลท์) 5 ครั้ง					ค่าเฉลี่ย
0.5	5.7	5.7	6	6	6	5.88
1.0	11.5	11	11.7	11	11	11.24
1.5	17.6	17.6	17.6	17.4	17.6	17.56
2.0	20.9	20.9	20.9	21.1	20.9	20.94
2.5	24.5	23.8	24.3	24.3	24.3	24.24
3.0	28.1	27.9	28.1	27.9	27.9	27.98
3.5	30.6	30	30.2	30.6	30.2	30.32
4.0	33.2	33.6	33.6	33.6	33.2	33.44
4.5	36	36.2	36.2	36.2	36.2	36.16
5.0	38.3	38.3	38.3	38.3	38.3	38.3
5.5	40.9	40	40.4	40.4	40	40.34
6.0	43.4	43.8	43.8	43.8	43.8	43.72
6.5	45.5	45.5	45.5	45.5	45.5	45.5
7.0	46.8	46.4	46.4	46.4	46.4	46.48
7.5	48.1	48.1	48.1	48.1	48.1	48.1
8.0	50.6	50.2	50.6	50.2	50.2	50.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตีแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลอง

สภาวะแวดล้อม: ความดัน 764 ม.ม.ปรอท
 ความชื้น 61 %
 อุณหภูมิ 30 °c

รูปแบบของอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ทดลอง: ตรงกลม ต่อเข้ามีดหมายไขฟ้ากระแสนับ
 ปลอกหุ้มหมม 60 องศา ต่อดงกราวด์

ระยะห่าง (cm.)	ระดับแรงดันเบรตดาว์น (กิโลโวลท์) 5 ครั้ง					ค่าเฉลี่ย
0.5	5.9	6.2	5.9	5.9	6.2	6.02
1.0	9.5	9.5	9.8	9.8	9.8	9.68
1.5	13.8	14.0	14.0	14.0	13.6	13.92
2.0	16.8	17.0	17.0	16.8	17.0	16.92
2.5	20.0	20.2	20.4	20.2	20.2	20.2
3.0	22.3	22.3	22.5	22.5	22.5	22.4
3.5	24.7	25.1	24.7	24.7	24.9	24.82
4.0	27.2	27.1	27.2	27.2	27.0	27.14
4.5	29.3	28.9	28.9	28.9	28.9	28.98
5.0	31.4	31.2	31.2	31.2	31.4	31.28
5.5	33.6	33.2	33.6	33.2	33.6	33.44
6.0	34.8	35.7	35.3	34.8	34.8	35.08
6.5	37.4	37.4	37.0	37.0	37.0	37.16
7.0	39.4	39.4	39.6	39.4	39.6	39.48
7.5	40.9	41.1	41.1	41.1	41.1	41.06
8.0	42.5	42.5	43.0	42.5	43.0	42.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ทำซ้ำและเผยแพร่ข้อมูลไปยังบุคคลอื่น (บันทึกเป็นค่า r.m.s.) ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลอง

สภาพแวดล้อม: ความดัน 763.9 ม.ม.ปรอท
 ความชื้น 82 %
 อุณหภูมิ 27 °c

รูปแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ทดลอง: ปลายแหลมมุม 30 องศาต่อเข้ากับสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ
 ย่านระนาบ ต่อดวงกราวด์

ระยะห่าง (cm.)	ระดับแรงดันเบรกดาวน์ (กิโลโวลต์) 5 ครั้ง					ค่าเฉลี่ย
0.5	6.6	6.4	6.3	6.4	6.2	6.38
1.0	9.8	9.6	9.4	9.4	9.15	9.47
1.5	14.25	14.25	14.04	14.04	14.04	14.12
2.0	16.17	16.38	16.38	16.38	16.38	16.34
2.5	18.51	18.51	18.51	18.51	18.9	18.6
3.0	20.64	20.85	20.72	20.85	20.64	20.74
3.5	22.55	22.55	22.76	22.66	22.66	22.64
4.0	24.0	24.0	24.25	24.0	24.0	24.05
4.5	25.1	25.3	25.1	25.3	25.23	25.21
5.0	26.8	26.8	26.6	26.8	26.8	26.76
5.5	28.0	28.1	28.3	28.08	27.87	28.07
6.0	29.7	29.78	29.78	29.78	29.78	29.76
6.5	31.91	31.7	31.7	31.7	31.91	31.8
7.0	34.46	34.04	34.04	34.04	34.04	34.12
7.5	36.17	36.17	36.6	36.17	36.17	36.26
8.0	38.3	38.3	38.7	38.7	38.7	38.54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำไปเผยแพร่ (บันทึกเป็นค่า r.m.s.) ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลอง

สภาพแวดล้อม: ความดัน 766.8 ม.ม.ปรอท
 ความชื้น 75 %
 อุณหภูมิ 29 °C

รูปแบบของมิเลคโตรดที่ใช้ทดลอง: ปลายแหลมมุม 30 องศา ต่อเข้าสายผ่านไขฟ้ากระแสนับ
 ทรงกลม ต่อลงกราวด์

ระยะห่าง (cm.)	ระดับแรงดันเบรคดาวน์ (กิโลโวลท์) 5 ครั้ง					ค่าเฉลี่ย
	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	
0.5	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.76
1.0	11	11	11.2	11.2	11.2	11.12
1.5	16.1	15.9	16.6	16.1	16.6	16.28
2.0	19.1	18.9	18.9	18.9	18.9	18.94
2.5	23	23.2	23.2	23.2	23.2	23.16
3.0	25.5	25.6	25.5	25.7	25.5	25.56
3.5	28	27.8	28.3	28	28.3	28.08
4.0	29.8	29.8	29.3	29.8	29.8	29.7
4.5	33.2	33.2	33.2	33.2	33.2	33.2
5.0	34.9	35.3	35.3	35.1	35.3	34.38
5.5	37.4	36.6	37.2	37.4	37.4	37.12
6.0	39.1	39.1	38.7	39.1	38.9	38.98
6.5	41.2	40	41.2	40	40.4	40.48
7.0	43.4	42.97	43.4	43.2	43.4	43.27
7.5	45.5	46	46	45.1	45.5	45.62
8.0	46.8	46.8	47.2	46.8	47.2	46.96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่ข้อมูลไปยังสาธารณะ (บันทึกเป็นค่า r.m.s.v.) ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลอง

สภาวะแวดล้อม: ความดัน 764 ม.ม.ปรอท
 ความชื้น 75 %
 อุณหภูมิ 29.5 °c

รูปแบบของอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ทดลอง: ปลายแหลมมุม 30 องศา ต่อเข้าสายอากาศโซ่ฟ้ากระแสสลับ
 ปลายแหลมมุม 30 องศา ต่อลงกราวด์

ระยะห่าง(cm.)	ระดับแรงดันเบรคดาวน์(กิโลโวลท์) 5 ครั้ง					ค่าเฉลี่ย
0.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5
1.0	6.6	6.6	6.6	6.8	6.8	6.76
1.5	8.3	8	8.3	8.5	8.3	8.28
2.0	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3
2.5	19.3	19.1	19.3	19.3	19.3	19.26
3.0	22.6	22.6	23	23	22.7	22.82
3.5	26	25.5	25.7	26	25.7	25.78
4.0	28	28	28.1	28.3	28	28.08
4.5	30	30	30	30	30	30
5.0	31.2	31.4	31	31	31.2	31.6
5.5	31.3	31.1	31.3	31.3	31.3	31.26
6.0	33.6	33.4	33.6	33.4	33.2	33.44
6.5	34.4	34.9	34.9	34.7	34.9	34.76
7.0	35.7	36.2	36.2	36.4	36.4	36.18
7.5	37.8	37.4	37.9	37.9	37.4	37.86
8.0	39.3	39.1	39.3	39.1	39.1	39.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 วิทยุภาคโซ่ฟ้ากระแสสลับ(บันทึกเป็นค่า r.s.s.)
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตีพิมพ์ลงนิตยสาร และตีพิมพ์ในหนังสือพิมพ์ใดๆก็ตาม ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลอง

สภาวะแวดล้อม: ความดัน 762.7 ม.ม.ปรอท
 ความชื้น 67 %
 อุณหภูมิ 29.5 °c

รูปแบบของอิเล็คโตรดที่ใช้ทดลอง: ปลายแหลมมุม 30 องศา ต่อเข้าสายพานโซ่ฟ้ากระแสสลับ
 ปลายแหลมมุม 60 องศา ต่อดงกราวด์

ระยะห่าง(cm.)	ระดับแรงดันเบรคดาวน์(กิโลโวลท์) 5 ครั้ง					ค่าเฉลี่ย
0.5	5.5	5.7	5.7	5.7	5.9	5.7
1.0	7.4	7.6	7.8	7.2	7.4	7.48
1.5	9.6	9.8	9.6	9.6	9.6	9.64
2.0	15.5	15.5	15.7	15.7	15.5	15.58
2.5	19.3	19.3	19.3	19.6	19.3	19.36
3.0	23.0	23.0	23.0	23.2	23.0	23.04
3.5	25.7	25.7	25.7	26.0	25.7	25.76
4.0	28.0	27.9	28.0	28.0	27.9	27.96
4.5	29.5	29.3	29.5	29.5	29.5	29.46
5.0	30.6	30.4	30.4	30.6	30.6	30.52
5.5	30.6	30.6	31.0	31.0	31.0	30.84
6.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0
6.5	33.2	33.2	33.4	33.2	33.2	33.24
7.0	34.0	34.4	34.0	34.0	34.2	34.16
7.5	36.6	35.7	36.6	36.2	36.6	36.34
8.0	36.2	36.8	37.0	37.0	37.0	36.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่ลงบนสื่อออนไลน์ (บันทึกเป็นค่า r.m.s.) การนำไปใช้

ตารางผลการทดลอง

สภาพแวดล้อม: ความดัน 763 ม.ม.ปรอท
 ความชื้น 82 %
 อุณหภูมิ 27 °c

รูปแบบมิเตอร์วัดที่ใช้ทดลอง: ป้ายหมอนุน 60 องศา ต่ลเข้าสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ
 มั่นระนาบ ต่ลองกราวัน

ระยะห่าง(cm.)	ระดับแรงดันเบรคดาวัน(กิโลโวลต์) 5 ครั้ง					ค่าเฉลี่ย
0.5	6.38	6.6	6.6	6.38	6.46	6.48
1.0	10.2	10.63	10.76	10.47	10.63	10.54
1.5	14.5	14.5	14.25	14.25	14.25	14.35
2.0	16.4	16.0	16.2	16.17	16.6	16.27
2.5	17.65	17.44	17.23	17.4	17.44	17.44
3.0	19.36	19.36	19.57	19.4	19.57	19.51
3.5	21.8	21.7	21.7	21.0	21.7	21.56
4.0	22.76	22.5	22.9	23.4	22.9	22.4
4.5	24.04	23.6	24.04	24.2	23.4	23.86
5.0	25.32	24.8	25.5	25.1	25.5	25.24
5.5	27.0	26.38	27.2	27.2	27.2	27.0
6.0	27.6	27.6	27.66	28.0	27.87	27.73
6.5	30.0	30.2	29.78	30.0	30.0	30.0
7.0	31.7	31.3	31.5	31.5	31.7	31.54
7.5	34.0	34.0	33.6	34.0	33.6	33.84
8.0	35.7	35.74	35.74	35.7	35.74	35.72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกข้อมูลนี้ไปเผยแพร่ (บันทึกเป็นค่า r.m.s.) ที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลอง

สภาวะแวดล้อม: ความดัน 765 ม.ม.ปรอท
 ความชื้น 67 %
 อุณหภูมิ 29 °c

รูปแบบของอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ทดลอง: ปลายแหลมมุม 60 องศา ต่อเข้าสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ
 ทรงกลม ต่อลงกราวด์

ระยะห่าง (cm.)	ระดับแรงดันเบรคดาวน์ (มิโวลท์) 5 ครั้ง					ค่าเฉลี่ย
0.5	6.2	6.6	6.6	7.4	6.6	6.68
1.0	9.8	10.0	10.2	10.0	10.0	10.0
1.5	14.0	14.0	14.3	14.0	14.3	14.12
2.0	17.0	17.2	17.2	17.2	17.2	17.6
2.5	20.4	21.3	21.3	21.0	21.0	21.0
3.0	23.8	24.3	24.0	24.3	24.0	24.08
3.5	25.5	26.0	26.0	26.0	25.7	25.84
4.0	27.9	27.9	28.1	27.9	28.1	27.98
4.5	30.2	30.2	30.2	30.2	30.2	30.2
5.0	32.3	32.3	32.3	32.3	32.3	32.3
5.5	34.0	34.0	34.3	34.0	34.0	34.06
6.0	36.2	36.2	36.2	36.2	36.2	36.2
6.5	37.9	38.3	37.4	37.9	37.9	37.88
7.0	39.6	39.6	39.6	40.0	39.6	39.68
7.5	41	41.1	40.9	40.9	40.9	40.96
8.0	43.4	43.4	43.4	43.4	43.4	43.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำไปเผยแพร่ในที่สาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาตจากศูนย์ฯ ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลอง

สภาพแวดล้อม: ความดัน	764	ม.ม.ปรอท
ความชื้น	68	%
อุณหภูมิ	31	°c

รูปแบบของอิเลคโตรดที่ใช้ทดลองจะปลาสนหลอมหม 60 องศา ต่อเข้ามีขนาดไฟฟ้ากระแสสลับ
ปลาสนหลอมหม 60 องศา ต่อองกราวด์

ระยะห่าง(cm.)	ระดับแรงดันเบรคดาวน์(อีโวลท์) 5 ครั้ง					ค่าเฉลี่ย
0.5	7.0	6.8	6.8	7.0	6.8	6.88
1.0	10.0	10.0	9.8	10.0	9.8	9.92
1.5	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
2.0	14.0	14.0	13.8	14.0	13.8	13.92
2.5	17.0	16.8	16.6	16.6	16.6	16.72
3.0	22.7	23.0	22.7	22.7	23.0	22.82
3.5	25.3	25.5	25.5	25.7	25.3	25.46
4.0	27.2	27.4	27.2	27.4	27.4	27.32
4.5	28.3	28.3	28.3	28.3	28.3	28.24
5.0	28.5	28.5	28.5	28.7	28.5	28.54
5.5	29.1	28.9	28.9	28.9	28.9	28.94
6.0	30.6	30.6	30.6	31.0	31.0	30.76
6.5	31.5	30.6	30.6	30.6	30.6	30.76
7.0	31.0	31.0	31.4	31.0	31.4	31.16
7.5	32.7	32.3	32.3	32.7	32.3	32.46
8.0	34.4	34.4	34.0	34.4	34.0	34.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมี **สัญญา** ปลง **ไฟฟ้ากระแสสลับ** (บันทึกเป็นค่า **r.m.s.**) ครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลอง

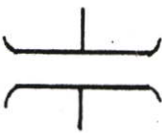

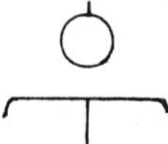
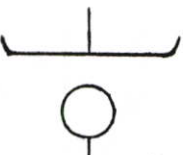
สภาพแวดล้อม: ความชื้น 766 ม.ม.ปรอท
 ความชื้น 67 %
 อุณหภูมิ 29.5 °c

รูปแบบของอิเล็กโทรดที่ใช้ทดลอง: ปลายแหลมมุม 60 องศา ต่อเข้ามีดผ่ากระหนัสนับ
 ปลายแหลมมุม 30 องศา ต่อลงกรรวด

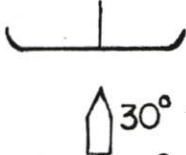
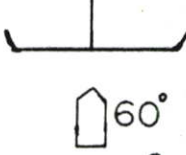

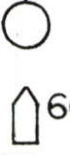
ระยะห่าง(cm.)	ระดับแรงดันเบรตดาวน(กิโลโวลท์) 5 ครั้ง					ค่าเฉลี่ย
0.5	5.5	5.9	5.7	5.7	5.5	5.66
1.0	7.4	7.2	7.4	7.4	7.4	7.36
1.5	8.9	9.1	8.9	9.3	8.9	9.02
2.0	15.3	15.7	15.3	15.3	15.3	15.38
2.5	19.1	19.1	18.9	19.1	18.9	19.02
3.0	22.9	22.5	22.9	22.9	22.5	22.74
3.5	25.1	26.3	25.3	26.1	25.3	25.2
4.0	25.8	26.8	26.6	26.8	26.1	26.52
4.5	27.0	26.8	27.2	27.4	27.2	27.12
5.0	27.2	27.2	27.2	27.4	27.4	27.28
5.5	28.0	28.5	28.3	28.3	28.5	28.32
6.0	28.9	29.4	29.1	29.3	29.8	29.3
6.5	30.8	30.8	30.6	30.8	30.8	30.75
7.0	31.0	31.9	31.4	31.4	31.9	31.52
7.5	32.3	32.7	32.7	32.3	32.7	32.54
8.0	34.0	34.2	34.0	34.2	34.4	34.08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาเข้าสู่ระบบ (บันทึกเป็นค่า r.m.s.) ที่มีการนำไปใช้


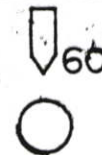
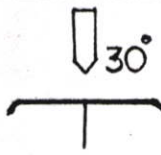
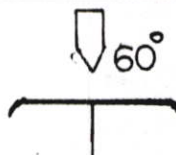
ตารางแสดงค่ากระแสที่ระดับแรงดันต่างๆ ของมิเตอร์ชนิดต่างๆ ที่ระยะแกป 8 cm

ระดับแรงดัน (kV)	กระแสที่ระดับแรงดันต่างๆ ของมิเตอร์ชนิดต่างๆ (mA.)			
	 T= 27.5 °C P= 765 mmHg H= 82 %	 T= 27 °C P= 763 mmHg H= 74 %	 T= 27 °C P= 765 mmHg H= 82 %	 T= 29 °C P= 766 mmHg H= 75 %
9	0.03	0.025	0.035	0.032
18	0.06	0.053	0.065	0.065
27	0.09	0.08	0.1	0.095
36	0.115	0.112	0.135	0.13
45	0.155	0.142	0.165	0.175
54	0.175	0.175	0.2	0.2
63	0.23	0.208	0.235	0.23
72	0.26	0.24	0.26	0.265
81	0.265	0.272	0.305	0.3
90	0.305	0.32	0.345	0.345
99	0.34	0.36	0.39	0.37
108	0.38	0.398	0.435	0.42
117	0.415	0.436	0.475	0.46
126	0.45	0.472	0.52	0.5
135	0.495	0.512	0.57	0.545
144	0.54	0.582	0.61	0.59
153	0.595	0.61	0.648	0.645
162	0.655	0.645	-	0.7
171	0.72	0.67	-	0.76
180	0.809	0.72	-	0.81

ตารางแสดงค่ากระแสที่ระดับแรงดันต่างๆ ของมิเตอร์วัดแต่ละชนิดที่ระยะภาพ 8 cm


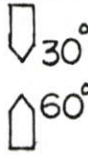
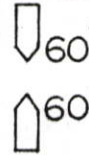
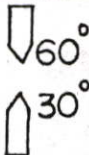
ระดับแรงดัน (Kv)	กระแสที่ระดับแรงดันต่างๆของมิเตอร์วัดแต่ละชนิด(mA.)			
	 T= 27 °C P= 763.5 mmHg H= 82 %	 T= 30.5 °C P= 764 mmHg H= 61 %	 T= 27 °C P= 763 mmHg H= 74 %	 T= 27 °C P= 763 mmHg H= 74 %
6	0.02	0.02	0.02	0.02
12	0.04	0.035	0.04	0.04
18	0.065	0.052	0.06	0.06
24	0.09	0.079	0.08	0.08
30	0.12	0.10	0.11	0.105
36	0.155	0.135	0.14	0.14
42	0.19	0.165	0.17	0.17
48	0.23	0.2	0.205	0.2
54	-	0.235	0.24	0.23
60	-	-	0.275	0.27

ตารางแสดงค่ากระแสที่ระดับรังสีต่างๆ ของมิเตอร์วัดระดับรังสีที่ระยะแกป 8 cm

ระดับรังสี (Kv)	กระแสที่ระดับรังสีต่างๆของมิเตอร์วัดระดับรังสี (mA)			
	 T= 27 °C P= 762.5 mmHg H= 74 %	 T= 27 °C P= 762.5 mmHg H= 74 %	 T= 30 °C P= 764 mmHg H= 68 %	 T= 29 °C P= 765.9 mmHg H= 75 %
6	0.02	0.02	0.02	0.02
12	0.04	0.038	0.038	0.04
18	0.065	0.06	0.06	0.062
24	0.09	0.085	0.09	0.085
30	0.12	0.12	0.12	0.12
36	0.16	0.15	0.165	0.17
42	0.19	0.182	0.205	0.21
48	0.23	0.22	0.25	0.25
54	0.275	0.27	0.295	0.298
60	0.32	0.31	0.345	0.35
66	0.37	0.36	0.4	0.41
72	0.42	0.415	0.46	0.47
78	0.47	0.47	0.52	0.535
84	0.53	0.53	0.59	0.61
90	0.59	0.592	0.67	0.69
96	0.69	0.71	0.795	0.84
102	0.762	0.79	0.89	0.95
108	0.85	0.89	1.0	1.06
114	0.945	0.98	-	1.2
120	1.04	1.08	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น มิอนุญาตให้นำไปประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงค่ากระแสที่ระดับแรงดันต่างๆ ของอิเล็กโตรดแต่ละชนิดที่ระยะแกป 8 cm

ระดับแรงดัน (Kv)	กระแสที่ระดับแรงดันต่างๆของอิเล็กโตรดแต่ละชนิด (mA)			
	 T= 27 °C P= 762.5 mmHg H= 74 %	 T= 27 °C P= 762.5 mmHg H= 74 %	 T= 27 °C P= 762.5 mmHg H= 74 %	 T= 27 °C P= 762.5 mmHg H= 74 %
6	0.02	0.02	0.02	0.02
12	0.04	0.03	0.04	0.038
18	0.06	0.06	0.058	0.06
24	0.075	0.08	0.08	0.08
30	0.115	0.11	0.109	0.11
36	0.16	0.15	0.145	0.15
42	0.2	0.19	0.18	0.192
48	0.245	0.25	0.22	0.24
54	0.305	-	-	0.3
60	0.38	-	-	0.362

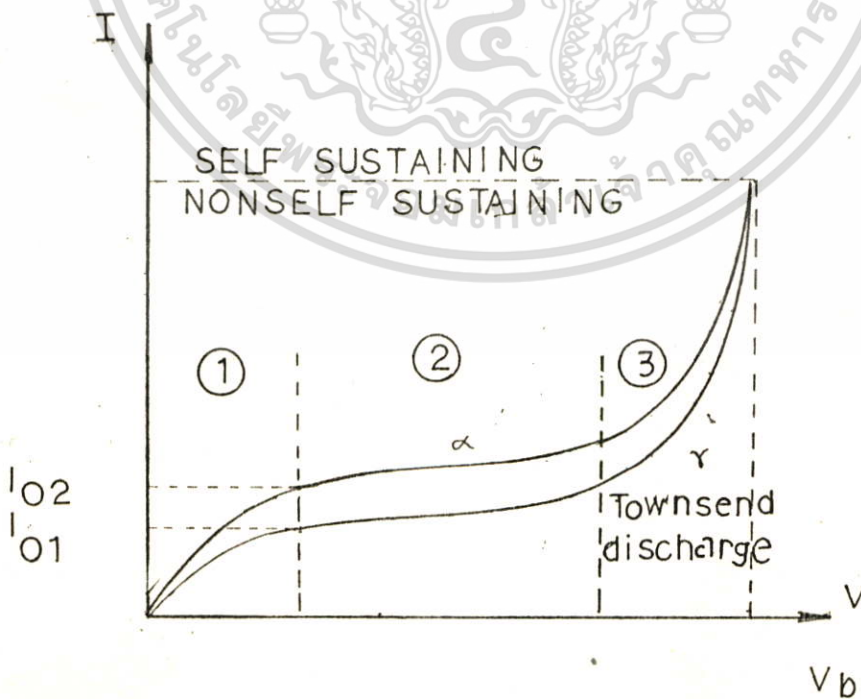
บทที่ 10
สรุปและวิจารณ์

สรุปผลการเบรคความของสนามไฟฟ้าแบบต่าง ๆ

จากตารางผลการทดสอบนำผลการทดลองที่ได้จากการทดสอบมาพลอตกราฟ จากการทดสอบด้วยสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงเราจะได้ความสัมพันธ์ของกราฟระหว่าง กระแส กับ แรงดัน ซึ่งทดสอบที่ระยะแคบ 8 ซม. และ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรคความกับระยะแคบ จากการทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ก็จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรคความกับระยะแคบ นำผลที่ได้มาวิเคราะห์

10.1 ลักษณะกราฟของกระแสในฟังก์ชันของแรงดัน

ถ้าเราให้กระแสเป็นฟังก์ชันของแรงดันตามทฤษฎีจะเห็นว่าสนามไฟฟ้าในตอนแรกเริ่มจะเพิ่มอย่างรวดเร็ว เมื่อถึงค่า 10 v/cm กระแสจะคงที่จนกระทั่งถึงสนามไฟฟ้ามีค่าประมาณ 20 kv/cm กระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งถ้าเพิ่มแรงดันเข้าไปก็จะทำให้เกิด ระยะเวลาของอิเล็กตรอน ซึ่งจะทำให้เกิดการเบรคความ รูปที่ 10.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดรูปนี้ไปทำ และนำออกนอกระบบเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 10.1 กราฟกระแสแรงดัน

เนื่องจากในทางปฏิบัติการวัดค่าในช่วงที่ 1 และช่วงที่ 2 นั้นวัดได้ยากเพราะเครื่องมือจะต้องละเอียดมากจึงจะวัดได้นั้น จึงวัดค่าได้ในช่วงที่ 3 จากผลการวัดค่าแรงดัน กระแสของอิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่าง ๆ เมื่อนำไปพลอตกราฟจะได้ดังรูปที่ 10.2 และ 10.3

เพื่อให้การอธิบายกระชับขึ้นเราจะสมมติว่าอิเล็กทรอนิกส์ที่กล่าวตัวแรกเป็นตัวที่ต่อเข้ากับสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงชั่วลบบิเลคโตรดตัวที่สองเป็นอิเล็กทรอนิกส์ต่อลงกราวด์เช่นการทดสอบปลายแหลมแหลมกับแผ่นระนาบ จะหมายถึงอิเล็กทรอนิกส์แบบปลายแหลมต่อเข้ากับสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงชั่วลบบิเลคโตรดต่อลงกราวด์ เป็นต้น จากกราฟเส้นรูปที่ 10.2 จากกราฟเส้นที่ 1 เป็นกราฟแรงดันและกระแสของการทดสอบอิเล็กทรอนิกส์แบบปลายแหลม 30 องศา กับปลายแหลม 30 องศา จะเห็นว่าการไหลของกระแสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับเส้นที่สอง และสาม ซึ่งเป็นการทดลองอิเล็กทรอนิกส์แบบปลายแหลม 30 องศา กับแผ่นระนาบ และปลายแหลม 30 องศา กับทรงกลมตามลำดับจะเห็นว่าเมื่อต่อปลายแหลมเข้ากับสัญญาณ ที่แรงดันค่า ๆ กระแสของกราฟทั้งสามเส้นจะมีค่าใกล้เคียงกันแต่เมื่อเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้นกระแสของทั้งสามเส้นก็จะแตกต่างกันโดยเส้นที่หนึ่งมีกระแสไหลมากกว่าเส้นที่สอง และสามตามลำดับ เพราะว่าการที่กราฟเส้นที่หนึ่งมีปลายแหลม 30 องศาเป็นตัวต่อลงกราวด์การไหลของกระแสจึงเป็นไปได้ง่ายกว่าแบบที่สองและสามเปรียบเสมือนว่าเป็นวงจรที่มีความต้านทานในการไหลของกระแสต่ำเพราะมีความแคบเรียวของสนามไฟฟ้าที่ปลายแหลมสูงนั่นเอง

กราฟเส้นที่สอง และสามนั้นเป็นปลายแหลม 30 องศา มีแผ่นระนาบและทรงกลมต่อลงกราวด์ตามลำดับ จากการเปรียบเทียบ จะเห็นได้ว่ากราฟเส้นที่สองและสามจะทนแรงดันเบรคดาว์นได้สูงกว่ากราฟเส้นที่ หนึ่ง เพราะสนามไฟฟ้าที่แผ่นเพลทและทรงกลมมีความสม่ำเสมอไม่มีจุดใดที่มีความแคบเรียวสูง ดังนั้นสนามไฟฟ้าที่ปลายแหลมซึ่งมีความแคบเรียวสูงจึงเกิดโคโรนาการเบรคดาว์นก็จะต้องเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้นจึงจะทำให้เกิดการเบรคดาว์น

จากกราฟเส้นที่ 4 และเส้นที่ 5 เป็นการทดสอบแผ่นระนาบกับปลายแหลม 30 องศาและทรงกลมกับปลายแหลม 30 องศา ตามลำดับ เนื่องจากมีอิเล็กทรอนิกส์แบบปลายแหลม 30 องศาต่อลงกราวด์อยู่ การทดสอบนี้จึงเหมือนลักษณะของสายล่อฟ้าที่มีปลายแหลมต่อลงดินอยู่เมื่อมีเลคโตรอนจากแผ่นระนาบหรือทรงกลมลงมาก็จะถูกนำลงดินอย่างรวดเร็วการคงทนเบรคดาว์นแรงดันจึงทนได้ไม่สูงนัก

ส่วนกราฟเส้นที่ 6 และ 7 นั้นเป็นการทดสอบ ทรงกลมกับแผ่นระนาบ และแผ่นระนาบกับทรงกลมจะเห็นว่าที่แรงดันเดียวกันกระแสในเส้นที่ 6 จะมากกว่าเพราะเส้นที่ 6 มีทรงกลมต่อเข้ากับสัญญาณ แผ่นระนาบต่อลงกราวด์เมื่อเรากดสอบที่ระยะแกป 8 ซม. จะทำให้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

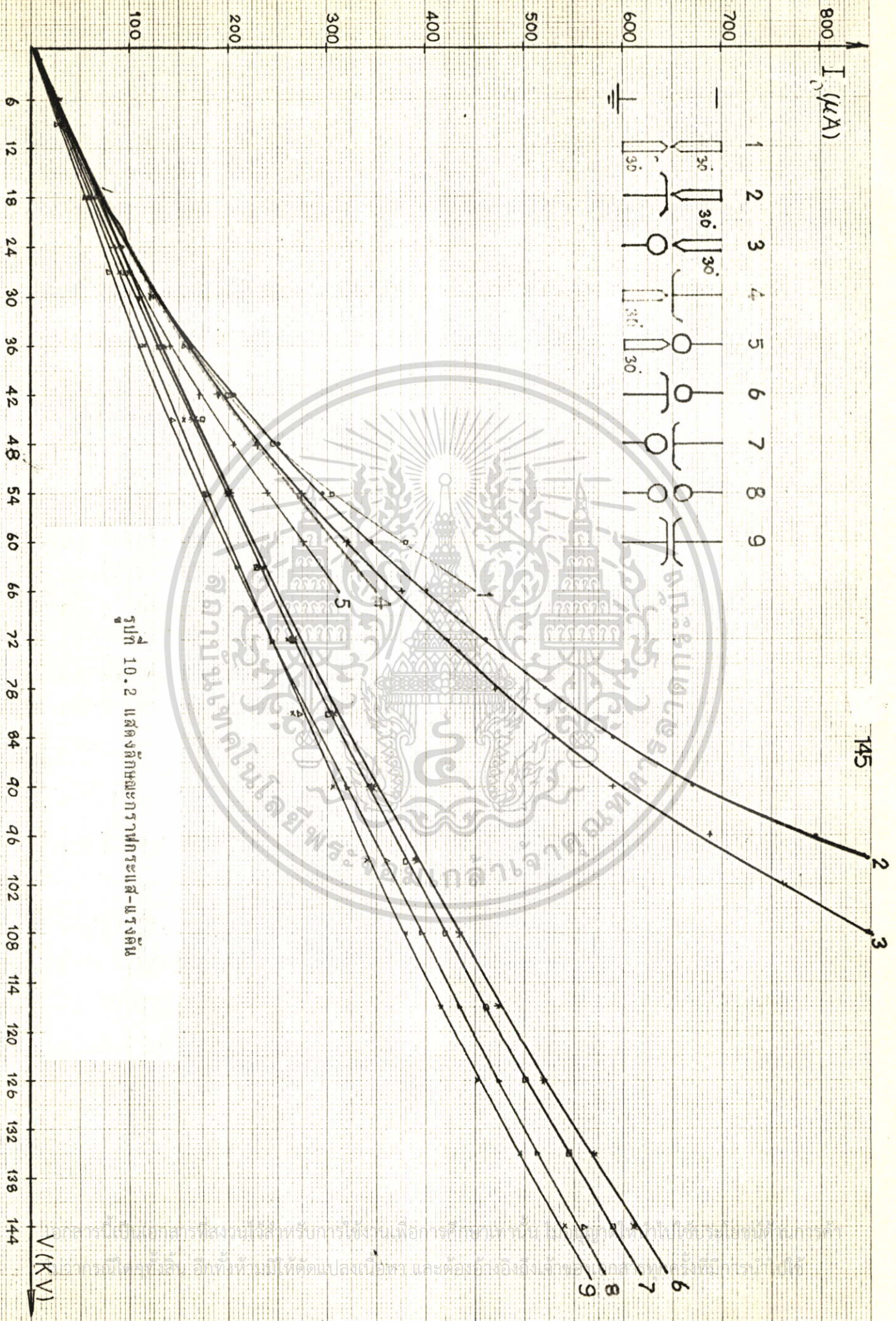
เอกสารนี้เป็นเอกสารหลวงในลิขสิทธิ์ของสำนักงานทรัพย์สินส่วนพระมหากษัตริย์ และอยู่ภายใต้การคุ้มครองตามกฎหมายว่าด้วยการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

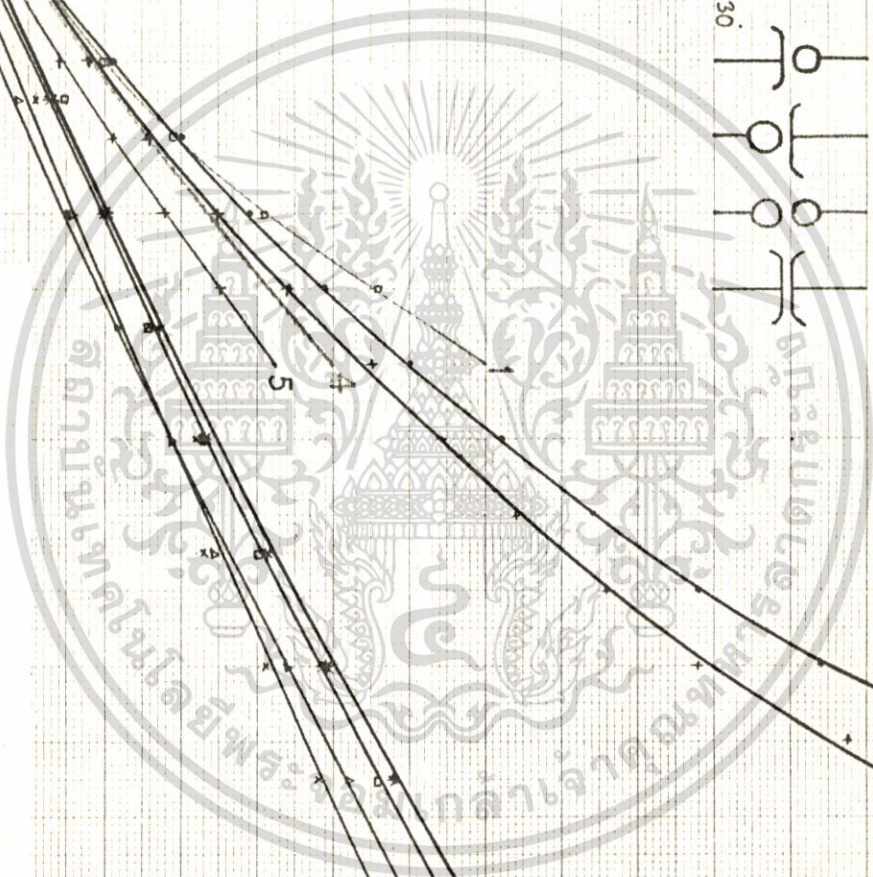
เสมอเล็กน้อย ที่ระยะต่างๆเช่นนี้เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะสนามไฟฟ้าของทรงกลมกับแผ่นระนาบแล้วจะทำให้สนามของทรงกลมเป็นจุดเมื่อเทียบกับแผ่นระนาบ ดังนั้นการทดสอบแบบนี้จึงทำให้เกิดการไอออนไนเซชันได้ที่ระยะแกปสูง ๆ และแรงดันสูง ๆ

กราฟเส้นที่ 8 และ 9 เป็นการทดสอบแรงดัน-กระแสของแผ่นระนาบทรงกลมกับทรงกลมและแผ่นระนาบกับแผ่นระนาบตามลำดับ การทดสอบนี้จะเห็นได้ว่ากระแสของการทดสอบแบบทรงกลมกับทรงกลม จะมีค่ามากกว่าแบบแผ่นระนาบกับแผ่นระนาบ เพราะที่ระยะห่างมาก ๆ สนามไฟฟ้าของทรงกลม จะไม่สม่ำเสมอมากกระแสจึงมากกว่ากราฟเส้นที่ 9 เมื่อจ่ายแรงดันให้เท่ากันเพราะแผ่นระนาบมีลักษณะสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากกว่า การไหลของกระแสจะน้อยกว่าเหมือนกับความต้านทานการไหลของกระแสมีค่ามาก จนกระทั่งเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าถึงจุดวิกฤตจึงทำให้กระแสไหลอย่างมากมาย

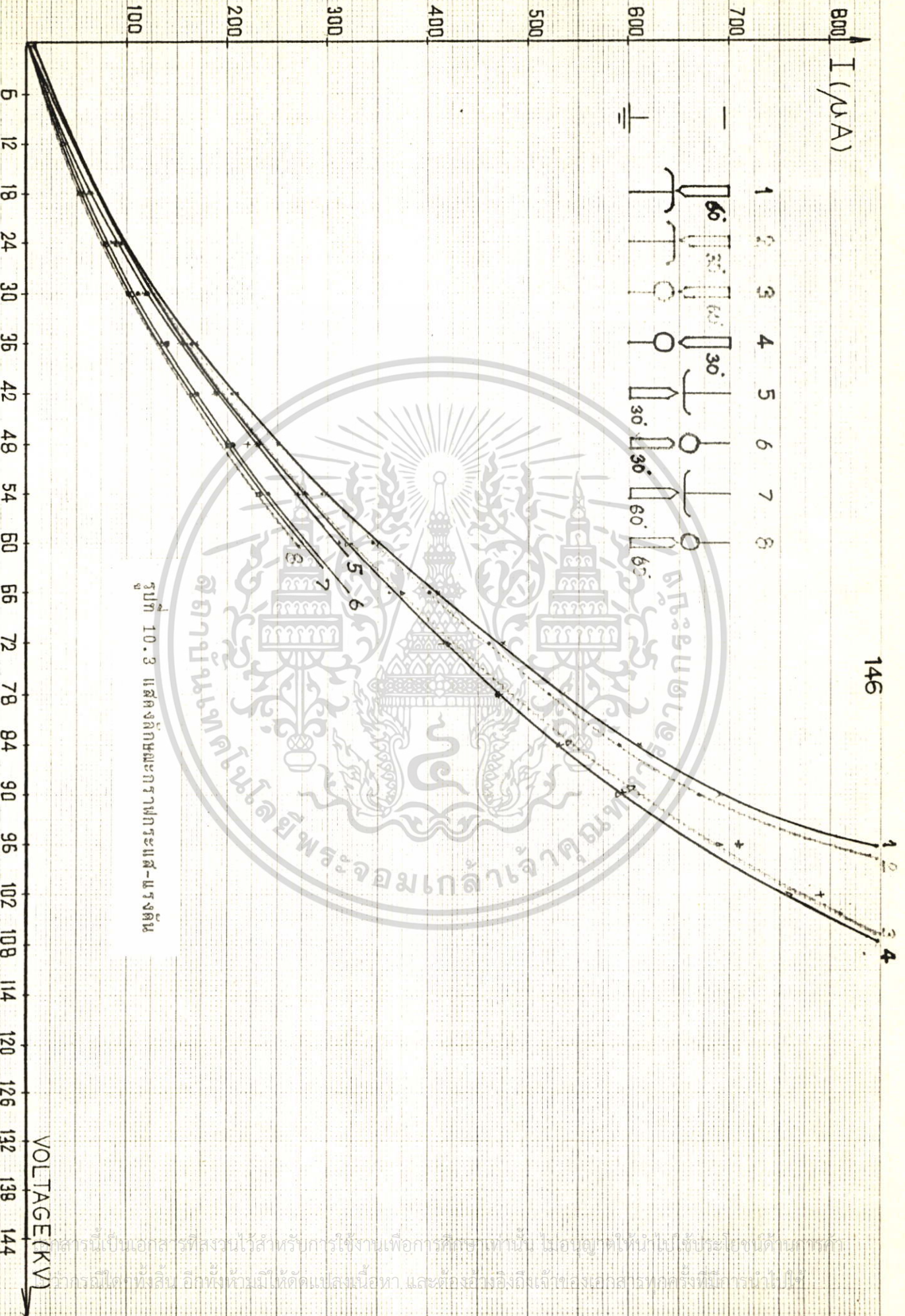
จากกราฟรูปที่ 10.3 เป็นการทดสอบลักษณะของกระแสแรงดันของอิเล็กโตรดแบบปลายแหลม 30 องศาและ 60 องศา กับแผ่นระนาบ และทรงกลม จากกราฟเส้นที่ 1, 2, 3, 4 จะเห็นว่า มีแรงดันเบรคเตาวันสูงกว่ากราฟเส้นที่ 5, 6, 7, 8 ซึ่งเป็นแบบที่มีปลายแหลมต่อลงกราว์ และจะเห็นว่า การทดสอบอิเล็กโตรดที่เป็นปลายแหลมมุม 30 องศาหรือ 60 องศา กับอิเล็กโตรดแบบอื่น ๆ ที่เป็นแบบเดียวกันจะมีค่าการไหลของกระแสไม่ต่างกันมาก



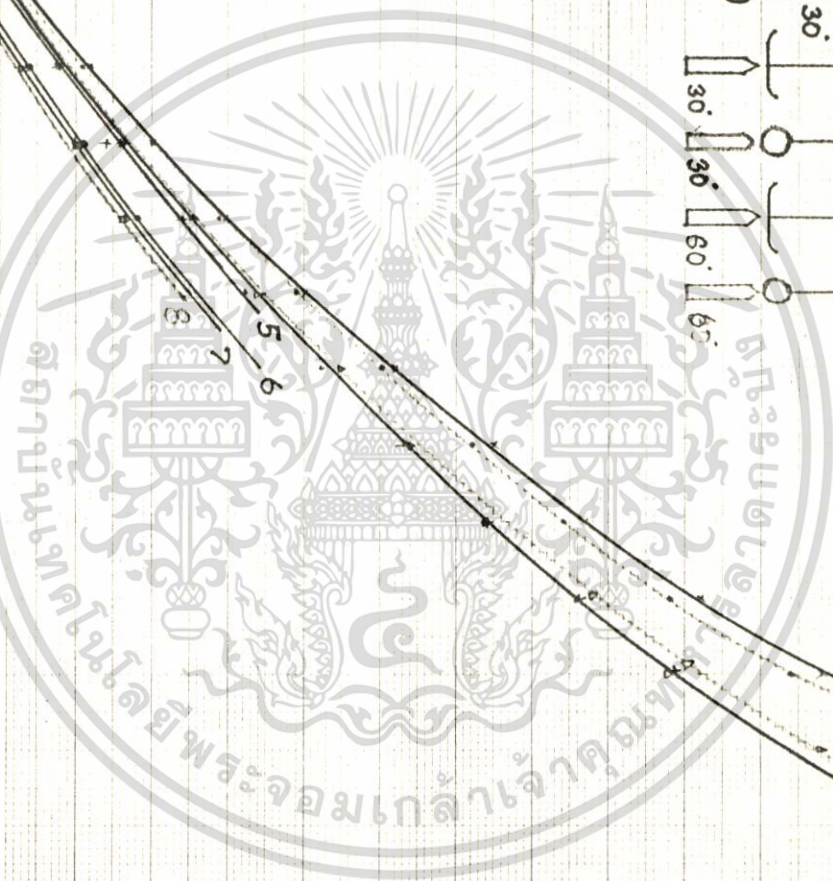
รูปที่ 10.2 แสดงลักษณะกราฟกระแส-แรงดัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ การค้า การโฆษณา หรือการอื่นใดที่ห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารที่ออกให้



รูปที่ 10.3 แสดงลักษณะกราฟกระแส-แรงดัน



10.2 สรุปผลการทดสอบอิเล็กทรอนิกส์ด้วยสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง

เป็นการนำเอาอิเล็กทรอนิกส์แผ่นระนาบ ทรงกลม ปลายแหลม มาทดสอบด้วยสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง โดยมีการสลับสับเปลี่ยนอิเล็กทรอนิกส์ทั้งสามแบบ ให้มีการทดสอบแตกต่างกันออกไป จากผลที่ได้นำมาพลอตกราฟความสัมพันธ์ของระยะแกปต่อแรงดันเบรคดาวน์ ดังแสดงในรูปที่ 10.4 และ 10.5 จากรูปที่ 10.4 จะเห็นว่ากราฟเส้นที่ 1 และเส้นที่ 2 เป็นแบบแผ่นระนาบกับแผ่นระนาบ และทรงกลมกับทรงกลม ตามลำดับ จะเห็นว่ากราฟทั้งสองเส้นนี้จะมีแรงดันเบรคดาวน์ต่อระยะแกปเดียวกันใกล้เคียงกันมากโดยเฉพาะที่แกปต่ำ ๆ แต่เมื่อระยะแกปเพิ่มมากขึ้น แรงดันเบรคดาวน์ของอิเล็กทรอนิกส์แบบแผ่นระนาบกับแผ่นระนาบ จะมีค่าสูงกว่าแบบทรงกลมกับทรงกลม เพราะที่ระยะแกปต่ำ ๆ จะมีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ แต่ที่ระยะแกปมากขึ้น จะทำให้สนามไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์ทรงกลมกับทรงกลมมีลักษณะไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย แรงดันเบรคดาวน์ที่แกปสูง ๆ ซึ่งทำให้ทรงกลมเบรคดาวน์ได้ง่ายกว่า (โดยปกติแล้วจะถือว่าสนามไฟฟ้าของทรงกลมจะสม่ำเสมอเมื่อระยะแกปต่ำกว่ารัศมีของทรงกลม และไม่สม่ำเสมอเมื่อระยะแกปมากกว่ารัศมี)

พิจารณากราฟเส้นที่ 3 และ 4 ซึ่งเป็นการทดสอบแบบ แผ่นระนาบกับทรงกลม และทรงกลมกับแผ่นระนาบตามลำดับ จะเห็นว่าแรงดันเบรคดาวน์ต่อระยะแกปของกราฟเส้นที่ 3 และ 4 ก็จะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเทียบกับเส้นที่ 1 และ 2 แล้วแรงดันเบรคดาวน์ต่อระยะแกปของเส้นที่ 3, 4 จะมีค่าใกล้เคียงกับเส้นที่ 1 และ 2 แต่ที่ระยะแกปมาก ๆ แรงดันเบรคดาวน์จะต่ำกว่า เพราะว่าคุณสมบัติของสนามไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์แบบแผ่นระนาบกับทรงกลมมีความสม่ำเสมอไม่เท่ากัน เมื่อระยะแกปสูง ๆ จะทำให้อิเล็กทรอนิกส์ของทรงกลมมีความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดปลายของทรงกลมสูงซึ่งเหมือนกับอิเล็กทรอนิกส์ทรงกลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กลง ความเครียดที่จุดปลายของอิเล็กทรอนิกส์ทรงกลมจะมีความเครียดสูงสุดจึงทำให้การเบรคดาวน์ได้ง่ายกว่าแบบที่ 1 และ 2 และผลเนื่องจากการทดสอบอิเล็กทรอนิกส์ทรงกลมกับแผ่นระนาบนี้จะมีลักษณะที่น่าสังเกตประการหนึ่งก็คือเมื่อทดสอบทรงกลมกับทรงกลมแรงดันเบรคดาวน์ต่อระยะแกปจะสูงกว่าการทดสอบแบบทรงกลมกับแผ่นระนาบ หรือแผ่นระนาบกับทรงกลม และขณะที่ทำการทดสอบทรงกลมกับแผ่นระนาบนั้น ที่ระยะแกปสูง ๆ จะได้ยินเสียงโคโรน่าเกิดขึ้น เมื่อแรงดันสูงขึ้นก่อนจะถึงการเบรคดาวน์ ฉะนั้นเราจะตั้งสมมุติฐานว่าการเอาอิเล็กทรอนิกส์ที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอของสนามไม่เท่ากันมาทดสอบด้วยกันจะทำให้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากขึ้น และจะพิจารณาการทดสอบอิเล็กทรอนิกส์แบบอื่น ๆ เพื่อยืนยันสมมุติฐานนี้

พิจารณากราฟเส้นที่ 5 และ 6 เป็นการทดสอบอิเล็กทรอนิกส์แบบปลายแหลมมุม 30 องศา

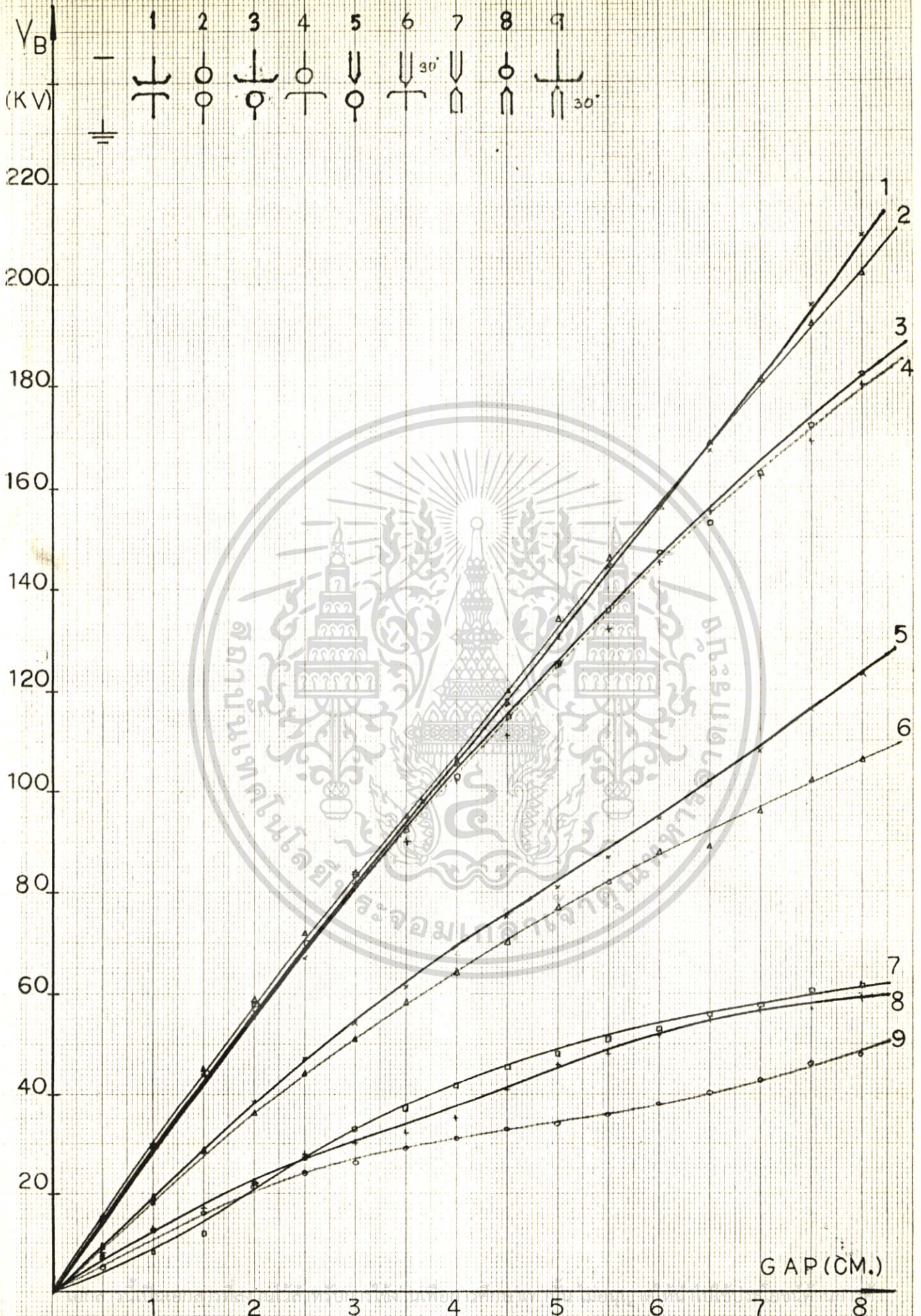
กับทรงกลม และปลายแหลม 30 องศา กับแผ่นระนาบตามลำดับจะเห็นว่ากราฟของแรงดันเบรคดาวน์ต่ำกว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ต่อระยะแกบของเส้นที่ 6 จะมีค่าต่ำกว่าเส้นที่ 5 จากทฤษฎีเราทราบว่า ค่า n^* ของอิลคโตรดแผ่นระนาบ, ทรงกลม จะมีค่าสูงกว่าปลายแหลมตามลำดับ จากกราฟผลของการเบรคตาว์นของกราฟเส้นที่ 5 มีแรงดันเบรคตาว์นสูงกว่าเส้นที่ 6 เพราะว่าลักษณะสนามไฟฟ้าของแบบที่ 5 จะมีความสม่ำเสมอมากกว่าแบบที่ 6 นั่นคือเมื่อเรานำเอาอิลคโตรดที่มีความสม่ำเสมอสูงมากทดสอบกับอิลคโตรดที่ไม่สม่ำเสมอ จะทำให้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงขึ้น ดังเช่นในกรณีของแผ่นระนาบทดสอบกับปลายแหลม จะมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากกว่า ทรงกลมทดสอบกับปลายแหลม ซึ่งผลของการทดสอบของอิลคโตรดที่มีลักษณะของสนามไฟฟ้าต่างกันจะทำให้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากขึ้น จะสังเกตได้จากกราฟเส้นที่ 7, 8, และ 9 จะเห็นว่าจากกราฟเส้นที่ 7 เป็นผลการทดสอบของปลายแหลมกับปลายแหลม จะมีแรงดันเบรคตาว์นต่อระยะแกบเดียวกันสูงกว่า กราฟเส้นที่ 8 ซึ่งเป็นการทดสอบทรงกลมกับปลายแหลม และเส้นที่ 8 ก็จะมีแรงดันเบรคตาว์นต่อระยะแกบสูงกว่าการทดสอบอิลคโตรดแผ่นระนาบกับปลายแหลมดังในกราฟเส้นที่ 9 และเมื่อพิจารณาจากกราฟเส้นที่ 5 และ 6 จะเห็นว่าแรงดันเบรคตาว์นของการทดสอบอิลคโตรดแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (ปลายแหลม) กับอิลคโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (แผ่นระนาบ) จะมีแรงดันเบรคตาว์นต่อระยะแกบต่ำกว่าอิลคโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (ปลายแหลม) กับอิลคโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (ทรงกลม)

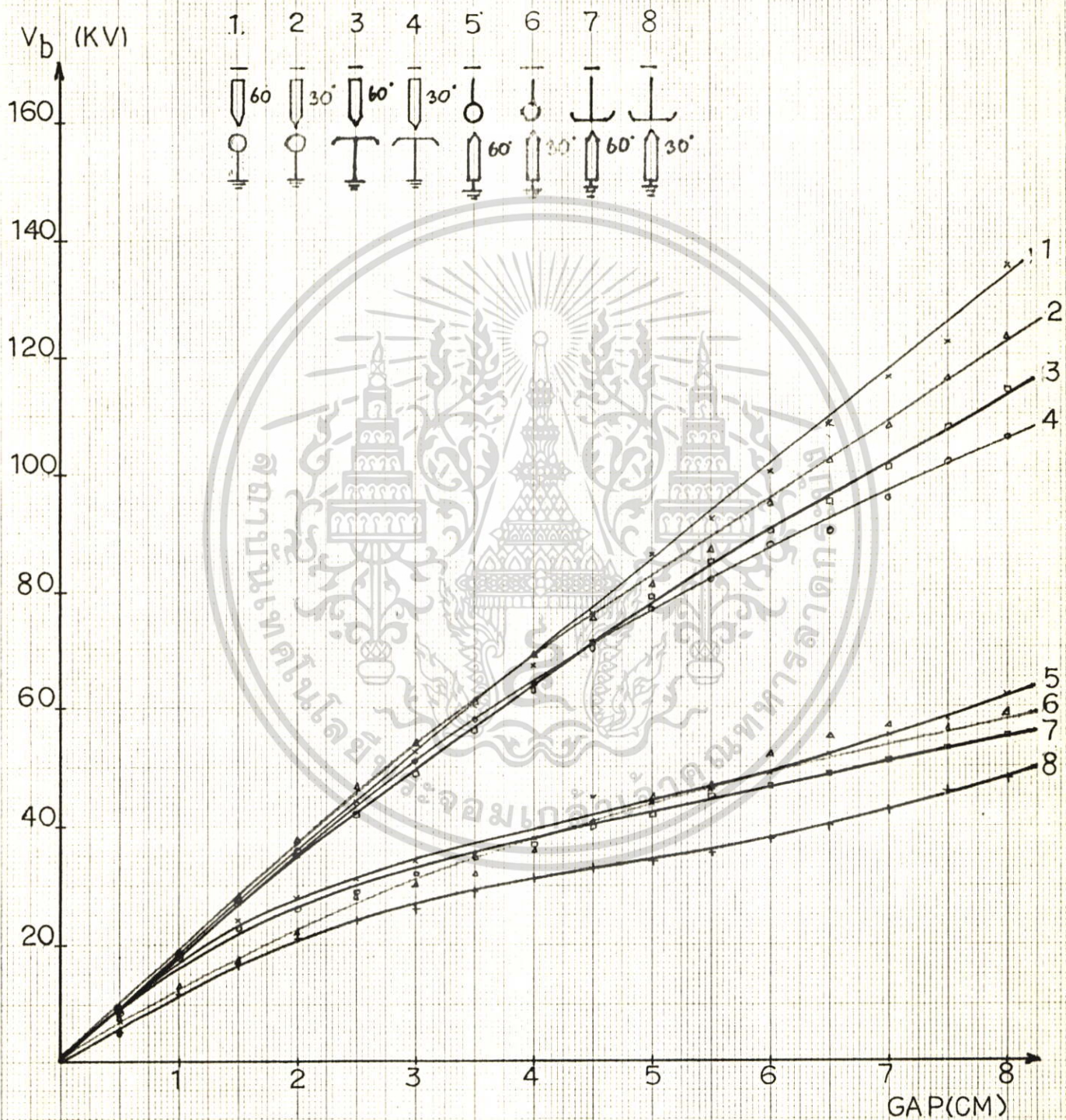
พิจารณากราฟรูปที่ 10.5 จะเป็นการเปรียบเทียบแรงดันเบรคตาว์นต่อระยะแกบ ของการทดสอบอิลคโตรดแบบปลายแหลม 60 องศา เปรียบเทียบกับปลายแหลม 30 องศา จากกราฟเส้นที่ 1 และ 2 เป็นการทดสอบอิลคโตรดปลายแหลม 60 องศา กับทรงกลม และปลายแหลม 30 องศา กับทรงกลม จะเห็นว่ากราฟเส้นที่ 1 มีแรงดันเบรคตาว์นต่อระยะแกบสูงกว่า และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับกราฟเส้นที่ 3 และ 4 ซึ่งเป็นการทดสอบอิลคโตรดปลายแหลมมุม 60 องศา กับแผ่นระนาบและปลายแหลมมุม 30 องศา กับแผ่นระนาบตามลำดับ ก็ จะเห็นว่าแรงดันเบรคตาว์นต่อระยะแกบของกราฟเส้นที่ 3 มีค่าสูงกว่าเส้นที่ 4 เราจะสรุปได้ว่าอิลคโตรดที่มีมุมปลายแหลมมากกว่า (เมื่อทดสอบด้วยสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง) จะมีแรงดันเบรคตาว์นสูงกว่านั้นคืออิลคโตรดที่มีมุมแหลม ๆ จะเบรคตาว์นได้ง่าย (เมื่อพื้นที่ของจุดปลายแหลมมีค่าเท่ากัน) เพื่อเป็นการยืนยันสมมุติฐานนี้ เราพิจารณากราฟเส้นที่ 5, 6 และเส้นที่ 7, 8 เส้นที่ 5 และ 6 เป็นการทดสอบอิลคโตรดทรงกลมกับปลายแหลมมุม 60 องศา และทรงกลมกับปลายแหลมมุม 30 องศา ตามลำดับ จะเห็นว่ากราฟเส้นที่ 6 จะมีแรงดันเบรคตาว์นต่อระยะแกบต่ำกว่าเส้นที่ 5 พิจารณาเส้นที่ 7 และ 8 เป็นการทดสอบอิลคโตรด แผ่นระนาบ กับปลายแหลมมุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

60 องศา และแผ่นระนาบกับปลายแหลมมุม 30 องศา ตามลำดับก็จะเห็นว่าการทดสอบแผ่นระนาบกับปลายแหลมมุม 60 องศาจะมีแรงดันเบรคควานต์ต่อระยะแกปสูงกว่าการทดสอบแผ่นระนาบกับปลายแหลมมุม 30 องศา ดังนั้นเราจะสรุปได้ว่าการทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสตรงอิลเลคโตรดที่มีปลายแหลมมากๆ จะเกิดเบรคควานต์ได้ง่ายกว่าอิลเลคโตรดที่มีปลายแหลมน้อยกว่า (โดยที่อิลเลคโตรดทั้งสองมีพื้นที่ที่ปลายแหลมเท่ากัน) แต่ทั้งนี้จะเห็นว่าผลของมุมของปลายแหลมจะทำให้แรงดันเบรคควานต์ไม่แตกต่างกันมากนัก (สิ่งที่มีผลมากที่สุดคือพื้นที่ที่ปลายแหลมนั้น) และเพื่อยืนยันสมมุติฐานสมมุติฐานที่เราตั้งไว้ว่าการทดสอบอิลเลคโตรดที่ไม่สม่ำเสมอสูงกับอิลเลคโตรดแบบสม่ำเสมอ จะทำให้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงยิ่งขึ้น โดยพิจารณาการทดสอบอิลเลคโตรดปลายแหลมมุม 60 องศาทดสอบกับแผ่นระนาบและอิลเลคโตรดปลายแหลมมุม 60 องศา ทดสอบกับทรงกลมจากกราฟรูปที่ 10.5 จะแสดงให้เห็นว่าการทดสอบอิลเลคโตรดปลายแหลมมุม 60 องศา (หรือ 30 องศา) ทดสอบกับแผ่นระนาบจะมีแรงดันเบรคควานต์ต่อระยะแกปต่ำกว่าการทดสอบอิลเลคโตรดปลายแหลมมุม 60 องศา (หรือปลายแหลมมุม 30 องศา) กับทรงกลม ดังนั้นจะสรุปในส่วนของ การทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสตรงได้ว่า 1. ลักษณะของอิลเลคโตรดที่มีผลต่อการเบรคควานต์ 2. การทดสอบอิลเลคโตรดที่มีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากกับอิลเลคโตรดที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงจะทำให้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงยิ่งขึ้นทำให้แรงดันเบรคควานต์ต่ำลง 3. ในการทดสอบอิลเลคโตรดสองชนิดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าไม่เท่ากันถ้าเอาอิลเลคโตรดที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงกว่าอิลเลคโตรดอีกตัวต่อลงกราวด์จะทำให้เกิดการเบรคควานต์ได้ง่ายขึ้น การทดสอบนี้เป็นการยืนยันในหลักการของการป้องกันฟ้าผ่าที่ใช้ปลายแหลมเป็นล่อฟ้า



ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 รูปที่ 10.4 กราฟแสดงแรงดันเบรคความ V_b เทียบกับระยะแนบ d ทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสตรง



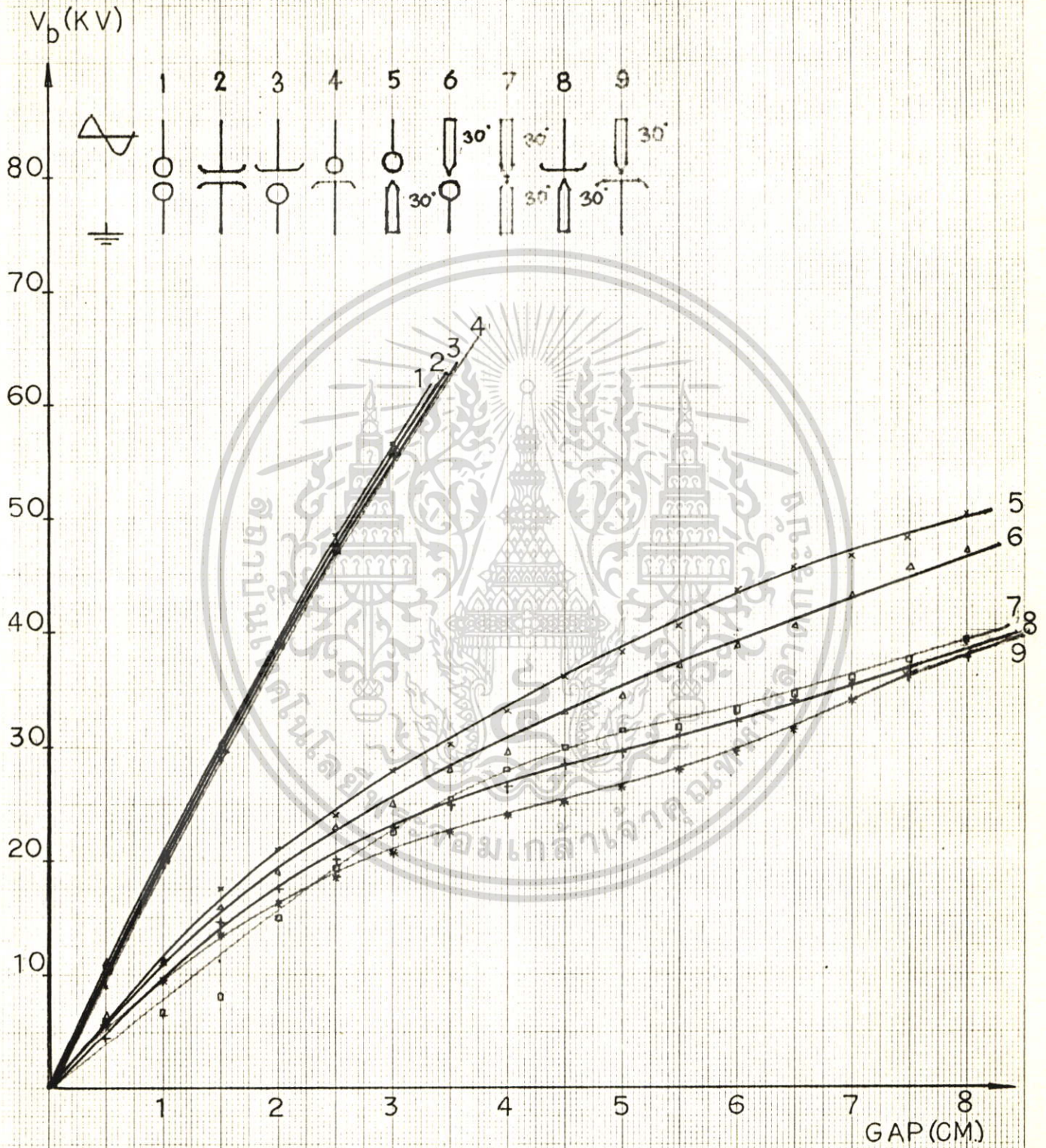
รูปที่ 10.5 กราฟแสดงแรงดันเบรคดาวน์ V_b เกี่ยวกับระยะแกป d ทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่สามารถส่งต่อทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีไม่ใช้

10.3 สรุปผลการทดสอบอิลเลคโตรดด้วยสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ

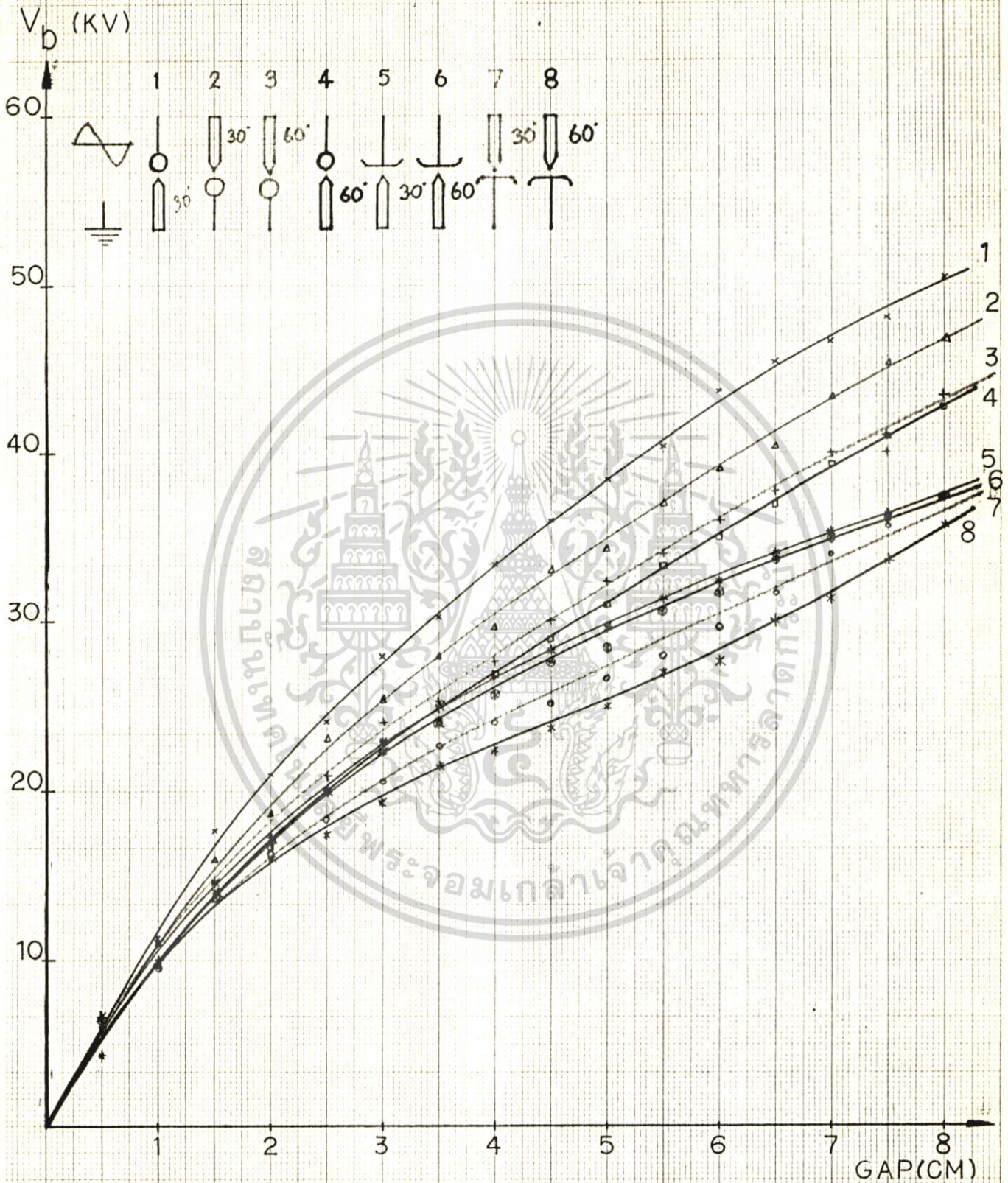
เป็นการนำเอาอิลเลคโตรดแบบแผ่นระนาบ ทรงกลม ปลายแหลม มาทดสอบกับสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับโดยอิลเลคโตรดอีกตัวหนึ่งต่อลงกราวด์ (เพื่อให้ข้อความกระชับรัดกุมเราจะให้อิลเลคโตรดที่กล่าวตัวแรกเป็นอิลเลคโตรดที่ต่อเข้ากับสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ อิลเลคโตรดตัวที่สองต่อลงกราวด์ เช่น ทรงกลม-แผ่นระนาบ หมายถึงทรงกลมต่อเข้ากับสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ แผ่นระนาบต่อลงกราวด์ เป็นต้น) เมื่อนำค่าเฉลี่ยมาพลอตกราฟ ระยะแกป-แรงดันเบรคดาวน์ จะได้ดังรูปที่ 10.6 และ 10.7 รูปที่ 10.6 เป็นการทดสอบอิลเลคโตรดแบบแผ่นระนาบ ทรงกลม ปลายแหลมมุม 30 องศา จากกราฟจะเห็นว่ากราฟเส้นที่ 1, 2, 3, 4 มีแรงดันเบรคดาวน์ใกล้เคียงกันมากเพราะว่าสนามไฟฟ้าของ ทรงกลม-ทรงกลม , แผ่นระนาบ- แผ่นระนาบมีความสม่ำเสมอใกล้เคียงกันที่แกปต่าง ๆ และแรงดันเบรคดาวน์ของแผ่นระนาบ-ปลายแหลม , ปลายแหลม-แผ่นระนาบ ก็จะมีแรงดันเบรคดาวน์ต่ำกว่าการต่อแบบปลายแหลม-ทรงกลมหรือทรงกลม-ปลายแหลม ทั้งนี้เป็นเพราะผลจากสนามไฟฟ้าระหว่างอิลเลคโตรดที่สม่ำเสมอกับไม่สม่ำเสมอ จะทำให้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากขึ้น และจะเห็นได้ว่าการกลับขั้วของอิลเลคโตรดเช่นปลายแหลม-แผ่นระนาบเป็น แผ่นระนาบ-ปลายแหลม จะมีแรงดันเบรคดาวน์ใกล้เคียงกันเนื่องจากไม่มีผลจากขั้วแรงดันที่ป้อน ดังจะเห็นได้จากการกลับขั้วของอิลเลคโตรดแบบอื่น ๆ เช่น ทรงกลม-แผ่นระนาบเป็น แผ่นระนาบ- ทรงกลม หรือ ทรงกลม- ปลายแหลม เป็น ปลายแหลม-ทรงกลม ก็จะไม่แสดงผลแตกต่างของการกลับขั้วมากนัก ถ้าเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงจะเห็นผลของการกลับขั้วแรงดันได้ชัดเจนผลของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับนี้จะทำให้แรงดันเบรคดาวน์ต่ำลงเมื่อระยะแกปมากขึ้น เนื่องจากค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัดไฟฟ้ากระแสสลับเป็นค่า rms ดังนั้นที่ระยะแกปเดียวกันอิลเลคโตรดชนิดเดียวกันจะเห็นว่าแรงดันเบรคดาวน์ที่ระยะแกปค่าต่ำ ๆ ของการทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสสลับจะน้อยกว่าประมาณ $1/2$ เท่าของการทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสตรง (ประมาณ 1.4 เก้า) แต่เมื่อระยะแกปมากขึ้นแรงดันเบรคดาวน์ของสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับจะต่ำลงมากกว่า 1.4 ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องจากความถี่ที่เกิดขึ้น

พิจารณากราฟรูปที่ 10.7 จะเห็นว่าการสลับขั้วสัญญาณที่ต่อเข้าอิลเลคโตรด (เช่น เมื่อทดสอบแผ่นระนาบกับทรงกลมโดยครั้งแรกต่อสัญญาณเข้าที่แผ่นระนาบ แล้วการทดสอบครั้งที่สองต่อสัญญาณเข้าที่ทรงกลม) มีผลต่อแรงดันเบรคดาวน์เล็กน้อยและอิลเลคโตรดตัวที่มีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอเล็กน้อยต่อเข้ากับสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ โดยอิลเลคโตรดที่มีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากกว่าต่อลงกราวด์จะมีแรงดันเบรคดาวน์สูงกว่าการเอาสัญญาณต่อเข้ากับอิลเลคโตรดที่มีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ และเอาอิลเลคโตรดที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงกว่าต่อลงกราวด์นั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 10.6 กราฟแสดงแรงดันเบรคควาน V_b เทียบกับระยะแกป d ทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่สามารถตีพิมพ์หรือทำซ้ำอื่น ๆ ได้โดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 10.7 กราฟแสดงแรงดันเบรคดาวน์ V_b เทียบกับระยะแกป d ทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับสารใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา
 ในที่อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางผู้จัดทำ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำใช้

10.4 สรุปการเปรียบเทียบการทดสอบอิลেকโตรดด้วยสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงกับกระแสสลับ

จากตารางการทดลอง การทดสอบอิลেকโตรดด้วยสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงค่าที่วัดออกมาได้เป็นค่าแรงดัน ไฟฟ้ากระแสตรง และการทดสอบอิลেকโตรดด้วยสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับค่าที่วัดออกมาได้จะเป็นค่า rms เมื่อนำผลของการทดสอบทั้งสองมาพลอตกราฟโดยใช้สัญลักษณ์ A แทนการทดสอบด้วยสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง และ สัญญาณ B แทนการทดสอบด้วยสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ จะได้ดังรูปที่ 10.8 และ 10.9

จากรูปที่ 10.8 เป็นการเปรียบเทียบการเบรคความของสนามไฟฟ้าสามแบบ ของสองสัญญาณ ถ้าเปรียบเทียบการเบรคความของไฟฟ้ากระแสตรงจะเห็นว่าสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (เห็นกราฟ 1A) จะมีแรงดันเบรคความสูงสุด และสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (เห็นกราฟรูป 2A) มีแรงดันเบรคความต่อระยะแคบสูงกว่าแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (เห็นกราฟ รูป 3A) เมื่อทดสอบด้วยสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับก็จะได้ผลเช่นเดียวกับการทดสอบด้วยสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง จากที่เราวัดสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงเป็น kv dc และกระแสสลับเป็น kv rms ซึ่งแรงดัน kv rms จะน้อยกว่า kv dc อยู่ $\sqrt{2}$ เท่า ซึ่งถ้าหากไม่มีผลเนื่องจากความถี่เห็นกราฟของอิลেকโตรดแบบเดียวกันที่ทดสอบด้วยสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้้ากระแสสลับจะต้องมีลักษณะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดันเบรคความต่อระยะแคบเป็นอัตราส่วนใกล้เคียงกัน แต่จากผลที่ได้จะเห็นได้ว่าที่ระยะแคบห่าง ๆ ออกไป การทดสอบด้วยสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับจะมีแรงดันเบรคความต่ำลงดังจะเห็นว่าเห็นกราฟของ A และ B ห่างกันออกไปเรื่อย ๆ ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะเป็นผลเนื่องมาจากการเกิดความถี่ของการทดสอบด้วยสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับทำให้แรงดันเบรคความต่ำลงและที่ระยะแคบมากขึ้นอัตราการเพิ่มของแรงดันก็จะยิ่งต่ำลง

จากรูปที่ 10.9 แสดงให้เห็นการทดสอบอิลেকโตรดแผ่นระนาบ , ทรงกลม, และปลายแหลม โดยสลับขั้วสัญญาณที่ต่อเข้ากับอิลেকโตรด จากกราฟรูปที่ 10.9 ให้สัญลักษณ์ A ที่ตามหลังตัวเลขคือการทดสอบด้วยสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง สัญลักษณ์ B คือการทดสอบด้วยสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ จากเส้นที่ 1A , 2A และ 1B , 2B จะเห็นว่ากราฟกลับขั้วสัญญาณการทดสอบของอิลেকโตรดแบบระนาบกับทรงกลมจะไม่มีผลต่อแรงดันเบรคความมากนักถ้าขนาดแผ่นระนาบกับทรงกลมมีขนาดใกล้เคียงกัน และระยะแคบห่างกันไม่เกินรัศมีของทรงกลม สนามไฟฟ้าก็จะถือว่าเกือบสม่ำเสมอ การกลับขั้วแรงดันของทั้ง AC และ DC ก็จะมีแรงดันเบรคความใกล้เคียงกัน (ในแต่ละสัญญาณ)

ถ้าพิจารณาการกลับขั้วสัญญาณ ของปลายแหลมกับทรงกลมดังกราฟเส้นที่ 3A และ 5A ซึ่ง

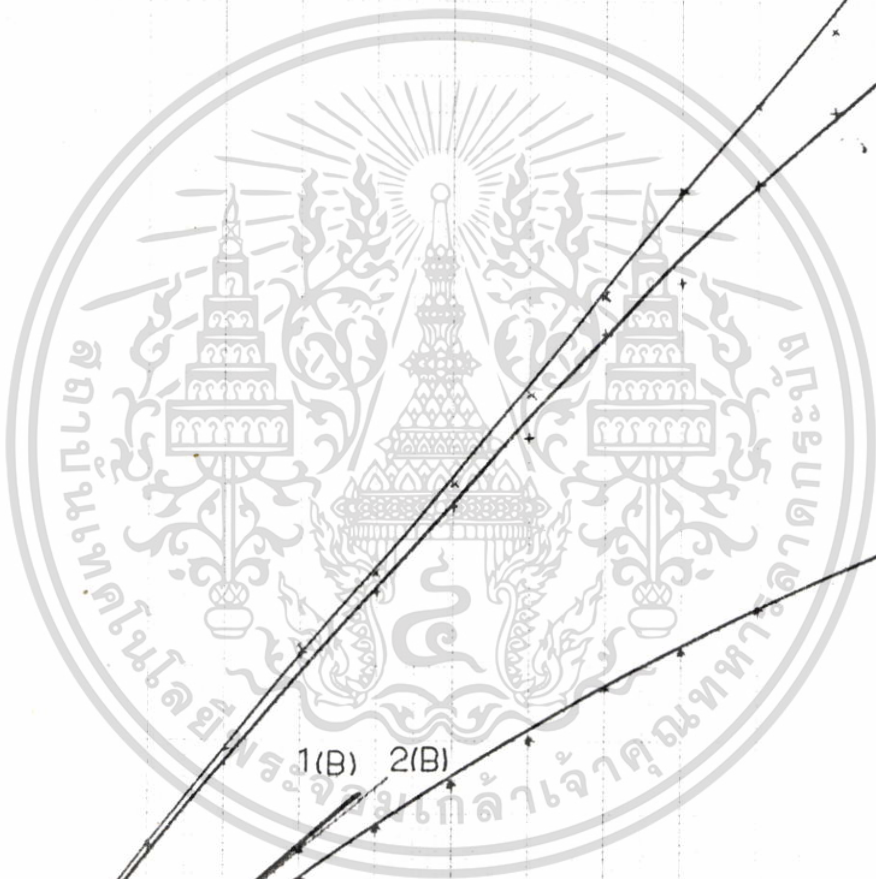
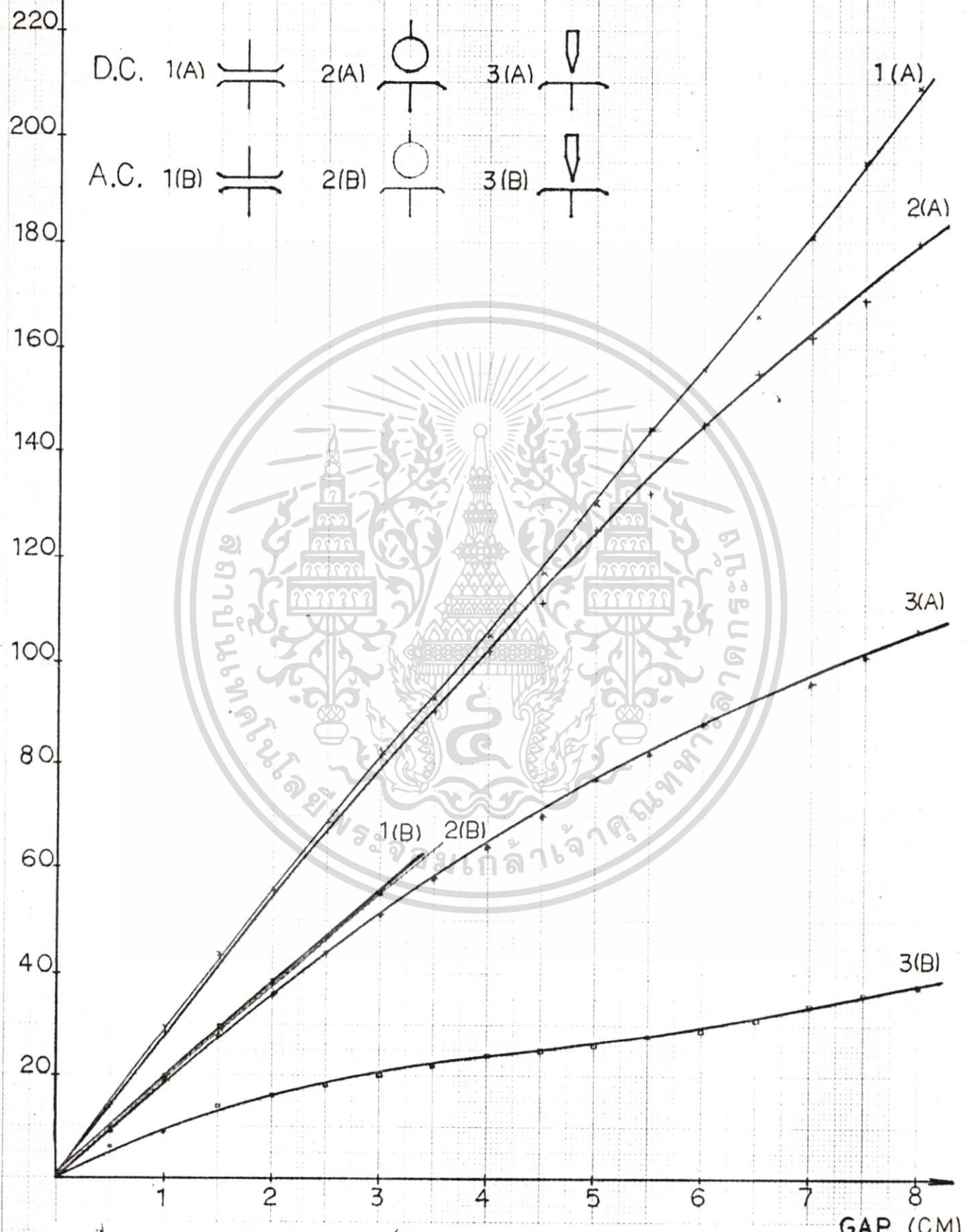
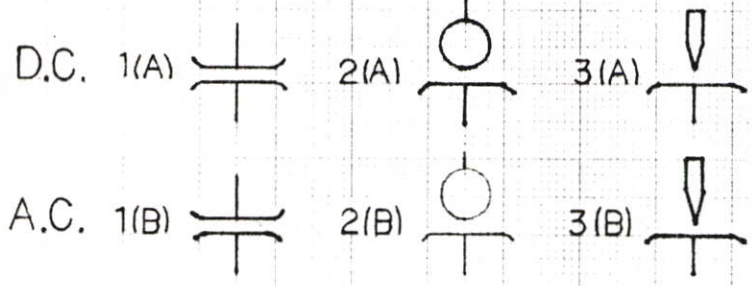
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบด้วยสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง หรือ 3B กับ 5B ซึ่งเป็นการทดสอบด้วยสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับจะเห็นว่า เส้นกราฟ 3A และ 5A จะมีแรงดันเบรคควาน์แตกต่างกันมากโดยที่เส้นกราฟ 3A (ปลายแหลมต่อเข้ากับสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงชั่วลบ) จะมีแรงดันเบรคควาน์ต่อระยะแกปสูงกว่าเส้นกราฟ 5A (ปลายแหลมต่อลงกราว์) แต่จะเห็นว่าเส้นกราฟที่ 3B (ปลายแหลมต่อเข้ากับสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ ทรงกลมต่อลงกราว์) กับเส้นกราฟ 5B (ปลายแหลมต่อลงกราว์ ทรงกลมต่อเข้ากับสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ) จะมีค่าแรงดันเบรคควาน์ต่อระยะแกปไม่ต่างกันมากนักและถ้าพิจารณาการทดสอบปลายแหลมกับแผ่นระนาบ จากกราฟเส้นที่ 4A และ 6A เป็นการทดสอบด้วยสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง ก็จะเป็นลักษณะเดียวกัน คือถ้าปลายแหลมต่อเข้ากับสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงชั่วลบ แผ่นระนาบต่อลงกราว์ จะมีแรงดันเบรคควาน์ที่ระยะแกปเดียวกันสูงกว่าเมื่อเอาแผ่นระนาบต่อเข้ากับสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงชั่วลบ ปลายแหลมต่อลงกราว์ทั้งนี้เพราะเมื่อเอาปลายแหลมต่อเข้ากับสัญญาณชั่วลบเมื่อเกิดอิเล็กตรอนขึ้นในช่องว่าง อิเล็กตรอนก็จะวิ่งเข้าไปหาแผ่นระนาบ ทำให้เกิดไอออนในชั้นชั้นอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะรวมตัวกับโมเลกุลเกิดเป็นประจุบวกภายในสนามไฟฟ้าที่มีความสม่ำเสมอต่ำ (ปลายแหลม) ส่วนไอออนบวกที่เกิดขึ้นวิ่งไปหาชั่วลบ อิทธิพลของประจุลบนี้ทำให้สนามไฟฟ้าที่หน้าคาโอด(ชั่วลบ) มีค่าลดลงทำให้เกิดการเบรคควาน์ได้ยากขึ้น การเกิดเบรคควาน์ในปลายแหลมชั่วบวกจะสามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่อชั่วบวกของสัญญาณต่อเข้ากับอิเล็กโตรดแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง(ปลายแหลม) ชั่วลบต่อเข้ากับอิเล็กโตรดแบบสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ(แผ่นระนาบ , ทรงกลม) เมื่อเกิดอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนจะถูกดึงเข้าไปหาอะโนด(ชั่วบวก) และเกิดไอออนในชั้นทำให้ประจุบวกของไอออนบวกชั้นที่ผิวหน้าของอิเล็กโตรด(แบบปลายแหลม) จะทำให้เปรียบเสมือนว่าอิเล็กโตรดชั้นออกมาทำให้เหมือนกับว่าช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรดน้อยลง จึงทำให้การเบรคควาน์ได้ง่ายกว่า

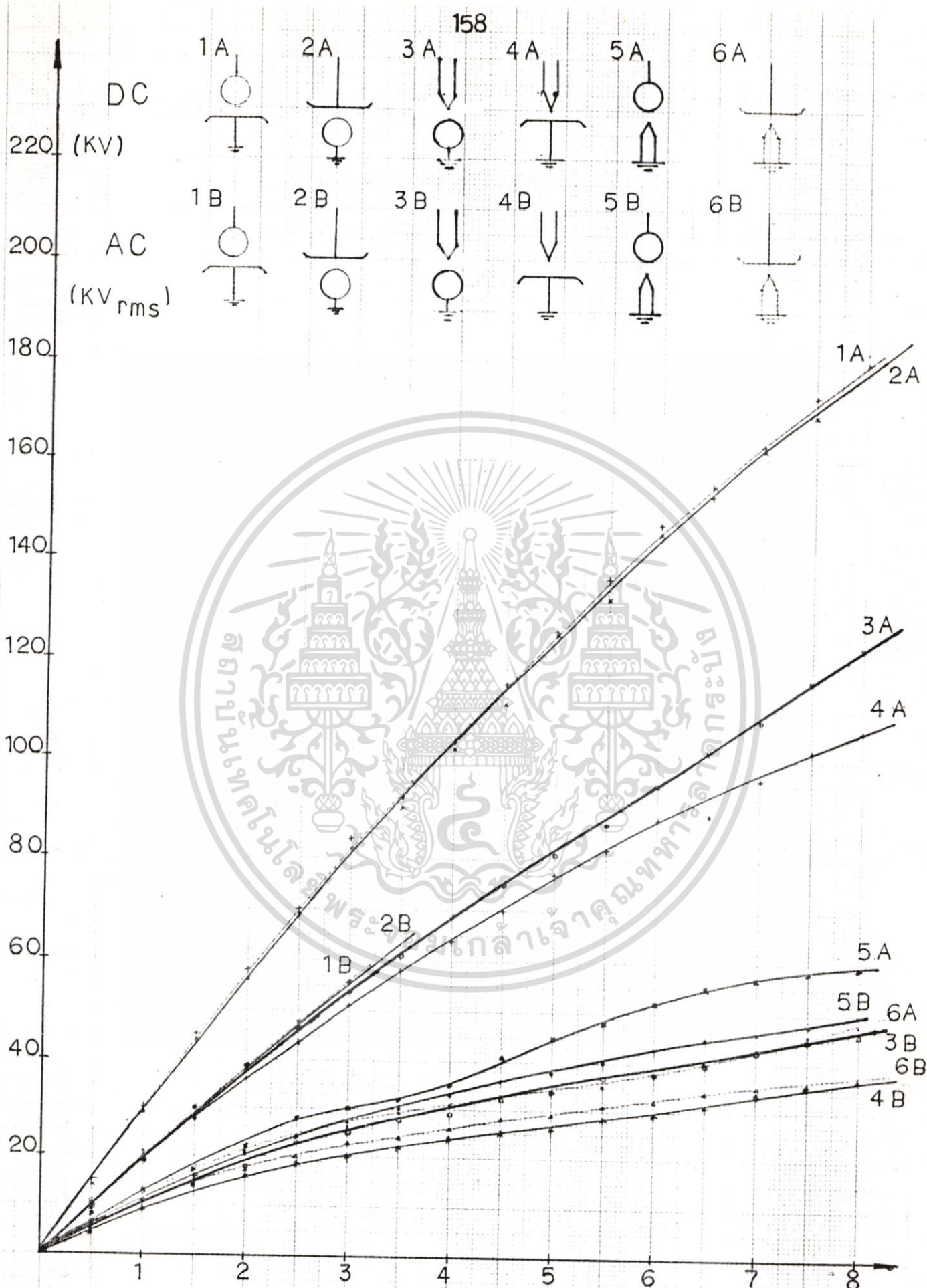
จากการเปรียบเทียบ กราฟเส้นที่ 3A กับ 5A หรือ 4A กับ 6A จะเห็นว่าเมื่อระยะแกปมากขึ้น หักดาไฟฟ้าเนื่องจากปลายแหลมชั่วบวกกับปลายแหลมชั่วลบจะต่างกันมากยิ่งขึ้น เพราะเกิดเนื่องจากสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากขึ้น ส่วนการกลับชั่วสัญญาณของสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ จากรูปที่ 4B กับ 6B จะเห็นว่าไม่มีผลต่างกันมากนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V_b DC (KV)
AC (KV_{rms})

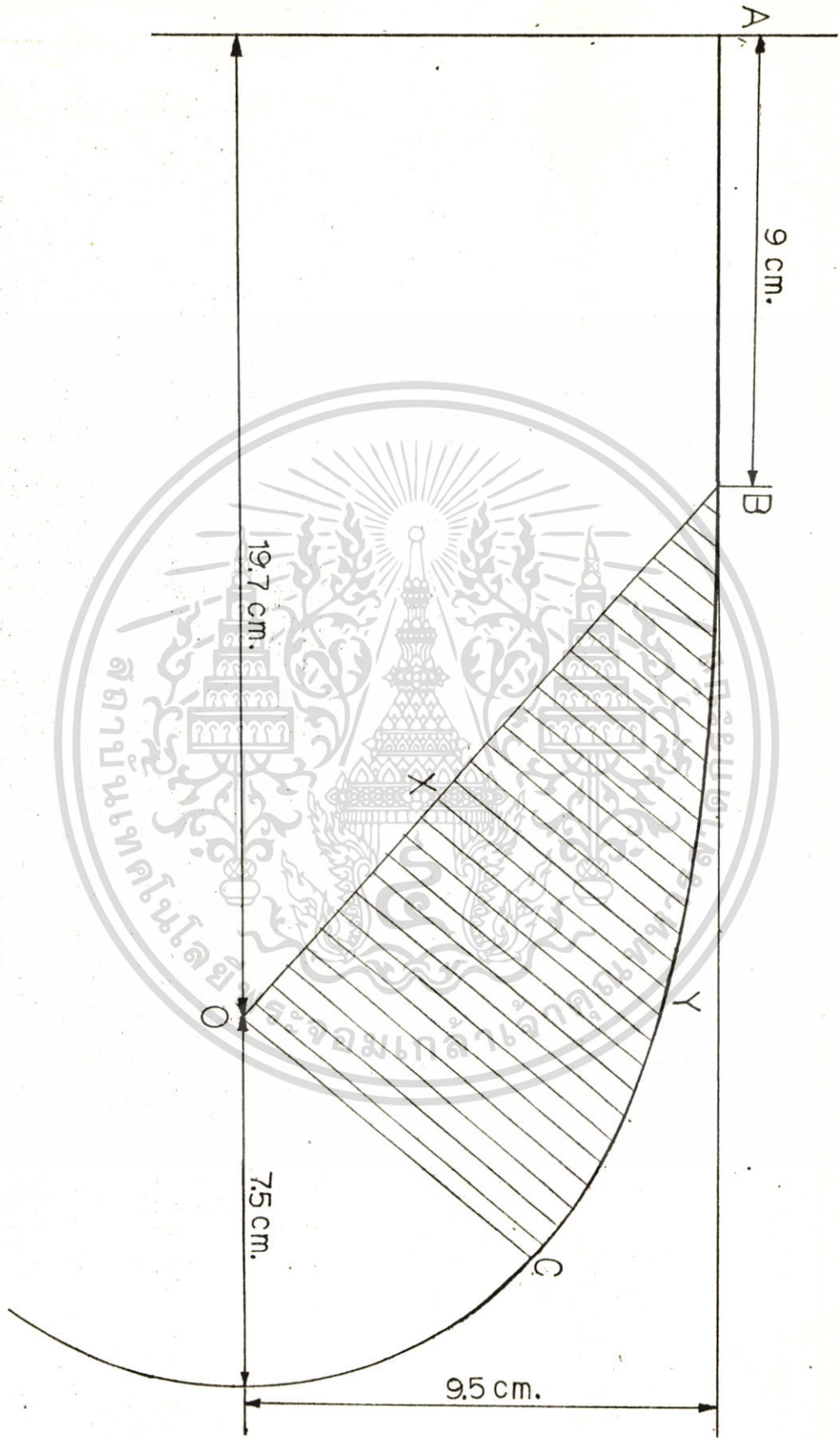


รูปนี้ เป็นเอกสารที่ส่งมอบงานด้านเทคนิคต่อระดับบัณฑิตศึกษาเพื่อใช้ในการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการเกษตร
 ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น ที่สตรงกับลิขสิทธิ์แต่อย่างใด และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์
 รูปที่ 10.9 แสดงแรงดันเบรคความถี่กระแสสลับเปรียบเทียบการทดสอบด้วยสัณฐานไฟฟ้ากระแส
 ไม่วอร์นิต่างกัน อีกทั้งห้ามเด็ดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารที่พิมพ์มาไปใช้
 แสดงกับกระแสสลับ

ภาคผนวก ก



รูป การออกแบบลิเลคโตรดแผ่นระนาบที่วาดเพื่อกำหนดเค้าโครง ออกแบบตาม Bruce จาก
 เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของงานวิจัยที่จัดทำขึ้นโดยศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยี
 ไม่ว่าการ $XY = OC \sin(BX/BO * \pi/2)$ BX เพิ่มขึ้น 0.5 cm จะมีส่วนโค้ง BC ดังรูปที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ๗

SPECIFICATIONFORDC HIGH VOLTAGE TESTING EQUIPMENT

การทดลอง ทดลองด้วยเครื่อง DC HIGH VOLTAGE GENERATOR

ที่ชื่อ NISSIN ของ NISSIN ELECTRIC CO., LTD. KYOTO JAPAN

SPECIFICATION NO KZ91-238

DC HIGH VOLTAGE GENERATOR

- (1) Type : Indoor use, hermetically oil-immersed
(OF type), self-cooled type.
- (2) DC generator circuit : Voltage doubling rectifier circuits
coupled with step-up transformers.
- (3) Ratings:
- | | |
|-------------------------|--|
| Input: No. of phase : | Single |
| Frequency : | 50 Hz |
| Voltage : | 200 V |
| Input capacity : | 12 KVA |
| Output: Rated voltage : | DC 600 KV |
| Test voltage : | DC 660 KV
(5 minutes) |
| Current : | 10 mA |
| Polarity : | Negative |
| Rating : | 30 minutes |
| Ripple : | below 5%
(at rated output
voltage and current) |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CONTROL BOARD

- (1) Type : Indoor use, benchboard type
- (2) Ratings :
- | | |
|--------------|------------|
| No. of phase | Single |
| Frequency | 50 Hz |
| Voltage | 200 v |
| Capacity | 12 KVA |
| Rating | 30 minutes |

(3) Apparatus mounted on the panel :

- | | |
|------------------------------------|--------|
| AC Voltmeter (0~300V, class 2.5) | 1 pce. |
| AC Ammeter (0~75 A, class 1.5) | 1 pce. |
| DC Voltmeter (0~600KV, class 1.5) | 1 pce. |
| DC Ammeter (0~15mA, class 1.5) | 1 pce. |
| Molded type circuit breaker (75AT) | 1 pce. |
| Voltage regulator (main) | 1 pce. |
| Voltage regulator (aux.) | 1 pce. |
- (4) Portable DC ammeter (Measuring the DC output voltage)
- | | |
|----------------------------------|--------|
| 10/30/100/300 μ A, class 1.0 | 1 pce. |
|----------------------------------|--------|
- (5) Portable DC ammeter (Measuring the DC output current)
- | | |
|-------------------------|--------|
| 1/3/10/30 mA, class 0.5 | 1 pce. |
|-------------------------|--------|

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณท่านอาจารย์ ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล ที่ได้ให้ความรู้และคำแนะนำต่าง ๆ ในการทำ
โครงการนี้ จนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ บริษัท แสงเวริเทกซ์ จำกัด ที่ได้มอบเครื่องมือและคำแนะนำในการทำ
เล่มนี้ด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

1. ดร.ชำนาญ ท่อเกียรติ, "วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง" , คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 176 หน้า, 2522
2. ดร.สำราญ สังข์สะอาด, "วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง", คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 434 หน้า, 2528
3. Meek, J.M., & Craigs J.D., "High voltage Laboratory Techniques", Butterworths Scientific Publications, London, 1964
4. Naidu, M.S. & Kamajaru, V., "High voltage Engineering, Tata McGraw-Hill Publishing co., Ltd. 1982



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้