สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาคุณลักษณะแรงดันเบรคดาวน์ในก๊าซที่กำหนดบางชนิดโดยการปรับแรงดันและระยะแก๊ป

THE STUDY OF BREAKDOWN VOLTAGE CHARACTERISTICS IN SOME SPECIFIED GASES BY VARYING PRESSURE AND GAP DISTANCE

T023574

นายณรงค์ชัย สุ่มงาม

MR. NARONGCHAI SUMNGARM

วิทยานิพนธ์
ห้ามนำออกนอกห้องสมุด

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ 2538

ISBN 974-621-284-2

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....23574
วัน, เดือน, ปี.....6 ก.ค. 2538

THE STUDY OF BREAKDOWN VOLTAGE CHARACTERISTICS IN SOME SPECIFIED GASES BY VARYING PRESSURE AND GAP DISTANCE

NARONGCHAI SUMNGARM

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT

FOR THE DEGREE

MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING

GRADUATE SCHOOL

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

1995

ISBN 974-621-284-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาคุณลักษณะแรงดันเบรคดาวน์ในก๊าซที่กำหนดบางชนิดโดยการปรับแรงดันและระยะแก็ป
นักศึกษา	นายณรงค์ชัย สุ่มงาม
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. ดร. นิพนธ์ สุขุม
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ. ศุลี บรรจงจิตร
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.	2538

บทคัดย่อ

ในห้องปฏิบัติการ (Laboratory) ที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในขณะนี้มีการศึกษาการเบรคดาวน์ระหว่างอิเลคโตรดรูปทรงต่าง ๆ โดยใช้อากาศที่ความดัน 1 บรรยากาศโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงความดัน แต่ในการศึกษานี้จะศึกษาแรงดันเบรคดาวน์ในก๊าซบางชนิดคือ ก๊าซฟรีออน ก๊าซไนโตรเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซฮีเลียม และก๊าซอาร์กอน ซึ่งเป็นการศึกษาแรงดันเบรคดาวน์ที่เป็นฟังก์ชันของ pd ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (p เป็นแรงดันหรือความดัน และ d เป็นระยะแก็ปหรือระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด) โดยมีการเปลี่ยนแปลงความดันและระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด ทำให้สามารถทำการทดลองที่ pd ต่ำ ๆ ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Titie	The Study of Breakdown Voltage Characteristics in Some Specified Gases by Varying Pressure and Distance
Student	Mr. Nrongchai Sumngarm
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Niphon Sukhum
Thesis Co-advisor	Assoc. Prof. Sulee Bunjongjit
Level of Study	Master of Engineering in Electrical Engineering
Department	Electrical Engineering King Mongkut 's Institute of Technology Ladkrabang
year	1995

Abstract

In the laboratory at Electrical Engineering Department, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, there have been studies of breakdown voltage between electrodes of various shapes in air. The pressure used has been invariably one atmosphere. This thesis concerns with the studies of uniform field breakdown in freeon, nitrogen, carbon dioxide, helium and argon by plotting breakdown voltage against pd (p is the pressure and d is the gapsetting) Because of lower pressures used we could obtain experimental points at low pd' s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ รศ.ดร.นิพนธ์ สุขุม และ รศ.ศุลี บรรจงจิตร เป็นอย่างมากที่ให้คำแนะนำปรึกษาเกี่ยวกับ วิธีการทดลอง การใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ และทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการนำไฟฟ้าของก๊าซ ขอขอบคุณ ผศ. อนุพงศ์ สรงประภา ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับระบบสุญญากาศและเครื่องมือที่ใช้วัดค่าความเป็นสุญญากาศ และขอขอบคุณ อาจารย์นิมิต บุญภิรมย์ ที่ให้คำปรึกษาในการทำวิจัย

1 ก.พ. 2538

ณรงค์ชัย สุ่มงาม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญภาพ	X
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 กล่าวนำ	1
1.2 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์	2
บทที่	
2 ทฤษฎีการชนกันของอะตอมและโมเลกุล และกระบวนการต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ	3
2.1 การชนกันของอะตอมและโมเลกุล	3
2.1.1 ทฤษฎีจลน์ศาสตร์ของก๊าซ	3
2.1.2 การเคลื่อนที่ของอีเลคตรอนในสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอในสุญญากาศเมื่อความเร็วต้นเป็นศูนย์	7
2.1.3 การนำไฟฟ้าในก๊าซ	10
2.1.3.1 โฟโตไอโอไนเซชั่น	13
2.2 กระบวนการต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ	14
2.2.1 ทาวน์เซนด์ดีสชาร์จ	15
2.2.2 เงื่อนไขการเกิดการเบรคดาวน์ของทาวน์เซนด์	20
2.2.3 ทฤษฎีสตรีมเมอร์	22
บทที่	
3 อุปกรณ์แบบ Steady - State ของ Townsend	26
3.1 จุดประสงค์ของการทดลองศึกษา	26
3.2 มูลฐานของวิธี	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

		หน้า
	3.2.1 การคำนวณหาแรงดันเบรคดาวน์ในก๊าซ	26
	3.3 ไอโอไนเซชั่นแชมเบอร์	29
	3.3.1 เกจวัดความดันแบบเบอร์ดอน	30
	3.3.2 ปั๊มสุญญากาศ	31
	3.3.3 การพัฒนาและการออกแบบอาโนดและคาโถด	31
	3.3.4 การวัดความต้านทานรั่ว	47
	3.3.5 การทดสอบการวัดความดันในไอโอไนเซชั่นแชมเบอร์	47
	3.3.6 หน่วยวัดสุญญากาศ	50
	3.3.7 การวัดแรงดันในช่องว่างระหว่างอิเลคโตรดทรงกลม	51
บทที่		
4	การทดลองหาแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ และความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้น	54
	4.1 การทดลองหาแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์	54
	4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของก๊าซที่ใช้ในการทดลอง	54
	4.2 ความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้น	55
	4.2.1 ความผิดพลาดเนื่องจากโวลเตจ	55
	4.2.2 ความผิดพลาดเนื่องจากความดัน	55
	4.2.3 ความผิดพลาดเนื่องจากการตั้งระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด	55
	4.2.4 ความผิดพลาดเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้า	55
บทที่		
5	ผลการทดลองในก๊าซสามัญ	57
	5.1 ผลการทดลองในก๊าซฟรีออน	57
	5.2 ผลการทดลองในก๊าซไนโตรเจน	61
	5.3 ผลการทดลองในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	65
	5.4 ผลการทดลองในก๊าซฮีเลียม	69
	5.5 ผลการทดลองในก๊าซอาร์กอน	73
	5.6 การเปรียบเทียบผลการทดลองในก๊าซสามัญกับผลการทดลองในอากาศ	77
	5.7 การเปรียบเทียบผลการทดลองในก๊าซไนโตรเจนกับผลการทดลองที่ผ่านมา	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
5.8 การเปรียบเทียบผลการทดลองในก๊าซก๊าซฮีเลียมกับผลการคำนวณ	83
บทที่	
6 บทสรุปและวิจารณ์	85
เอกสารอ้างอิง	92
ภาคผนวก ก	93
ภาคผนวก ข	102
ประวัติผู้เขียน	132

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	แสดงระดับพลังงานดิสโซซิเอชั่นของก๊าซชนิดต่าง ๆ	4
ตารางที่ 2.2	แสดงค่าระยะอิสระเฉลี่ยของก๊าซชนิดต่าง ๆ ที่ความดัน 1 mmHg ที่อุณหภูมิ 25°C	7
ตารางที่ 2.3	แสดงค่าไอโอไนเซชั่นโพเทนเชียลของก๊าซชนิดต่าง ๆ	11
ตารางที่ 2.4	แสดงค่าเวอร์ฟังก์ชันของโลหะบางชนิดที่ได้จากการวัดโดยวิธีการโฟโตอิมิสชั่นและเทอร์ไมโอนิคอีมิสชั่น	21
ตารางที่ 3.1	แสดงค่าคงตัว A และ B ของก๊าซชนิดต่าง ๆ	28
ตารางที่ 3.2	แสดงการหาค่า X, Y โดยสมมติ $\Psi = 0.2\pi$	33
ตารางที่ 3.3	แสดงการหาค่า X, Y โดยสมมติ $\Psi = 0.4\pi$	33
ตารางที่ 3.4	แสดงการหาค่า X, Y โดยสมมติ $\Psi = 0.5\pi$	34
ตารางที่ 3.5	แสดงการหาค่า X, Y โดยสมมติ $\Psi = 0.6\pi$	34
ตารางที่ 3.6	แสดงการหาค่า X, Y โดยสมมติ $\Psi = 0.67\pi$	34
ตารางที่ 3.7	แสดงการหาค่า X, Y โดยสมมติ $\Psi = 0.8\pi$	35
ตารางที่ 3.8	ตารางแสดงการหา Diameter ของจุดต่าง ๆ บน Profile ที่ออกแบบ	45
ตารางที่ 3.9	แสดงค่าความดันภายในแชมเบอร์กับเวลาของการปั๊มเป็นวินาที	48
ตารางที่ 3.10	แสดงการเปรียบเทียบหน่วยและการเปลี่ยนหน่วยความดัน	50
ตารางที่ 3.11	ตารางแสดงระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดที่เป็นทรงกลมกับแรงดันเบรคดาวน์ (เป็น kV) ที่วัดได้ในอากาศที่อุณหภูมิ 30°C	51
ตารางที่ 3.12	ตารางแสดงระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดที่เป็นทรงกลมกับแรงดันเบรคดาวน์ (เป็น kV) ตามมาตราฐาน IEC 52 ที่ความดันบรรยากาศที่อุณหภูมิ 20°C	52
ตารางที่ 5.1.1	แสดงระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดกับแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ (เป็น kV) ที่วัดได้ในก๊าซฟรีออนที่ความดัน (P) ต่าง ๆ	58
ตารางที่ 5.2.1	แสดงระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดกับแรงดันที่เริ่มเกิดการ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

			หน้า
		เบรคดาวน์ (เป็น kV) ที่วัดได้ในก๊าซไนโตรเจนที่ ความดัน (P) ต่าง ๆ	62
ตารางที่	5.3.1	แสดงระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดกับแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ (เป็น kV) ที่วัดได้ในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ความดัน (P) ต่าง ๆ	66
ตารางที่	5.4.1	แสดงระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดกับแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ (เป็น kV) ที่วัดได้ในก๊าซฮีเลียมที่ความดัน (P) ต่าง ๆ	70
ตารางที่	5.5.1	แสดงระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดกับแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ (เป็น kV) ที่วัดได้ในก๊าซอาร์กอนที่ความดัน (P) ต่าง ๆ	74
ตารางที่	5.6.1	แสดงระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดกับแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ (เป็น kV) ที่วัดได้ในอากาศที่ความดัน (P) ต่าง ๆ	77
ตารางที่	5.6.2	ตารางแสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของก๊าซสามัญกับผลการทดลองของอากาศที่ความดันเท่ากับ 100 Torr และมีระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดเท่ากับ 1.80 และ 3.00 cm.	78
ตารางที่	5.7.1	ตารางแสดงการเปรียบเทียบแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซไนโตรเจนที่ได้ในงานวิจัยนี้กับในงานวิจัยที่ผ่านมาที่ pd เท่ากับ 60, 180 และ 360 Torr.cm	82
ตารางที่	5.8.1	ตารางแสดงระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดกับแรงดันที่เกิดการเบรคดาวน์ (เป็น kV) ที่ได้จากการคำนวนในก๊าซฮีเลียม ที่ความดัน (เป็น Torr) ต่าง ๆ	83
ตารางที่	6.1	ตารางแสดงการเปรียบเทียบแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซฟรีออน ก๊าซไนโตรเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซฮีเลียม และก๊าซอาร์กอนที่ pd เท่ากับ 60, 180 และ 360 Torr.cm	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 6.2 ตารางแสดงการเปรียบเทียบแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซสามัญทั้ง 5 ชนิดที่ใช้ในการศึกษากับก๊าซ SF_6 ที่ pd ต่าง ๆ กัน 88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

		หน้า
รูปที่ 2.1	รูปแสดงการเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบของโมเลกุล	4
รูปที่ 2.2	แสดงการชนกันแบบยืดหยุ่นระหว่างโมเลกุลของก๊าซสองชนิดที่มีรัศมี r1 และ r2	5
รูปที่ 2.3	แสดงรูปอิเลคโตรดที่เป็นแบบ Rogowski ที่วางขนานกัน	8
รูปที่ 2.4	แสดงวิธีการชนแบบต่าง ๆ ของอิเลคตรอนกับอะตอมและอะตอมกับอะตอม	12
รูปที่ 2.5	แสดงกระบวนการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในก๊าซและทำให้ก๊าซเปลี่ยนสภาพจากฉนวนเป็นตัวนำไฟฟ้า	14
รูปที่ 2.6	แสดงกระบวนการดีสชาร์จของทาวน์เซนต์	15
รูปที่ 2.7	แสดงค่าที่วัดได้ของ α/P ที่เป็นฟังก์ชันของ E/P ในก๊าซชนิดต่างๆ	19
รูปที่ 2.8	แสดงวิธีการเกิดการเบรคดาวน์แบบสตรีมเมอร์	23
รูปที่ 3.1	รูปแสดงโครงสร้างของเบอร์คอนเกจรูปตัวซี	30
รูปที่ 3.2	รูปแสดงโครงสร้างของโรตารี่เวนปั๊ม	31
รูปที่ 3.3	รูปแสดงการกำหนดตำแหน่งระหว่าง Finite Plane กับ Infinite Plane	35
รูปที่ 3.4	รูปแสดงเส้นแรงไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่าที่ขอบของ Finite Plane	36
รูปที่ 3.5	รูปแสดงความสัมพันธ์ของ Stoerk	37
รูปที่ 3.6	รูปแสดงการหา Surface Profile ของ Rogowski Electrode	38
รูปที่ 3.7	แสดงรูป Profile ของอิเลคโตรดที่ออกแบบ	46
รูปที่ 3.8	กราฟแสดงความดันในแชมเบอร์กับเวลาของการปั๊มเป็นวินาที	49
รูปที่ 3.9	กราฟแสดงการเปรียบเทียบแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ในอากาศที่ได้งานวิจัยนี้ กับแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ในอากาศตามมาตราฐาน IEC 52	53
รูปที่ 5.1.1	กราฟแสดงแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด (d) ของก๊าซฟรีออน	59
รูปที่ 5.1.2	กราฟแสดงแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ที่เป็นฟังก์ชันของผลคูณของความดันกับระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด (pd)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

		หน้า
	ของก๊าซฟรีออน	60
รูปที่ 5.2.1	กราฟแสดงแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด (d) ของก๊าซไนโตรเจน	63
รูปที่ 5.2.2	กราฟแสดงแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ที่เป็นฟังก์ชันของผลคูณของความดันกับระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด (pd) ของก๊าซไนโตรเจน	64
รูปที่ 5.3.1	กราฟแสดงแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด (d) ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	67
รูปที่ 5.3.2	กราฟแสดงแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ที่เป็นฟังก์ชันของผลคูณของความดันกับระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด (pd) ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	68
รูปที่ 5.4.1	กราฟแสดงแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด (d) ของก๊าซฮีเลียม	71
รูปที่ 5.4.2	กราฟแสดงแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ที่เป็นฟังก์ชันของผลคูณของความดันกับระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด (pd) ของก๊าซฮีเลียม	72
รูปที่ 5.5.1	กราฟแสดงแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด (d) ของก๊าซอาร์กอน	75
รูปที่ 5.5.2	กราฟแสดงแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ที่เป็นฟังก์ชันของผลคูณของความดันกับระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด (pd) ของก๊าซอาร์กอน	76
รูปที่ 5.7.1	กราฟแสดงค่าแรงดันเบรคดาวน์ (เป็น kV) ที่ pd ต่าง ๆ ที่ได้ในงานวิจัยนี้ ในก๊าซไนโตรเจน	80
รูปที่ 5.7.2	กราฟแสดงค่าแรงดันเบรคดาวน์ (เป็น kV) ที่ pd ต่าง ๆ ในก๊าซไนโตรเจน ในงานวิจัยที่ผ่านมา	81
รูปที่ 5.8.1	กราฟแสดงการเปรียบเทียบแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด (d) ของก๊าซฮีเลียมที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 กล่าวนำ

ในปัจจุบันนี้ก๊าซได้ถูกใช้เป็นฉนวนชนิดหนึ่ง ที่มีความสำคัญทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งก๊าซจะถูกนำมาใช้เป็นฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง และใช้ดับอาร์คระหว่างขั้วอิเลคโตรด (Electrode) ซึ่งจะมีความสำคัญมากในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ทำงานโดยการเคลื่อนที่ของขั้วอิเลคโตรด เพราะการอาร์คจะทำให้เกิดความร้อนที่บริเวณผิวของขั้วอิเลคโตรดสูง และจะทำให้ขั้วอิเลคโตรดสึกกร่อนได้เมื่อเกิดการอาร์คบ่อย ๆ คุณสมบัติที่ดีอย่างหนึ่งของก๊าซคือ ขณะเกิดการอาร์คก๊าซจะเสียสภาพการเป็นฉนวนไปชั่วขณะและเมื่ออาร์คนั้นดับลง ก๊าซจะกลับคืนสู่สภาพการเป็นฉนวนตามเดิม ซึ่งการเสียสภาพการเป็นฉนวนของก๊าซนั้นจะเป็นแบบไม่ถาวร

ที่ความดันบรรยากาศ (1 atm) อากาศจะเปลี่ยนสภาพจากการเป็นฉนวนไฟฟ้าไปเป็นตัวนำไฟฟ้าได้ง่าย เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขั้วอิเลคโตรดสูงขึ้นดังนั้นจึงมีความจำเป็นจะต้องศึกษาคุณสมบัติของก๊าซชนิดต่าง ๆ ในการเป็นฉนวนไฟฟ้า ในการศึกษานี้จะมีการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดและความดันที่ใช้

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะศึกษาคุณสมบัติในการเป็นฉนวนไฟฟ้า ของก๊าซฟรีออน (CCl_2F_2) ก๊าซไนโตรเจน(N_2) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์(CO_2) ก๊าซฮีเลียม(He) และ ก๊าซอาร์กอน(Ar) ว่าก๊าซชนิดใดมีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี ในการทดลองจะมีการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดและความดันที่ใช้ ซึ่งจะศึกษาดูว่าปัจจัยทั้งสองนี้มีผลอย่างไรกับก๊าซชนิดต่าง ๆ ที่นำมาศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะแบ่งออกเป็น 6 บท ในแต่ละบทจะมีรายละเอียดดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำจะกล่าวถึงประโยชน์ในการศึกษาคุณสมบัติในการเป็นฉนวนไฟฟ้าของก๊าซ

บทที่ 2 เป็นทฤษฎีเกี่ยวกับการชนกันของอะตอม โมเลกุล ซึ่งการชนกันนี้จะนำไปสู่การเปลี่ยนสภาพจากฉนวนไปเป็นตัวนำไฟฟ้าและกระบวนการต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดการนำไฟฟ้า

บทที่ 3 เป็นมูลฐานของวิธีและอุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง

บทที่ 4 เป็นวิธีการทดลองหาค่าแรงดันเบรคดาวน์ในก๊าซชนิดต่าง ๆ และความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้น

บทที่ 5 เป็นผลการทดลองในก๊าซชนิดต่าง ๆ และนำผลการทดลองที่ได้มาพล็อตกราฟ

บทที่ 6 เป็นบทสรุปและวิจารณ์ผลการทดลองที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีการชนกันของอะตอมและโมเลกุล และกระบวนการต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซในสนามสม่ำเสมอ

2.1 การชนกันของอะตอมและโมเลกุล

2.1.1 ทฤษฎีจลน์ศาสตร์ของก๊าซ [1]

ก๊าซประกอบด้วยอะตอม หรือโมเลกุลเป็นจำนวนมาก ซึ่งเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบอยู่ตลอดเวลาจึงเกิดการชนกันเองหรือชนกับผนังของภาชนะที่เก็บได้ อะตอมหรือโมเลกุลแต่ละตัวเราอาจจะเปรียบให้เป็นรูปทรงกลมเล็ก ๆ ซึ่งเมื่อชนกันเองหรือชนกับผนังของภาชนะที่เก็บจะสะท้อนออกเมื่ออะตอมของก๊าซหรือโมเลกุลของก๊าซชนกัน จะมีการถ่ายโมเมนตัมและพลังงานจลน์ให้แก่กันโดยไม่เกิดการเอ็กซ์ไซเตชั่น (Excitation) ไอโอไนเซชั่น (Ionization) หรือ ดิสโซซิเอชั่น (Dissociation) เรียกการชนแบบนี้ว่าการชนแบบยืดหยุ่น (Elastic) โดยปกติอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซภายในภาชนะจะอยู่กันอย่างไม่เป็นระเบียบ แต่ความหนาแน่นโดยเฉลี่ยของอะตอมหรือโมเลกุลที่จุดต่าง ๆ จะเท่ากัน โมเลกุลของก๊าซอาจประกอบขึ้นด้วยอะตอมหลาย ๆ อะตอมเช่น โมเลกุลของก๊าซไนโตรเจน (N_2) ซึ่งประกอบขึ้นด้วย 2 อะตอม หรือโมเลกุลของก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์(Co_2) ที่ประกอบขึ้นด้วย 3 อะตอม ในส่วนของก๊าซที่โมเลกุลมีอะตอมเดียวได้แก่ก๊าซอาร์กอน (Ar) และก๊าซฮีเลียม (He) เป็นต้น เมื่ออุณหภูมิของก๊าซเพิ่มสูงขึ้นมากพอ โมเลกุลของก๊าซจะดิสโซซิเอตออกเป็น 2 อะตอม เช่น ในกรณีของก๊าซไนโตรเจนโมเลกุลจะดิสโซซิเอตเมื่อได้รับพลังงานจำนวนหนึ่ง เราเรียกพลังงานนี้ว่าพลังงานดิสโซซิเอชั่นซึ่งค่าของระดับพลังนี้ของก๊าซชนิดต่าง ๆ ได้แสดงไว้ตามตารางที่ 2.1

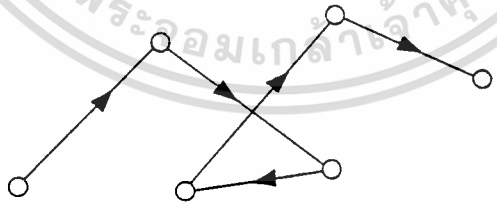
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1

ระดับพลังงานดิสโซซิเอชั่นของก๊าซชนิดต่าง ๆ

โมเลกุล	พลังงานดิสโซซิเอชั่น (ev)
H_2	4.46
O_2	5.11
N_2	9.76
Cl_2	2.47
Br_2	1.96

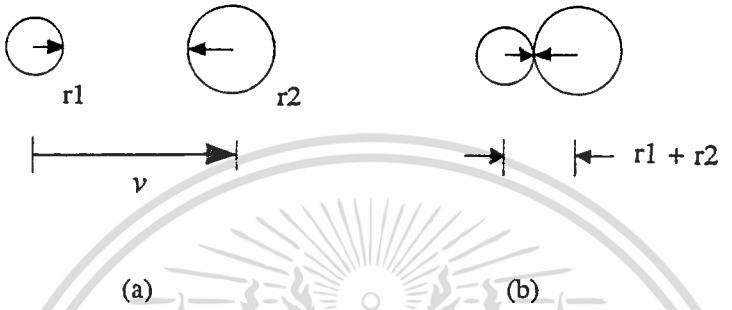
เนื่องจากโมเลกุลเคลื่อนที่ปะปนกันอย่างไม่เป็นระเบียบ แต่ละตัวอาจจะเคลื่อนที่ชิกแซกออกห่างไปจากตำแหน่งที่อยู่เดิมตามรูปที่ 2.1 และเราเรียกการเคลื่อนที่แบบนี้ว่าเทอร์มัลอะกิเตชั่น (thermal agitation) โมเลกุลของก๊าซแต่ละตัวอาจจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่ต่างกันซึ่งการเคลื่อนที่นี้จะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ คือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความเร็วของโมเลกุลจะเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 2.1 รูปแสดงการเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบของโมเลกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากเคลื่อนที่ไปได้ระยะหนึ่งก็จะเกิดการชนกับโมเลกุลตัวอื่น ซึ่งจะทำให้ทิศทางของการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเปลี่ยนไป ค่าเฉลี่ยของระยะทางระหว่างที่โมเลกุลเคลื่อนที่ไปชนกันสองครั้งต่อเนื่องกันเราเรียกว่าระยะอิสระเฉลี่ยของโมเลกุล λ (mean free path) ในการหาจำนวนครั้งที่เกิดการชนกัน จะให้โมเลกุลที่มีรัศมี r1 เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v ชนโมเลกุลที่มีรัศมี r2 ที่อยู่กับที่ ตามรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงการชนกันแบบยืดหยุ่นระหว่างโมเลกุลของก๊าซสองชนิดที่มีรัศมี r1 และ r2

จากทฤษฎีจลน์ศาสตร์ของก๊าซจะได้ความเร็วสัมพันธ์เป็น

$$v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2} \qquad 2.1$$

เมื่อ

v_1 คือความเร็วของโมเลกุลของก๊าซชนิดที่ 1

v_2 คือความเร็วของโมเลกุลของก๊าซชนิดที่ 2

สมมติให้โมเลกุลของก๊าซชนิดที่ 1 ที่รัศมี r1 เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v1 ชนกับโมเลกุลของก๊าซชนิดที่ 2 ที่มีรัศมี r2 (นั้นคือเมื่อจุดกึ่งกลางของโมเลกุลทั้งสองชนิดห่างกันน้อยกว่าระยะ r1 + r2 ตามรูปที่ 2.2 (b)) และโมเลกุลของก๊าซชนิดที่หนึ่งจะชนกับโมเลกุลของก๊าซชนิดที่สองทุกตัวในปริมาตร $\pi(r1 + r2)^2 v$ ถ้าให้จำนวนโมเลกุลของก๊าซชนิดที่สองต่อ 1 m^3 เท่ากับ N ดังนั้นจำนวนครั้งที่เกิดการชนกันจะเท่ากับ $\pi(r1 + r2)^2 vN$ (ในเวลา 1 วินาที) และเวลาเฉลี่ยระหว่างการชนต่อเนื่องกันสองครั้งจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$t = \frac{1}{\pi}(r1+r2)^2 \text{ vN} \qquad 2.2$$

ดังนั้นระยะอิสระเฉลี่ย (λ) ของโมเลกุลของก๊าซที่มีรัศมี r1 ที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v1 จะเป็น

$$\lambda = v_1 t = \frac{v_1}{\pi (r_1 + r_2)^2 vN}$$

หรือ $$\lambda = \frac{1}{\pi (r_1 + r_2)^2} \times \frac{v_1}{(v_1^2 + v_2^2)^{\frac{1}{2}}} \qquad 2.3$$

ในกรณีที่เป็นโมเลกุลของก๊าซชนิดเดียวกัน: v1 = v2 และ r1 = r2 = r จากสมการที่ 2.3 จะได้ระยะอิสระเฉลี่ยของโมเลกุล (λ_M) เป็น

$$\lambda_M = \frac{1}{4\sqrt{2}\pi r^2 N} \qquad 2.4$$

ในกรณีที่เป็นไอออนหรืออิเลคตรอนเคลื่อนที่ในก๊าซ (เช่นในกรณีที่มีสนามไฟฟ้าด้วย) เมื่อเป็นไอออนเคลื่อนที่

v1 > v2 และ r1 $\cong$ r2 = r

เมื่อ v1 เป็นความเร็วของไอออน

v2 เป็นความเร็วของโมเลกุล

r1 เป็นรัศมีของไอออน

r2 เป็นรัศมีของโมเลกุล

ดังนั้นจากสมการที่ 2.3 จะได้ระยะทางอิสระเฉลี่ยของไอออน (λ_i) เป็น

$$\lambda_i = \frac{1}{4\pi r^2 N} \qquad 2.5$$

สำหรับในกรณีที่เป็นอิเลคตรอนเคลื่อนที่ในก๊าซ

v1 >> v2 และ r1 << r2

เมื่อ v1 เป็นความเร็วของอิเลคตรอน

v2 เป็นความเร็วของโมเลกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

r1 เป็นรัศมีของอิเลคตรอน

r2 เป็นรัศมีของโมเลกุล

ซึ่งจะได้ระยะทางอิสระเฉลี่ยของอิเลคตรอน (λ_e) เป็น

$$\lambda_e = \frac{1}{\pi r^2 N} \qquad 2.6$$

ตารางที่ 2.2 จะแสดงค่าระยะอิสระเฉลี่ยของอิเลคตรอนและของโมเลกุล ของก๊าซชนิดต่าง ๆ ที่ความดัน P = 1 mmHg. และอุณหภูมิ T = 25° C

ตารางที่ 2.2

แสดงค่าระยะอิสระเฉลี่ยของอิเลคตรอนและของโมเลกุล ของก๊าซชนิดต่าง ๆ ที่ความดัน 1 mmHg. และที่อุณหภูมิ 25° C

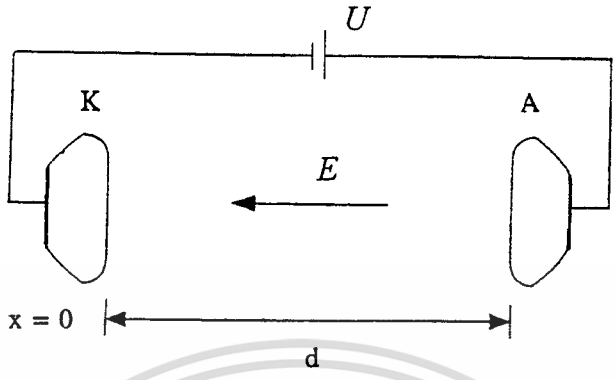
ก๊าซ	λe	λM
Ar	450×10^{-6}	79.5×10^{-6}
N	425×10^{-6}	75.1×10^{-6}
H	189×10^{-6}	144.4×10^{-6}
O	455×10^{-6}	80.5×10^{-6}
CO_2	420×10^{-6}	74.3×10^{-6}

2.1.2 การเคลื่อนที่ของอิเลคตรอนในสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอในสุญญากาศ เมื่อความเร็วต้นเป็นศูนย์

ถ้าให้อิเลคตรอนอยู่ในบริเวณระหว่างอิเลคโตรด ที่เป็นแบบ Rogowski ที่วางขนานกันคู่หนึ่งในสุญญากาศ และมีทิศทางของสนามไฟฟ้าเนื่องจากความต่างศักย์ระหว่างขั้วทั้งสองดังที่แสดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 2.3 ซึ่งความแรงของสนามไฟฟ้าทุก ๆ จุดในบริเวณระหว่างขั้ว จะมีค่าเท่ากันเราเรียกสนามไฟฟ้านี้ว่า สนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ (Uniform Field)



รูปที่ 2.3 แสดงรูปอิเลคโตรดที่เป็นแบบ Rogowski ที่วางขนานกัน

ถ้าความแรงของสนามไฟฟ้าแต่ละจุดมีค่าไม่เท่ากันเราเรียกสนามไฟฟ้านี้ว่า สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (Non-Uniform Field)

จากรูปที่ 2.3 สมมติให้อิเลคโตรด K และ A แทนคาโถดและอาโนดตามลำดับ ซึ่งวางอยู่ใน สูญญากาศมีระยะห่างระหว่างกัน d เมตร และมีความต่างศักย์ U โวลต์ ที่ x = 0 คาโถดจะปล่อยอิเลคตรอนออกมาเมื่อถูกแสงอุลตราไวโอเลต (Ultraviolet) ส่องหรือเมื่อถูกเผาให้ร้อน หรือโดยกรรมวิธีอื่น ๆ อิเลคตรอนจะมีความเร็วต้นเป็นศูนย์ อิเลคตรอนนี้จะเคลื่อนที่ไปในสนามไฟฟ้าด้วยความเร่ง (a) [1]

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{eEx}{me} = \frac{e}{me}\frac{U}{d} \quad \text{m}^2/\text{s} \qquad 2.7$$

เมื่อ e เป็นประจุลบของอิเลคตรอน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.60×10^{-19} คูลอมป์

me เป็นมวลของอิเลคตรอน มีค่าเท่ากับ 9.11×10^{-31} กิโลกรัม

อินทิเกรตสมการที่ 2.7 เทียบกับเวลาจะได้เป็นความเร็ว (v)

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{e}{me}\frac{U}{d}t \quad \text{m/s} \qquad 2.8$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และอินทิเกรตสมการที่ 2.8 เทียบกับเวลาจะได้เป็นระยะทาง (x)

$$x = \frac{1}{2}\frac{e}{me}\frac{U}{d}t^2 \qquad \text{m} \qquad 2.9$$

ดังนั้นอิเลคตรอนที่เคลื่อนที่เป็นระยะ x = d จะใช้เวลา

$$t_{KA} = \left[\frac{2med^2}{eu}\right]^{\frac{1}{2}} \qquad \text{s} \qquad 2.10$$

และความเร็วของอิเลคตรอนสามารถหาได้จากสมการ

$$ve = \left[\frac{2eU}{me}\right]^{\frac{1}{2}} \qquad \text{m/s} \qquad 2.11$$

เมื่อ e/me = $1.76 * 10^{11}$ คูลอมบ์/กิโลกรัมดังนั้นจะได้

$$ve = 5.93\times10^{5}\sqrt{U} \qquad \text{m/s} \qquad 2.12$$

นั่นคืออิเลคตรอนที่มีความเร็วต้นเป็นศูนย์เคลื่อนที่ผ่านความต่างศักย์เพียง 1 โวลต์ จะมีความเร็วเป็น 5.93 x 10^5 เมตรต่อวินาที ในกรณีความเร็วของไอออนที่มีประจุไฟฟ้าเป็น Z เท่าของอิเลคตรอนและมีมวลอะตอมสัมพันธ์เป็น A_r และเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้าด้วยความเร็วต้นเท่ากับศูนย์ผ่านความต่างศักย์ U โวลต์ไอออนจะมีความเร็วเป็น

$$v_i = \left\{\frac{2eZU}{1.66\times10^{-27}\times A_r}\right\} \qquad 2.13$$

$$= 1.39\times10^{4}\left[\frac{ZU}{A_R}\right]^{\frac{1}{2}} \qquad \text{m/s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 การนำไฟฟ้าในก๊าซ [1] [2]

เมื่อมีสนามไฟฟ้าในก๊าซอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าคือ อิเลคตรอนและไอออนบวกจะเคลื่อนที่ในก๊าซเนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าและจะชนกับอะตอมและโมเลกุลที่เป็นกลาง ซึ่งการชนกันนี้จะมีสองชนิดคือ [2]

1. การชนกันแบบยืดหยุ่น (Elastic) การชนกันแบบนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงในพลังงานศักย์
2. การชนกันแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic) การชนกันแบบนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงของพลังงานศักย์

ในการชนกันแบบยืดหยุ่นอิเลคตรอนจะเสียพลังงานไป $2m/M$ ของพลังงานที่อิเลคตรอนมีอยู่เมื่อ m เป็นมวลของอิเลคตรอนและ M เป็นมวลของอะตอมหรือโมเลกุล

ในการชนกันแบบไม่ยืดหยุ่นจะทำให้เกิดกระบวนการต่อไปนี้ [2]

1. เกิดการเอ็กซ์ไซเตชั่น
2. เกิดการไอโอไนเซชั่น
3. เกิดการเกาะติดของอิเลคตรอน (Electron Attachment)

กระบวนการที่ทำให้เกิดการนำไฟฟ้าในก๊าซ คือกระบวนการของการไอโอไนเซชั่นกระบวนการไอโอไนเซชั่น เป็นกระบวนการที่แยกอิเลคตรอนออกจากอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซซึ่งกระบวนการไอโอไนเซชั่นนี้จะทำให้เกิดไอออนบวกและอิเลคตรอนอิสระขึ้น ถ้าเป็นในก๊าซไฟฟ้าลบจะมีไอออนลบเกิดขึ้นด้วย

วิธีของการไอโอไนเซชั่น คือเมื่ออิเลคตรอนหรือไอออนที่มีมวล (m) เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว (v) เข้าชนกับอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซที่เป็นกลาง ขณะที่ชนอิเลคตรอนหรือไอออน จะถ่ายเทพลังงานจลน์ให้กับอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซที่เป็นกลางนั้น และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของพลังงานศักย์ขึ้น ถ้าพลังงานนี้ (ยกเว้นถ้าเป็นพลังงานของไอออนบวกจะต้องเป็นอย่างน้อยสองเท่าของพลังงานของการไอโอไนเซชั่น) มากกว่าพลังงานของไอโอไนเซชั่นก็จะเกิดการ ไอโอไนเซชั่นขึ้นตามสมการ

$$mv^2/2 \geq W_i = U_i \qquad 2.14$$

เมื่อ $mv^2/2$ เป็นพลังงานของอิเลคตรอนหรือไอออน

W_i เป็นพลังงานของการไอโอไนเซชั่น

U_i เป็นไอโอไนเซชั่นโพเทนเชียล (Ionization Potentials)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับไอโอไนเซชั่นโพเทนเชียลของก๊าซชนิดต่าง ๆ นั้นได้แสดงไว้ตามตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3

แสดงค่าไอโอไนเซชั่นโพเทนเชียลของก๊าซชนิดต่าง ๆ [3]

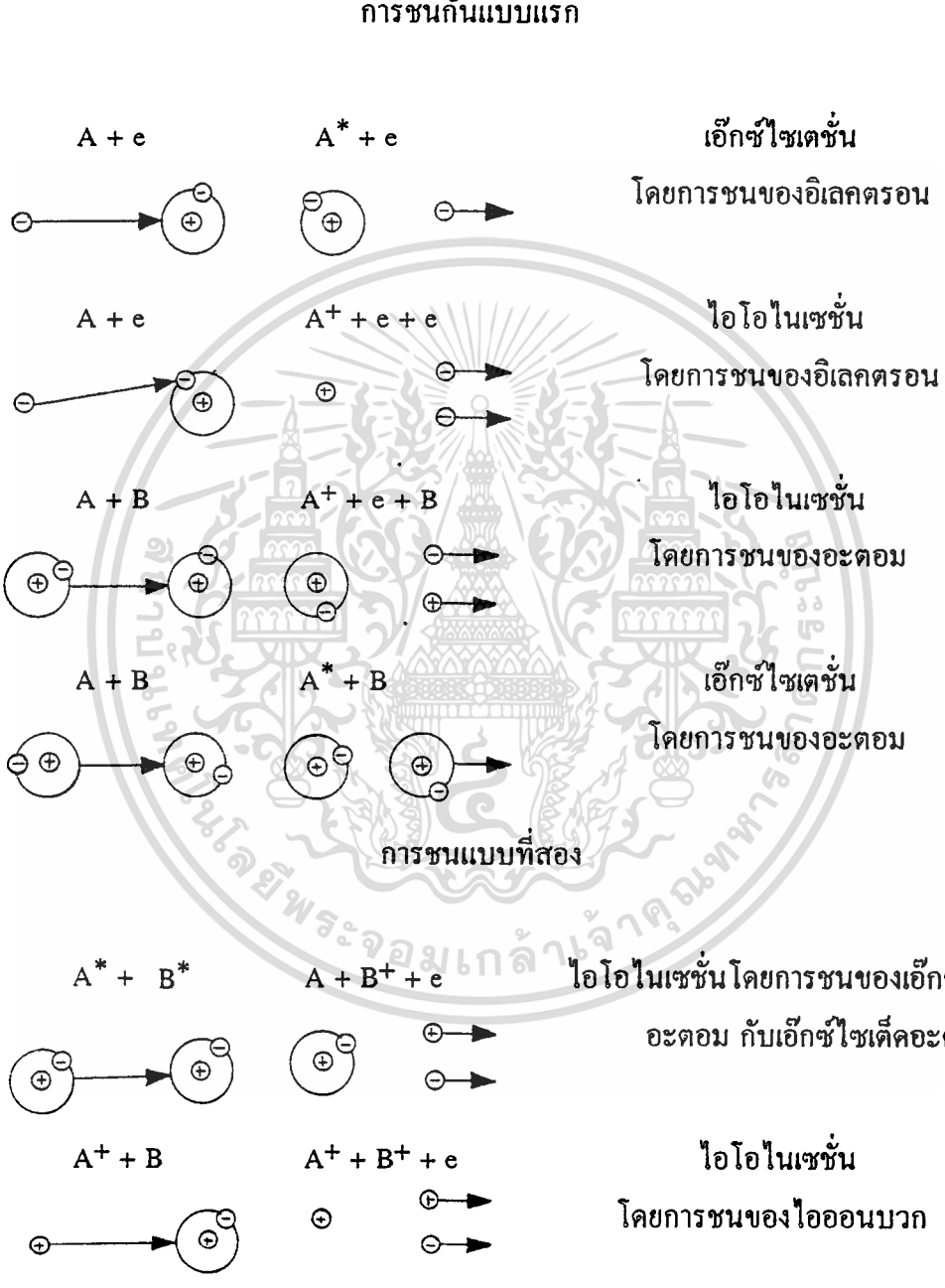
ก๊าซ	ไอโอไนเซชั่นโพเทนเชียล (v) ของอะตอมและโมเลกุล
He	24.5 (54.2)
Ne	21.5 (41,63,97,126)
Ar	15.7 (28,41)
Kr	14 (27,37,68)
Xe	12.1 (21,32,46,76)
H_2	15.4
N_2	15.5
O_2	12.1
Cl_2	11.5
Br_2	10.7
NO_2	11
CO_2	13.7

อนุภาคที่มาชนอะตอมหรือโมเลกุลนั้นส่วนมากจะเป็นอิเลคตรอน เพราะอิเลคตรอนจะมีความคล่องตัวสูงกว่าไอออน

การชนกันและเป็นผลทำให้เกิดการไอโอไนเซชั่นหรือเอ็กซ์ไซเตชั่น โดยการถ่ายเทพลังงานจลน์เราเรียกว่าการชนแบบแรก การชนกันซึ่งทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานศักย์บางส่วนต่อกันและทำให้เกิดการไอโอไนเซชั่นขึ้นเราเรียกว่าการชนกันแบบที่สอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นถึงวิธีการชนกันแบบต่าง ๆ เมื่อ A และ B เป็นอะตอม A^* และ B^* เอ็กซ์ไซเต็ดอะตอม A^+ และ B^+ เป็นไอออนบวก e เป็นอีเลคตรอนอิสระ (ที่มีลูกศรกำกับแสดงว่ามีพลังงานจลน์) [1]



รูปที่ 2.4 แสดงวิธีการชนแบบต่าง ๆ ของอิเลคตรอนกับอะตอมและอะตอมกับอะตอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3.1 โฟโตไอโอไนเซชั่น (Photo-ionization)

1. โฟโตไอโอไนเซชั่น เนื่องจากอะตอมที่อยู่ในสภาพเอ็กซ์ไซเตชั่น [4]

เมื่ออะตอมได้รับพลังงานมากขึ้น (เนื่องจากการชนของอิเลคตรอน ไอออนบวกหรือไอออนลบจะทำให้วงโคจรของอิเลคตรอนรอบนิวเคลียสมีรัศมีโตขึ้น อิเลคตรอนนี้จะเคลื่อนที่อยู่ในวงโคจรที่แน่นอนวงหนึ่งตามระดับของพลังงานที่ได้รับ ในลักษณะเช่นนี้เรียกว่าอะตอมอยู่ในสภาพเอ็กซ์ไซ - เตชั่นพลังงานนี้จะคงอยู่ในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ (10^{-8} ถึง 10^{-7} วินาที) แล้วอะตอมก็จะกลับสู่สภาพปกติ (Ground state) ขณะที่กลับสู่สภาพปกติก็จะปล่อยพลังงานที่ได้รับมาในตอนแรกออกไปในรูปของโฟตอน (Photon) ถ้าพลังงานนี้วิ่งไปกระทบกับอะตอมหรือโมเลกุลที่เป็นกลางอาจทำให้อะตอมหรือโมเลกุลนั้นเกิดเอ็กซ์ไซเตชั่นหรือไอโอไนเซชั่นขึ้นได้ การเกิดการไอโอไนเซชั่นเนื่องจากโมเลกุลได้รับพลังงานโฟตอนเรียกว่า โฟโตไอโอไนเซชั่น (Photo-ionization) พลังงานโฟตอนที่จะทำให้โมเลกุลของก๊าซเกิดไอโอไนเซชั่นได้จะต้องมีค่าเป็น

$$hf \rangle Wi = eUi$$

เมื่อ h คือค่าคงที่ของ Plank (มีค่าเท่ากับ 6.6257×10^{-34} J-s)

f คือความถี่ของแสง

2. โฟโตไอโอไนเซชั่น เนื่องจากการฉายแสงหรือรังสีจากภายนอก [1]

แสงหรือรังสีนั้นจะต้องมีความยาวคลื่นเท่ากับ

$$\lambda = \frac{ch}{Wi} = \frac{ch}{eUi}$$

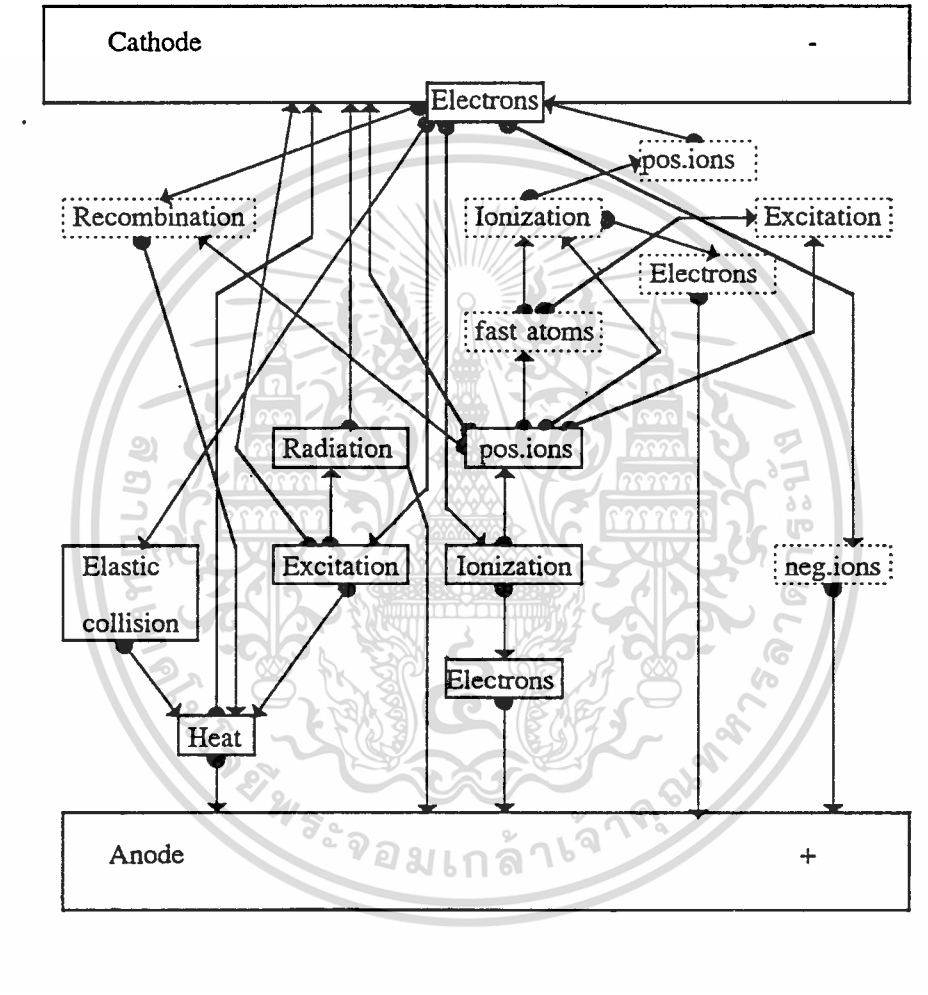
เมื่อ c เป็นความเร็วของแสง (มีค่าเท่ากับ 2.998×10^{8} m/s)

แสงที่เห็นได้ด้วยตาจะมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 4×10^{-7} m ถึง 7×10^{-7} m ซึ่งจะไม่ทำให้เกิดการไอโอไนเซชั่นขึ้นได้ แสงอุลตร้าไวโอเล็ตจะมีความยาวคลื่นอย่างต่ำจาก 1.5×10^{-7} ถึง 2×10^{-7} m จะทำให้เกิดการไอโอไนเซชั่นกับก๊าซที่มีไอโอไนเซชั่นโพเทนเชียลช่วง 6 ถึง 8 ev ได้ รังสีเอ็กซ์จะมีความยาวคลื่นในช่วง 10^{-7} ถึง 10^{-12} m และรังสีคอสมิคจะมีความยาวคลื่นช่วง 10^{-13} ถึง 10^{-14} m ซึ่งรังสีคอสมิคนี้จะทำให้เกิดโฟโตไอโอไนเซชั่นได้เป็นอย่างดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 กระบวนการต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซ ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ [1]

กระบวนการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในก๊าซและทำให้ก๊าซเปลี่ยนสภาพจากฉนวนไฟฟ้าเป็นตัวไฟฟ้าได้แสดงไว้ตามรูปที่ 2.5 ซึ่งจุดดำจะเป็นการเริ่มต้นของกระบวนการ หัวลูกศรเป็นการจบลงของกระบวนการ ชื่อของกระบวนการที่สำคัญจะอยู่ในกรอบของเส้นทึบส่วนกระบวนการที่มีความสำคัญรองลงมาจะอยู่ในกรอบเส้นประ



รูปที่ 2.5 แสดงกระบวนการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในก๊าซและทำให้ก๊าซเปลี่ยนสภาพจากฉนวนเป็นตัวนำไฟฟ้า

โดยปกติก๊าซจะเป็นฉนวนไฟฟ้าแต่เมื่อเกิดการไอโอไนเซชั่นขึ้นในก๊าซ ก๊าซจะเปลี่ยนสภาพจากฉนวนไฟฟ้าเป็นตัวนำไฟฟ้า เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าเกิดการเบรคดาวน์ขึ้นในก๊าซ ซึ่งก่อนที่จะ

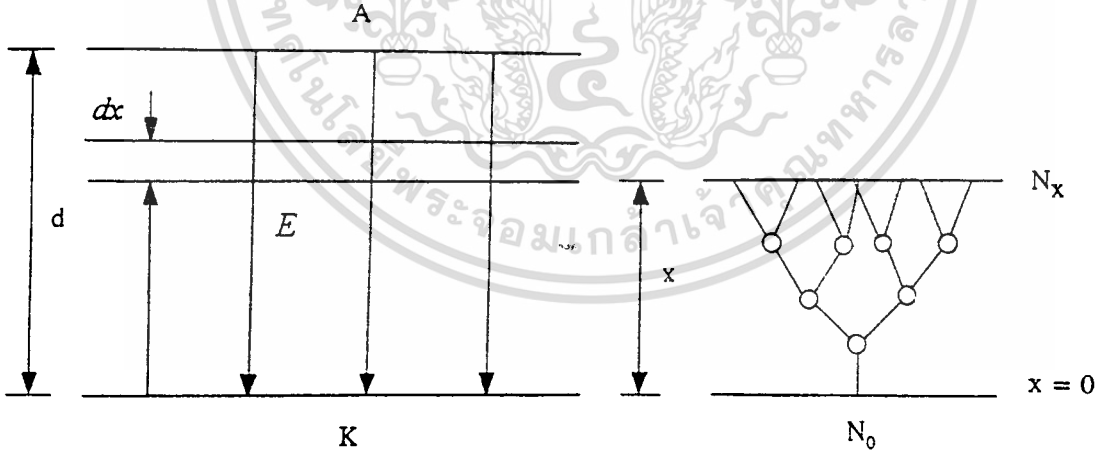
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดเบรคดาวน์ในก๊าซนั้นจะเกิดกระบวนการไอโอไนเซชั่นและการปลดปล่อยอิเลคตรอนที่คาโถดโดยไอออนบวก ฯลฯ ซึ่งจะเป็นจุดเริ่มต้นของกระบวนการต่าง ๆ ที่นำไปสู่การเกิดเบรคดาวน์ในก๊าซเรียกกระบวนนี้ว่าก๊าซดีสชาร์จ เราอาจแบ่งก๊าซดีสชาร์จออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. ชนิดที่คงสภาพเองไม่ได้ ซึ่งการดีสชาร์จชนิดนี้จะต้องอาศัยพลังงานจากภายนอกทำให้เกิดอิเลคตรอนหรือไอออนพอเพียงกับการดีสชาร์จถ้าไม่มีพลังงานจากภายนอกเข้าช่วย การดีสชาร์จจะหยุดลง
2. ชนิดที่คงสภาพเองได้ซึ่งเป็นการดีสชาร์จที่ไม่ต้องใช้พลังงานจากภายนอกเข้าช่วยเมื่อเกิดดีสชาร์จขึ้นในก๊าซจะมีกระแสไหลตั้งแต่ค่าน้อย ๆ ไปจนถึงไมโครแอมป์หรือเป็นแอมป์

2.2.1 ทาวน์เซนต์ดีสชาร์จ (Townsend Discharge) [1] [4]

อิเลคตรอนอิสระที่เคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้า สามารถทำให้เกิดการไอโอไนเซชั่นขึ้นกับอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซที่เป็นกลางได้เมื่อความแรงของสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับหรือมากกว่าความแรงของสนามวิกฤต ($Ei = Wi/e\lambda$) และอิเลคตรอนที่เกิดขึ้นใหม่ก็มีโอกาสที่จะทำให้เกิดการไอโอไนเซชั่นได้ สมมติให้ N_0 เป็นจำนวนอิเลคตรอนที่ออกจากผิวของคาโถด (ที่ $x = 0$) ในเวลา 1 วินาที ที่ระยะทาง x จำนวนของอิเลคตรอนจะเพิ่มขึ้นเป็น N_x โดยการไอโอไนเซชั่น เนื่องจากการชนดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงกระบวนการดีสชาร์จของทาวน์เซนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้อิเลคตรอนจำนวน N_x นี้เคลื่อนที่เป็นระยะทาง dx จาก x และทำให้เกิดอิเลคตรอนเพิ่มขึ้นอีกเป็นจำนวน dN ดังนั้นจะมีจำนวนของอิเลคตรอนเพิ่มขึ้นในช่วง x ถึง x + dx เท่ากับ

$$dN = N\alpha dx \qquad 2.15$$

เมื่อ α เป็นสัมประสิทธิ์ของการไอโอไนเซชั่นที่หนึ่งของทาวน์เซนต์ซึ่งเป็นจำนวนของการไอโอไนเซชั่น โดยการชนของอิเลคตรอนตัวหนึ่งในระหว่างการเคลื่อนที่ 1 เมตรในทิศทางขนานกับสนามไฟฟ้า จากการอินทิเกรตสมการที่ (2.15) เพื่อหาจำนวนของอิเลคตรอนที่ระยะ d จะได้

$$N = N_0 e^{(\alpha d)} \qquad 2.16$$

ซึ่งกลุ่มของอิเลคตรอน (N) นี้เราเรียกว่าอะวาลานซ์ของอิเลคตรอนเมื่อระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดเท่ากับ d และ α มีค่าคงที่ (ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ) เมื่อคูณด้วยประจุของอิเลคตรอนสามารถเขียนในเทอมของกระแสได้เป็น

$$I = I_0 e^{(\alpha d)} \qquad 2.17$$

I_0 เป็นกระแสเริ่มต้นที่หลุดออกมาจากคาโถด (ซึ่งส่วนมากจะได้มากจากการฉายแสงอุลตราไวโอเลตลงบนคาโถด)

ที่หน้าอะวาลานซ์ของอิเลคตรอนซึ่งมีประจุไฟฟ้าลบอยู่ประจุไฟฟ้าลบนี้จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วประมาณ 2×10^5 m/s เข้าหาอาโนด (เมื่อความแรงของสนามไฟฟ้าเท่ากับค่าสนาม วิกฤติ) ส่วนไอออนบวกจะเคลื่อนที่ช้ากว่าอิเลคตรอนมาก และเคลื่อนที่เข้าหาคาโถดด้วยความเร็วประมาณ 10^3 m/s ซึ่งเมื่อเทียบกับความเร็วของอะวาลานซ์ของอิเลคตรอนแล้วจะคล้ายกับประจุที่ออกันอยู่ในสนามไฟฟ้า เมื่อความแรงของสนามไฟฟ้าสูงมาก ไอออนบวกก็สามารถทำให้เกิดการไอโอไนเซชั่นได้เช่นกัน โดยวิ่งด้วยความเร็วสูงเข้าชนอะตอมของก๊าซในบริเวณนั้นและที่ผิวของคาโถด นอกจากนี้ยังมีการไอโอไนเซชั่นเนื่องจากผลของโฟโตอิเลคตริกของแสงจากหน้าของอะวาลานซ์ของอิเลคตรอน จำนวนของการไอโอไนเซชั่นจากวิธีการต่าง ๆ เหล่านี้ คือสัมประสิทธิ์การไอโอไนเซชั่นที่สองของทาวน์เซนต์ (γ) ซึ่งสามารถจำแนกออกได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(γ_0) เป็นการไอโอไนเซชั่นเนื่องจากการปล่อยอิเลคตรอนจากผิวของคาโถดของไอออนบวก

(γ_1) เป็นการไอโอไนเซชั่นเนื่องจากการชนระหว่างไอออนบวกกับอะตอมของก๊าซขณะที่ไอออนบวกเคลื่อนที่เข้าหาคาโถด

(γ_2) เป็นการไอโอไนเซชั่นเนื่องจากพลังงานโฟตอนที่ตกกระทบลงบนคาโถดที่เกิดจากการรวมตัวกันอีกของอิเลคตรอนและไอออน หรือเกิดจากโมเลกุลที่อยู่ในสภาพตื่นกระตุ้น (Excited State) ปล่อยพลังงานโฟตอนออกมาเพื่อกลับสู่สภาพพื้นฐาน(Ground State)

ซึ่งจะทำให้ได้ความสัมพันธ์เป็น

$$\gamma = \frac{\gamma_0 + \gamma_1 + \gamma_2}{3}$$

วิธีการแบบต่าง ๆ ของการไอโอไนเซชั่นขั้นที่สอง อาจเกิดขึ้นเพียงอย่างเดียวหรือหลายอย่างรวมกันก็ได้ (ระหว่างอิเลคโตรด) เมื่อเราคิดสมการของกระแสที่ไหลระหว่างอิเลคโตรด เนื่องจากวิธีการแต่ละอย่างหรือหลายอย่างรวมกันสมการเหล่านี้จะคล้ายคลึงกัน อย่างไรก็ตาม ผลจากการชนของไอออนบวกจะเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดที่แทนการไหลของกระแสทั้งหมด จากการศึกษาพบว่ากระแสของก๊าซดีสชาร์จขึ้นอยู่กับคาโถดเช่น การไอโอไนเซชั่นจากผิวของคาโถดเนื่องจากการชนของไอออนบวกการหาสมการของกระแสที่ไหลระหว่างอิเลคโตรดเราจะกำหนดให้

n เป็นจำนวนของอิเลคตรอนที่เคลื่อนที่ถึงอาโนดใน 1 วินาที

n_0 เป็นจำนวนของอิเลคตรอนที่หลุดออกจากผิวของคาโถด เมื่อคาโถดได้รับพลังงานจากภายนอก

n_+ เป็นจำนวนของอิเลคตรอนที่หลุดออกจากผิวของคาโถดโดยการชนของไอออนบวก

γ_0 เป็นจำนวนของอิเลคตรอนที่หลุดออกจากผิวของคาโถดโดยการชนของไอออนบวก 1 ตัว

ดังนั้นจะได้

$$n = (n_0 + n_+)e^{\alpha d} \qquad 2.18$$

$$n_+ = \gamma_0[n - (n_0 + n_+)]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทน n_+ ในสมการที่ (2.18) จะได้

$$n = n_0 \left[\frac{e^{\alpha d}}{1-\gamma_0(e^{\alpha d}-1)} \right] \qquad 2.19$$

ซึ่งเมื่อคูณด้วยประจุของอิเลคตรอนสามารถเขียนในเทอมของกระแสได้เป็น

$$I = I_0 \left[\frac{e^{\alpha d}}{1-\gamma_0(e^{\alpha d}-1)} \right] \qquad 2.20$$

กระแสที่ไหลระหว่างคาโถดและอาโนด เนื่องจากวิธีการไอโอไนเซชั่นที่สองทั้งหมดหาได้โดยใช้ γ แทน γ_0 ในสมการที่ (2.20) ซึ่งจะได้

$$I = I_0 \left[\frac{e^{\alpha d}}{1-\gamma(e^{\alpha d}-1)} \right] \qquad 2.21$$

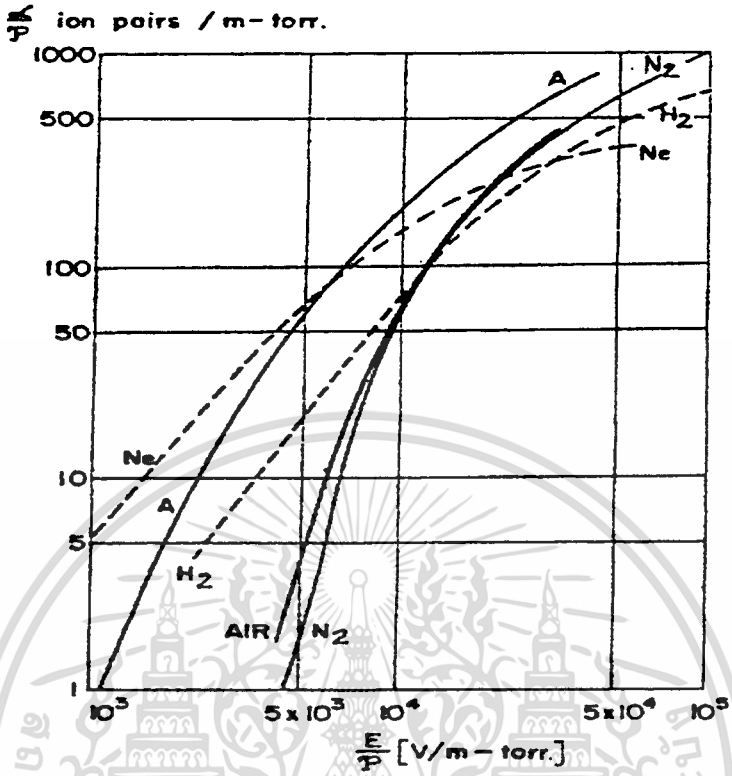
จากสมการที่ (2.21) จะเห็นได้ว่าถ้า $\gamma = 0$ สมการที่ (2.21) จะกลายเป็นสมการที่ (2.17)

α เป็นสัมประสิทธิ์การไอโอไนเซชั่นที่หนึ่งของทาวน์เซนต์ซึ่งเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความดัน เพราะจำนวนครั้งที่เกิดการชนระหว่างอิเลคตรอนกับโมเลกุลของก๊าซเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความดันและค่าสัมประสิทธิ์ (α) นี้ จะขึ้นอยู่กับพลังงานเฉลี่ยของอิเลคตรอนด้วย พลังงานอันนี้เป็นปฏิภาคโดยตรงกับความแรงสนามไฟฟ้า E และระยะทางอิสระเฉลี่ย(λ) แต่ λ นี้ เป็นปฏิภาคส่วนกลับกับความดัน ดังนั้นอาจจะเขียนสัมประสิทธิ์การไอโอไนเซชั่นที่หนึ่งของทาวน์เซนต์(α) ที่เป็นฟังก์ชันของความแรงสนามไฟฟ้า (E) และความดัน (P) ได้เป็น

$$\alpha = P f_1\left(\frac{E}{P}\right)$$
$$\frac{\alpha}{P} = f_1\left(\frac{E}{P}\right) \qquad 2.22$$

รูปที่ 2.7 จะแสดงค่าของ α/P ที่เป็นฟังก์ชันของ E/P ที่วัดได้ในก๊าซชนิดต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แสดงค่าที่วัดได้ของ α/P ที่เป็นฟังก์ชันของ E/P ในก๊าซชนิดต่าง ๆ

และสัมประสิทธิ์การไอโอไนเซชั่นที่สองของทาวน์เซนด์เราสามารถเขียนเป็นฟังก์ชันของความแรงสนามไฟฟ้า E และความดัน P ของก๊าซได้ดังนี้

$$\gamma = f_2\left(\frac{E}{P}\right) \qquad 2.23$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 เงื่อนไขการเกิดการเบรคดาวน์ของทาวน์เซนด์ [3]

สำหรับกระแสในสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอระหว่างแผ่นอิเลคโตรดสองอันเราสามารถหาได้จากได้จากสมการที่ (2.21)

$$I = I_0 \left[\frac{e^{\alpha d}}{1-\gamma_0(e^{\alpha d}-1)} \right] \qquad 2.23$$

เนื่องจากขณะที่ใกล้เกิดการเบรคดาวน์ $e^{\alpha d} >> 1$ ดังนั้นจะได้

$$I = I_0 \left[\frac{e^{\alpha d}}{1-\gamma^{\alpha d}} \right] \qquad 2.24$$

เมื่อ I_0 เป็นกระแสเริ่มต้นที่ออกจากคาโถด

α เป็นสัมประสิทธิ์การไอโอไนเซชั่นที่หนึ่งของทาวน์เซนด์

γ เป็นสัมประสิทธิ์การไอโอไนเซชั่นที่สองของทาวน์เซนด์

จากสมการ (2.21) จะเห็นได้ว่า I จะมีค่าเป็นอนันต์เมื่อ $\gamma\ (e^{\alpha d}-1) = 1$ ดังนั้นจะเกิดเบรคดาวน์ในก๊าซขึ้นเมื่อ

$$\gamma\ (e^{\alpha d}-1) = 1 \qquad 2.25$$

หรือ $\gamma\ e^{\alpha d} = 1$ เมื่อ $(e^{\alpha d} \rangle\rangle 1)$

สมการที่ 2.25 นี้เป็นเงื่อนไขสำหรับการเกิดเบรคดาวน์ขึ้นในก๊าซของทาวน์เซนด์ เนื่องจากอิเลคตรอนที่ออกมาจากคาโถดจะทำให้เกิดพาหะประจุไฟฟ้า (อิเลคตรอนและไอออน) ในระหว่างที่เคลื่อนที่เข้าหาอาโนดเป็นจำนวน $(e^{\alpha d} - 1)$ คู่ และไอออนบวกจำนวน $(e^{\alpha d} - 1)$ ตัวนี้จะเคลื่อนที่เข้าคาโถด และทำให้เกิดอิเลคตรอนจากคาโถดใหม่อีกเป็นจำนวน $\gamma(e^{\alpha d} - 1)$ ตัว อิเลคตรอนที่ออกจากคาโถดใหม่นี้ ก็จะทำให้เกิดการไอโอไนเซชั่นได้อีก ดังนั้นดีสชาร์จก็จะเกิดอยู่ได้โดยไม่จำเป็นต้องมีอิเลคตรอนที่เกิดโดยการได้รับพลังงานจากภายนอก ดีสชาร์จแบบคงสภาพเองไม่ได้ก็จะเปลี่ยนเป็นดีสชาร์จแบบคงสภาพเองได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากการศึกษาพบว่าวัสดุที่มีค่าเวอร์คฟังก์ชันของผิวต่ำ จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การไอโอไนเซชั่นที่สองของทาวน์เซนต์ (γ) สูง ค่าของเวอร์คฟังก์ชันของโลหะบางชนิดได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4
แสดงค่าเวอร์คฟังก์ชันของโลหะบางชนิดที่ได้จากการวัด โดยวิธีการโฟโตอิมิสชั่น (Photo Emission) และเทอร์ไมโอนิคอีมิสชั่น (Thermionic Emission)

ชนิดของโลหะ	เวอร์คฟังก์ชัน ($e\phi$) หน่วยเป็น (eV)	
	โฟโตอิเลคตริค	เทอร์ไมโอนิค
Ag	4.74	3.08-3.56
AL	2.98-4.43	-
AU	3.90-4.92	4.00-4.58
Ba	1.90-2.49	2.11
C	4.81	4.39
Ca	2.42-3.21	2.24
Cs	1.38-1.90	1.81
Cu	4.07-4.80	3.85-4.38
Fe	3.91-4.70	4.04-4.77
Li	2.28-2.42	-
Mg	2.15-3.75	-
Ni	4.06-5.20	4.61-5.24
Rb	2.09-2.16	-
Ta	4.05-4.16	4.07-4.19
U	3.63	3.27
W	4.35-4.60	4.52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

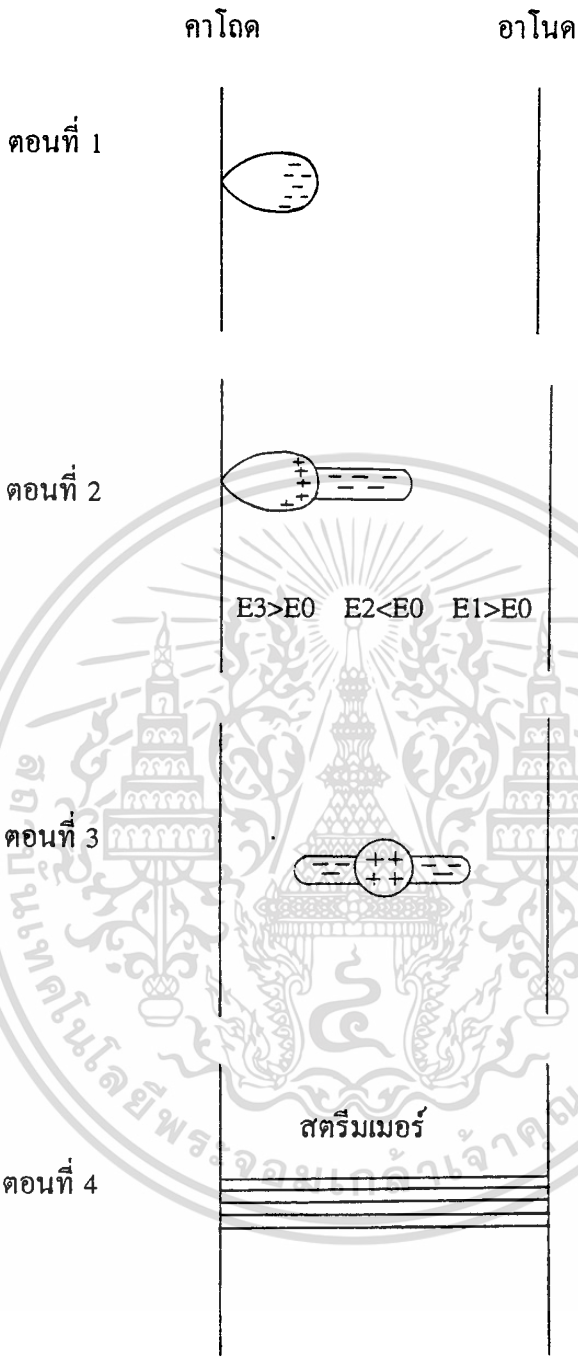
2.2.3 ทฤษฎีสตรีมเมอร์ (Streamer Theory)

เนื่องจากทฤษฎีของทาวน์เซนต์นั้นกระบวนการแกมม่า(γ) สามารถใช้ได้ในกรณีที่ค่า ของ pd ไม่มากนัก (p คือความดัน, d คือระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด) น้อยกว่า 800 Torr. สำหรับอากาศ แต่ในกรณีที่ค่า pd มากกว่านี้ทฤษฎีของทาวน์เซนต์ไม่เพียงพอที่จะอธิบายการดีสชาร์จอีกแบบหนึ่งที่เรียกว่าสปาร์คดีสชาร์จได้ (สปาร์คดีสชาร์จเป็นลักษณะหนึ่งของการดีสชาร์จในก๊าซซึ่งเกิดจากการที่ก๊าซที่เป็นฉนวน ไม่สามารถทนต่อความเครียดของสนามไฟฟ้าที่สูงได้ และเกิดการดีสชาร์จขึ้นอย่างรวดเร็ว) และจากการพิจารณาเหตุผลต่อไปนี้

1. ที่ค่า pd สูง ๆ คาโถดไม่มีความสำคัญในการเกิดสปาร์ค เพราะว่าเกิดการสปาร์คขึ้นได้ที่แรงดันอันเดียวกัน โดยใช้คาโถดต่างชนิดกัน
2. มีก๊าซดีสชาร์จบางชนิดจะไม่มีคาโถดเข้ามาเกี่ยวข้องเลย (เช่น ฟ้าผ่า)
3. จากการพิจารณาเวลาในการเคลื่อนที่ของไอออนบวกในสนามไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดค่าหนึ่งเวลาที่เกิดการสปาร์คควรจะช้ากว่า 10^{-5} วินาที ไปมากแต่จริง ๆ แล้วเวลาที่เกิดการสปาร์คที่ความดันบรรยากาศ (1 atm) เวลาจะช้าไปเพียงประมาณ 10^{-7} วินาที หรือบางครั้งก็จะใช้เวลาน้อยกว่า 10^{-5} วินาที

ดังนั้น Loeb และ Meek จึงได้เสนอทฤษฎีอีกอันหนึ่งซึ่งเรียกว่า ทฤษฎีสตรีมเมอร์ขึ้น (สตรีมเมอร์ลบ) เพื่ออธิบายการเกิดสปาร์คดีสชาร์จ ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอน ตามรูปที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แสดงวิธีการเกิดการเบรคดาวน์แบบสตรีมเมอร์ลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 1 : เกิดการเพิ่มขึ้นของอิเลคตรอนตามวิธีการของทาวน์เซนต์นั้นคือเกิดอะวาลานซ์ของอิเลคตรอนขึ้น

1 อิเลคตรอน ------> $e^{\alpha d}$ อิเลคตรอน

Eo เป็นสนามไฟฟ้าขณะที่ยังไม่มีประจุออกันอยู่ระหว่างอิเลคโตรดทั้งสอง

E1, E2, E3 เป็นสนามไฟฟ้าในแต่ละส่วนขณะที่มีประจุออกันอยู่

ตอนที่ 2 : ถ้ากำหนดให้ $\alpha x \cong 20$ (อิเลคตรอนทั้งหมดที่เกิดจากอิเลคตรอนหนึ่งตัวจะเป็น $e^{20} \cong 4.85 * 10^8$ ตัว) และอะวาลานซ์ของอิเลคตรอนจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วประมาณ $8 * 10^5$ m/s อะวาลานซ์นี้จะแผ่ออกไปที่อาโนดในแบบของสายอิเลคตรอนซึ่งเรียกว่า สตรีมเมอร์ลบ สตรีมเมอร์ลบนี้จะมีความนำไฟฟ้าสูง หน้าของอะวาลานซ์จะขยายตัว ไอออนบวกซึ่งอยู่หลังอิเลคตรอนจะมีสภาพคล้ายประจุที่ออกันอยู่เราอาจแบ่งบริเวณของสนามไฟฟ้าระหว่างอิเลค - โตรดออกได้เป็น 3 ส่วน คือ

ก. บริเวณหน้าอะวาลานซ์ของอิเลคตรอนกับอาโนด สนามไฟฟ้า E1 ในบริเวณนี้จะเพิ่มขึ้น (E1 > E0) ซึ่งจะทำให้อิเลคตรอนเคลื่อนที่เข้าหาอาโนดเร็วขึ้นและเข้าสมทบกับอิเลคตรอนซึ่งเกิดขึ้นในบริเวณนี้เนื่องจากโฟโตไอโอไนเซชั่น

ข. ที่บริเวณหัวของอะวาลานซ์ของอิเลคตรอน สนามไฟฟ้า E2 จะลดลง (E2 < E0) บริเวณนี้จะมีเอ็กซ์ไซเตชั่นของโมเลกุลมาก ดังนั้นจะมีแสงในบริเวณนี้ซึ่งทำให้เกิดโฟโตไอโอไนเซชั่น และอะวาลานซ์ของอิเลคตรอนตัวใหม่ในบริเวณใกล้เคียงขึ้นมา

ค. บริเวณระหว่างอะวาลานซ์ของอิเลคตรอนกับคาโถด สนามไฟฟ้า E3 ในบริเวณนี้จะเพิ่มขึ้น (E3 > E0) ทำให้เกิดการไอโอไนเซชั่น โดยการชนของอิเลคตรอน และมีโฟโตไอโอไนเซชั่นโดยโฟตอนจากตอนหัวของอะวาลานซ์ ดังนั้นจะเกิดสตรีมเมอร์ขึ้นบริเวณนี้ด้วย และสตรีมเมอร์จะขยายตัวเข้าหาคาโถด

ตอนที่ 3 : สตรีมเมอร์จะขยายตัวเข้าหาอาโนดและคาโถดด้วยความเร็ว 10^6 ถึง $2 * 10^6$ m/s สตรีมเมอร์นี้อาจแยกสาขาออกไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 4 : สตรีมเมอร์ซึ่งมีความนำไฟฟ้าสูงทั้งสองนี้จะขยายตัวถึงคาโถดและอาโนด ตอนนี้สปาร์คดีสชาร์จจะเกิดขึ้นโดยสมบูรณ์ และกระแสจะเพิ่มขึ้นโดยทันที ความต่างศักย์ระหว่างอิเลคโตรดทั้งสองจะลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

อุปกรณ์แบบ Steady-State ของ Townsend

3.1 จุดประสงค์ของการทดลองศึกษา

1. ศึกษาถึงโครงสร้างและอุปกรณ์ประกอบของอุปกรณ์แบบ Steady-State ของ Townsend
2. ศึกษาถึงการพัฒนาและการออกแบบ ไอโอไนเซชั่นแชมเบอร์ (Ionization Chamber)
3. ศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อระบบสุญญากาศ
4. เพื่อนำไปใช้ศึกษาการเกิดเบรคดาวน์ในก๊าซที่ค่าของ pd ต่ำ ๆ ในก๊าซชนิดต่าง ๆ

3.2 มูลฐานของวิธี

มูลฐานของวิธีที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการเปลี่ยนแปลงแรงดันหรือความดัน (P) และระยะแก๊ปหรือระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด (d) เพื่อศึกษาถึงแรงดันขณะเริ่มเกิดการเบรคดาวน์ซึ่งจะประกอบด้วย

1. การวัดแรงดันเบรคดาวน์ที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด (d) ที่ความดัน (p) มีค่าคงที่
3. การหาแรงดันเบรคดาวน์ที่เป็นฟังก์ชันของ pd

3.2.1 การคำนวณหาแรงดันเบรคดาวน์ในก๊าซ [4]

จากเงื่อนไขการเกิดเบรคดาวน์ของก๊าซในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอของทาวน์เซนต์ตามสมการที่ 2.25 คือ

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

และอาจเขียนเงื่อนไขของการเกิดเบรคดาวน์ในลักษณะทั่วไป เพื่อแทนกระบวนการขั้นที่สองอื่น ๆ ที่มีเงื่อนไขการเกิดเบรคดาวน์ในลักษณะเดียวกันด้วยแฟกเตอร์ตัวหนึ่งคือ Γ ดังนั้นจะเขียนเงื่อนไขทั่วไปของการเกิดเบรคดาวน์ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \qquad 3.1$$

เมื่อ $$\Gamma = \left[\frac{\gamma_0 + \gamma_1 + \gamma_2 + \ldots + n}{n}\right]$$

Γ คือจำนวนเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การไอโอไนเซชั่นที่สองทั้งหมดที่ออกจากคาโถดและจากสมการที่ 3.1 αd จะมีค่าเป็น

$$\alpha d = \ln\left[\frac{1}{\Gamma + 1}\right] \qquad 3.2$$

สัมประสิทธิ์ของการไอโอไนเซชั่นที่หนึ่ง (α) จะมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.22 สำหรับในก๊าซชนิดต่าง ๆ อาจเขียนแทนได้ด้วยสมการ

$$\frac{\alpha}{P} = Ae^{-B/(E/P)}$$

$$E = \frac{U}{d}$$

เมื่อ U เป็นแรงดันไฟฟ้า และดังนั้นจะได้

$$\alpha = PAe^{-B/(E/P)} \qquad 3.3$$

ซึ่ง A และ B เป็นค่าคงตัวจะขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซ ฟังก์ชันตามสมการที่ 3.3 นี้สามารถใช้ได้ในย่านที่จำกัดของ E/P ที่ช่วงค่าหนึ่งดังแสดงในตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1

แสดงค่าคงตัว A และ B ของก๊าซชนิดต่าง ๆ [3]

ก๊าซ	A $(cm\text{-}Torr)^{-1}$	B $(V\ cm\text{-}Torr)^{-1}$	ย่านของ E/P ที่ใช้ได้ (V/cm-torr)
Air	15	365	100-800
N_2	12	342	100-600
H_2	5.4	139	20-1000
He	3	34(25)	20-150(3-10)
Ne	4	100	100-400
Ar	14	180	100-600
CO_2	20	466	500-1000
H_2O	12.9	289	150-1000

จากความสัมพันธ์ตามสมการที่ 3.2 จะได้สัมประสิทธิ์ของการไอโอไนเซชั่นเป็น

$$\alpha = \left[\frac{1}{d}\right] \ln\left(\frac{1}{\Gamma+1}\right)$$

ดังนั้น

$$PAe^{-BPd/u} = \left[\frac{1}{d}\right] \ln\left(\frac{1}{\Gamma+1}\right)$$

$$e^{BPd/u} = \left[\frac{PAd}{\ln(1/\Gamma+1)}\right]$$

ถ้าให้ U = Ub จะได้

$$Ub = \left[\frac{BPd}{\ln\left(APd/\ln(1/\Gamma+1)\right)}\right] \qquad 3.4$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ Ub คือแรงดันเบรคดาวน์ A และ B เป็นค่าคงตัวของก๊าซแต่ละชนิด ตามตารางที่ 3.1 ซึ่งจากการศึกษาพบว่า Ub นี้จะขึ้นอยู่กับ pd แรงดันเริ่มต้น (Ui) ของการเกิดเบรคดาวน์สามารถหาได้จากสมการที่ 3.5 โดยการอินทิเกรตสมการที่ 3.4 เทียบกับ pd แล้วให้เท่ากับศูนย์จะได้

$$\frac{dUb}{d(pd)} = \left[\frac{B}{\ln(Apd/\ln(1/\Gamma+1))}\right] - \left[\frac{B}{\ln(Apd/\ln(1/\Gamma+1))^2}\right] = 0$$

นั้นคือ $$\ln\left[\frac{Apd}{\ln(1/\Gamma+1)}\right] = 1$$

และจะได้ $$(pd)\min = \left[\frac{e}{A}\right]\ln(1/\Gamma+1)$$

ดังนั้น $$U_i = 2.718\left[\frac{B}{A}\right]\ln(1/\Gamma+1) \qquad 3.5$$

ในสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอแรงดันที่ต่ำกว่าค่า Ui นี้ จะไม่สามารถทำให้เกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซขึ้นได้ไม่ว่าจะทำให้ระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดน้อยลงหรือความดันจะต่ำลงเท่าใดก็ตาม

สำหรับค่าของ Γ ในก๊าซเฉื่อยจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.01 ถึง 0.1 ในก๊าซไนโตรเจนจะมีค่าประมาณ 10^{-4} และในอากาศจะมีค่าประมาณ 10^{-5} (ค่านี้สำหรับในก๊าซไนโตรเจนและอากาศใช้ได้ที่ pd = 760 mmHg.cm)[2]

3.3 ไอโอไนเซชั่นแชมเบอร์ (Ionization Chamber) [5]

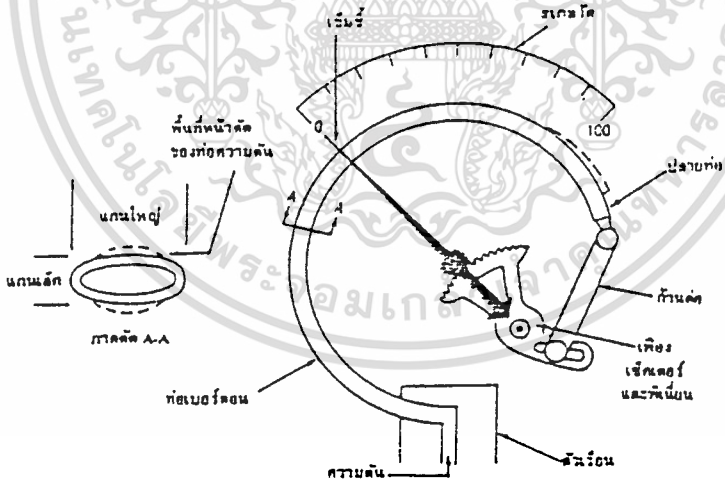
ไอโอไนเซชั่นแชมเบอร์ จะมีโครงสร้างของตัวถังเป็นรูปทรงกระบอก ที่ถูกสร้างขึ้นจากแผ่นเหล็กเหนียวชนิด (SS-41) และมีปริมาตรความจุ 83 ลิตร ผิวภายในทั้งหมดจะถูกฉาบด้วยทองแดงหนา 0.04 mm เพื่อที่จะให้ได้ผิวเป็น Equipotential และลดการ Outgassing ให้น้อยที่สุดที่ตัวของแชมเบอร์จะมีหน้าต่างที่ออกแบบขึ้นมาเพื่อใช้ในการสอดมือเข้าไปปรับระดับขั้วอิเลคโตรดภายใน และมีช่องกระจกสำหรับมองเพื่อสังเกตดูการเกิดการเบรคดาวน์ของก๊าซ โดยชุดหน้าต่างนี้จะสามารถเปิด-ปิดได้ และเมื่อปิดแล้วจะต้องไม่มีการรั่วซึมตามรอยต่อ และที่ตัวของแชมเบอร์จะมีท่อถูกต่อออกมาสองท่อ เพื่อใช้ในการสูบอากาศออกและเติมก๊าซตามชนิดที่ต้องการเข้าไป อากาศภายในจะถูกสูบออกโดยใช้ Rotary Vane Vacuum Pump เพียงอย่างเดียว ความดันสุดท้ายในการสูบอากาศออกจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประมาณ $5.8*10^{-1}$ Torr ซึ่งหากเราใช้ Oil Diffusion Pump ด้วย โดยใช้เวลาในการปั๊มประมาณ 24 ชั่วโมง จะได้ความดันสุดท้ายประมาณ 10^{-5} Torr สำหรับอัตรารั่วของแชมเบอร์นี้จะมีอัตราการรั่วประมาณ 6 Torr/ชม. ซึ่งการซีลตามข้อต่อต่าง ๆ จะมีผลกับแชมเบอร์มากการซีลที่ดีจะทำให้อัตรการรั่วลดลงเป็นอย่างมากและจะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพดีขึ้น

3.3.1 เกจวัดความดันแบบเบอร์ดอน (Bourdon Gauge) [6]

เกจวัดความดันที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะใช้เกจวัดความดันแบบที่มีโครงสร้างเป็นเบอร์ดอนรูปตัวซี (C-Bourdon) ซึ่งจะมีท่อเบอร์ดอนเป็นรูปตัวซี ลักษณะโครงสร้างของเกจแบบนี้ได้แสดงไว้ตามรูปที่ 3.1 โดยมีหลักการทำงานคือ อากาศภายในท่อเบอร์ดอนจะถูกดูดออกไปยังบรรยากาศภายนอก (ซึ่งท่อเบอร์ดอนนี้จะมีลักษณะพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปวงรี ดังที่แสดงไว้ในรูป 3.1) ซึ่งจะทำให้ความดันอากาศ ภายในท่อเบอร์ดอนต่ำกว่าความดันภายนอก (ความดันบรรยากาศ) จะทำให้เกิดความเครียดขึ้นภายในท่อเบอร์ดอนและเกิดการหดตัวขึ้น ซึ่งการหดตัวของท่อเบอร์ดอนนี้จะขึ้นอยู่กับความดันอากาศภายในท่อเบอร์ดอนและขนาดของท่อเบอร์ดอน ที่ปลายของท่อเบอร์ดอนจะมีก้านต่อที่ต่อไปยังชุดเฟืองเพื่อใช้หมุนเข็มชี้ที่อยู่บนสเกลวัด

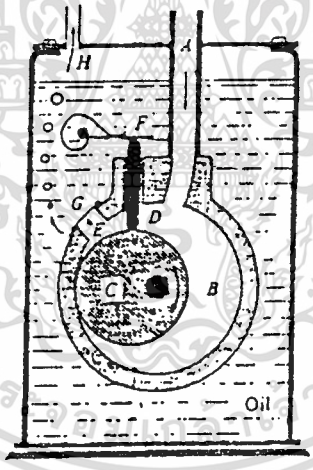


รูปที่ 3.1 รูปแสดงโครงสร้างของเบอร์ดอนเกจรูปตัวซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 ปั๊มสุญญากาศ (Rotary vane pumps) [7]

ปั๊มสุญญากาศที่ใช้จะเป็นโรตารี่เวนปั๊ม (Rotary vane pumps) ปั๊มแบบนี้จะมีโครงสร้างตามรูปที่ 3.2 จากรูปสามารถอธิบายการทำงานของปั๊มได้โดยในขั้นแรกแชมเบอร์ที่ต้องการทำให้เป็นสุญญากาศจะถูกต่อโดยท่อนำอากาศ A ซึ่งท่อนี้จะนำอากาศไปยังช่องว่างที่จุด B จานเยื้องศูนย์ในกระบอกที่จุดซีจะหมุนตามทิศทางที่แสดงไว้ จุดสัมผัสระหว่างจานเยื้องศูนยกับผิวภายในกระบอกสูบจะเคลื่อนที่ไปรอบ ๆ กระบอกสูบในทิศทางเดียวกับเข็มนาฬิกาดังนั้นอากาศจะถูกอัดมารวมกันที่ช่องว่าง E และจานเยื้องศูนย์จะเลื่อนไปที่จุด D ที่จุดนี้จะมีแท่ง F ที่สัมผัสกับจานเยื้องศูนย์อยู่ตลอดเวลาของการหมุนซึ่งทำหน้าที่กั้นอากาศ เมื่ออากาศที่จุด E ถูกอัดจนมีความดันมากพอวาว์ล G จะถูกเปิดออกอากาศจะเป็นฟองดันน้ำมันและออกไปยังบรรยากาศภายนอกโดยผ่านท่อ H สำหรับการหมุนของจานเยื้องศูนย์นั้นจะใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นตัวขับ ปั๊มชนิดนี้มีอัตราการดูดอากาศออกที่สูงมาก สามารถทำสุญญากาศสูง ๆ ได้ในระยะเวลาสั้น ๆ ขณะที่เริ่มทำงานต้องการทอร์คที่ใช้สำหรับเริ่มเดินปั๊มต่ำ ระดับความสั่นสะเทือนขณะเดินเครื่องและเสียงรบกวนต่ำ



รูปที่ 3.2 รูปแสดงโครงสร้างของโรตารี่เวนปั๊ม

3.3.3 การพัฒนาและการออกแบบอาโนด (Anode) และคาโถด (Cathode) [5] [8]

ส่วนประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งของไอโอไนเซชั่นแชมเบอร์ก็คือ การออกแบบขั้วอิเลคโตรด ซึ่งขั้วอิเลคโตรดนี้จะเป็นตัวทำให้เกิดการเบรคดาวน์ ในการศึกษานี้จะศึกษาแรงดันที่เริ่มเกิดการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เบรคดาวน์ในสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ เพราะฉนั้นสนามไฟฟ้าที่บริเวณระหว่างขั้วอิเลคโตรดต้องมีความสม่ำเสมอ จากการศึกษาพบว่า ขั้วอิเลคโตรดที่มีการออกแบบให้เป็นแบบ Reqowski จะมีสนามไฟฟ้าบริเวณระหว่างขั้วอิเลคโตรดที่สม่ำเสมอ (สำหรับขั้วอิเลคโตรดที่เป็นแผ่นระนาบกับแผ่นระนาบจะมีสนามไฟฟ้าบริเวณขอบสูงกว่าตรงกลาง และขั้วอิเลคโตรดที่เป็นแผ่นระนาบกับทรงกลมจะสนามไฟฟ้าตรงกลางจะสูงกว่าบริเวณข้าง ๆ) ซึ่งในการออกแบบ Roqowski Electrode ที่จะนำมาใช้นั้นเราจะใช้สมการของ Maxwell ในการวิเคราะห์และคำนวณหาจุดต่างๆ ของ Equipotential Surface เพื่อหาค่าในการออกแบบที่ถูกต้องและเหมาะสม ซึ่งสมการของ Maxwell ที่ใช้ในการออกแบบมีดังนี้

$$X = A(\phi + e^{\phi}\cos\Psi)$$

$$Y = A(\Psi + e^{\phi}\sin\Psi)$$

A = อัตราส่วนของระยะห่างระหว่าง Finite Plane กับ Infinite Plane ต่อ

ϕ = เส้นแรงของสนามไฟฟ้า

Ψ = Equipotential Surface

X และ Y คือจุด Coordinates ในตำแหน่งต่าง ๆ ระหว่าง Finite Plane กับ Infinite Plane

จากสมการของ Maxwell ที่ใช้ในการคำนวณเพื่อออกแบบอิเลคโตรด เราจะสมมติและกำหนดให้ค่า ψ คงที่ สมมติค่า ϕ และเปลี่ยนค่า ϕ ไปเรื่อย ๆ โดยค่า ϕ ที่เราสมมติขึ้นเมื่อนำเข้าไปแทนในสมการของ Maxwell แล้วต้องสามารถหาค่าของ X และ Y ได้ซึ่งจะทำให้ได้ Equipotential Surface มาเส้นหนึ่ง ในการออกแบบนี้เราจะสมมติค่า ψ หลาย ๆ ค่า และค่าที่สมมติจะต้องเป็นไปตามสมการ $\psi = (v/V)\pi$ (ในการออกแบบนี้จะสมมติค่า ψ ต่ำสุดที่ $\psi = 0.2\pi$ และค่า ψ สูงสุดที $\psi = 0.8\pi$) จากการคำนวณตามสมการของ Maxwell ค่า ψ ที่ดีที่สุดคือ $\pi/2$ [8] แต่ในการออกแบบ Rogowski Electrode จะใช้ค่า $\psi = (2/3)\pi$ [8] ซึ่งค่านี้จากการนำไปแทนใน สมการเพื่อหาค่า X, Y และนำค่า ที่ได้ไปพล็อตระหว่าง Infinite Plane กับ Finite Plane

จะเห็นได้ว่าที่เส้น $\psi = (2/3)\pi$ สนามไฟฟ้าบริเวณส่วนโค้งของ Electrode จะมีน้อยกว่าบริเวณตงกลางซึ่งสามารถนำค่า $\psi = (2/3)\pi$ นี้ ไปออกแบบอิเลคโตรดได้ และเป็นเส้นที่มีความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สะดวกในการกลึงขึ้นรูปและง่ายต่อการติดตั้งใช้งาน การคำนวณหาค่า X, Y ในการออกแบบ Rogowski Electrode มีดังนี้

จากสมการของ Maxwell [8]

$$X = A(\phi + e^{\phi}\cos\Psi)$$
$$Y = A(\Psi + e^{\phi}\sin\Psi)$$

ในการออกแบบนี้จะกำหนดระยะห่างระหว่าง Finite Plane กับ Infinite Plane เท่ากับ 40 mm (a = 40 mm) ซึ่งค่าที่ได้จากการออกแบบ ที่ค่า $\Psi = 0.2\pi$ ถึง 0.8π ได้แสดงไว้ตามตารางที่ 3.2 ถึง 3.7

ϕ	-5.0	-4.0	- 3.0	-2.0	-1.5	-1.0	-0.5	0	0.5	1.0	1.5
X (mm)	-63.5	-50.6	-37.5	-24.0	-16.8	-8.9	-0.118	-10.3	-23.3	-40.7	-65.2
Y(mm)	8.05	8.13	8.37	9.01	9.66	10.75	12.53	15.48	20.38	28.34	41.5

ตารางที่ 3.2 แสดงการหาค่า X, Y โดยการสมมติ $\psi = 0.2\pi$

ϕ	-5.0	-4.0	-3.0	-2.0	-1.5	-1.0	-0.5	0	0.5	1.0	1.5
X(mm)	-63.6	-50.8	-38.0	-24.9	-18.2	-11.3	-3.97	3.97	12.85	23.24	36.73
Y(mm)	16.08	16.22	16.6	17.63	18.70	20.45	23.34	28.10	35.96	48.91	70.26

ตารางที่ 3.3 แสดงการหาค่า X, Y โดยการสมมติ $\psi = 0.4\pi$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ϕ	-5.0	-4.0	-3.0	-2.0	-1.5	-1.0	-0.5	0	0.5	1.0	1.5
X(mm)	-63.66	-50.92	-38.19	-25.4	-19.09	-12.73	-6.36	0	6.36	12.73	19.09
Y(mm)	20.08	20.23	20.63	21.72	22.84	24.68	27.72	32.73	40.99	54.61	77.06

ตารางที่ 3.4 แสดงการหาค่า X, Y โดยการสมมติ $\psi = 0.5\pi$

ϕ	-5.0	-4.0	-3.0	-2.0	-1.5	-1.0	-0.5	0	0.5	1.0	1.5
X(mm)	-63.68	-51.00	-38.39	-25.99	-19.97	-14.17	-8.75	-3.93	-0.12	2.03	1.46
Y(mm)	24.08	24.22	24.60	25.63	26.70	28.45	31.34	36.10	43.96	56.91	78.26

ตารางที่ 3.5 แสดงการหาค่า X, Y โดยการสมมติ $\psi = 0.6\pi$

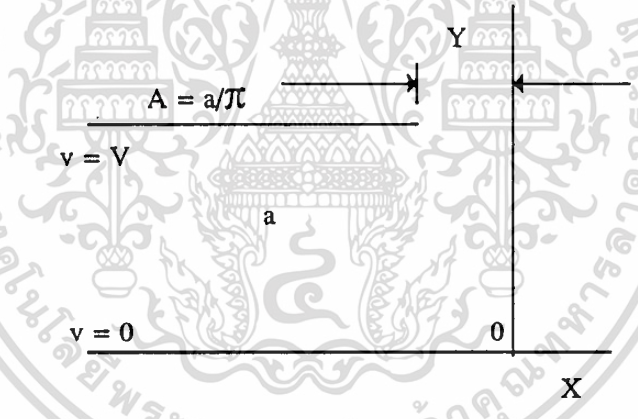
ϕ	-5.0	-4.0	-3.0	-2.0	-1.5	-1.0	-0.5	0	0.5	1.0	1.5
X(mm)	-63.70	-51.04	-38.51	-26.32	-20.51	-15.07	-10.22	-6.36	-4.52	-4.57	-9.43
Y(mm)	26.87	27.00	27.34	28.29	29.62	30.85	33.48	37.82	44.97	56.77	76.21

ตารางที่ 3.6 แสดงการหาค่า X, Y โดยการสมมติ $\psi = 0.67\pi$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

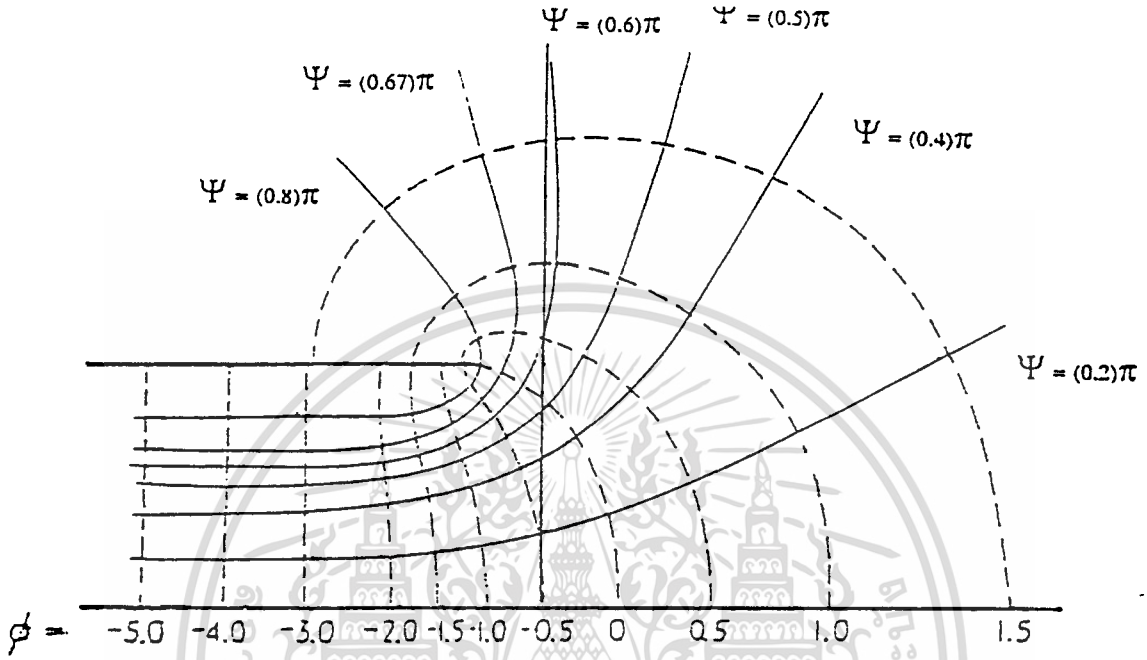
ϕ	-5.0	-4.0	-3.0	-2.0	-1.5	-1.0	-0.5	0	0.5	1.0	1.5
X(mm	-63.73	-51.11	-38.71	-26.85	-21.39	-16.52	-12.61	-10.30	-10.61	-15.26	-27.06
Y(mm)	32.05	32.13	32.37	33.01	33.66	34.75	36.53	39.48	44.33	52.34	65.54

ตารางที่ 3.7 แสดงการหาค่า X, Y โดยการสมมติ $\psi = 0.8\pi$



รูปที่ 3.3 รูปแสดงการกำหนดตำแหน่งระหว่าง Finite Plane กับ Infinite Plane

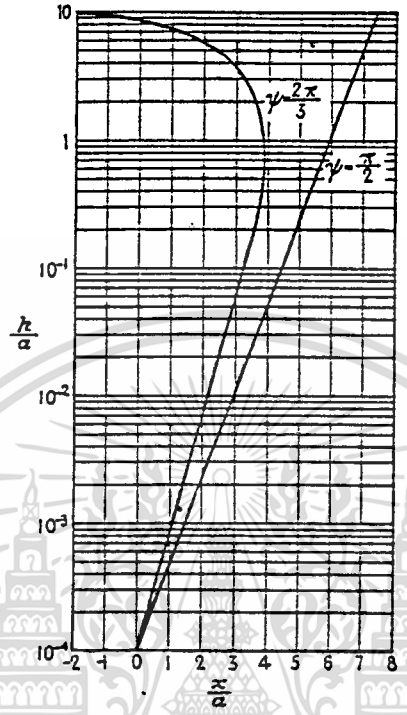
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 รูปแสดงเส้นแรงไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่าที่ขอบของ Finite Plane

จากการคำนวณตามสมการของ Maxwell แล้วนำค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟ จากรูปของเส้นกราฟถ้าค่าของ ψ แตกต่างกัน เส้นกราฟก็จะมีรูปเส้นที่แตกต่างกัน ในการออกแบบนี้เราเลือกค่า ψ เท่ากับ $(2/3)\pi$ เพราะมีความสะดวกในการติดตั้งใช้งานเมื่อได้ค่า ψ แล้ว เราจะนำค่า ψ นี้ ไปออกแบบขั้วอิเลคโตรด โดยการใช้ความสัมพันธ์ของ Stoerk จาก (h/a) และ (x/a) ความสัมพันธ์ของ Stoerk มีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 รูปแสดงความสัมพันธ์ของ Stoerk

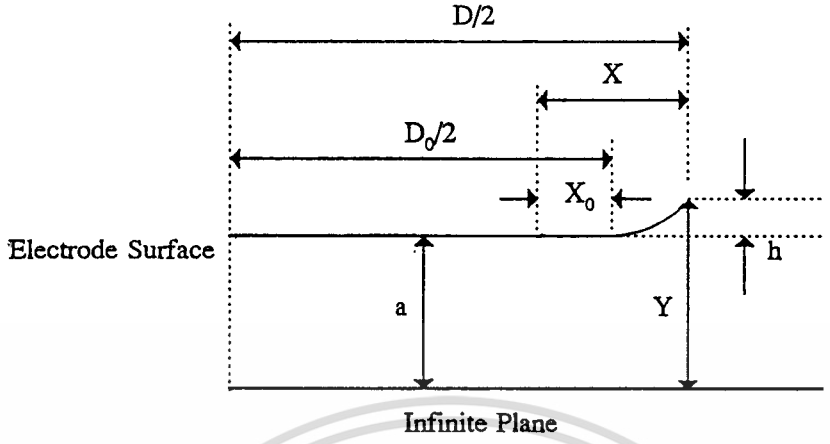
เมื่อ

h คือ ความสูงของจุด ๆ หนึ่ง ของบริเวณที่เป็นส่วนโค้ง

a คือ 1/2ของระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดสูงสุด

x คือ ระยะทางวัดในทิศทางของ Infinite Plane จากจุด R ไปถึงจุด P

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 รูปแสดงการหา Surface Profile ของ Rogowski Electrode

เมื่อ

D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของวงกลมที่เกิดจากการหมุดที่จุด P รอบแกนหมุน

D_o คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของ Flat Central Portion

x_o คือ ระยะห่างระหว่างจุด Q กับ R ซึ่ง x_o หาได้จากความสัมพันธ์ของ Stoerk

y คือ ความสูงของ P เหนือ Infinite Plane

ในการออกแบบนี้จะกำหนดให้ระยะห่างระหว่างคาโถดและอาโนดเท่ากับ 40 mm. ดังนั้น a จะเท่ากับ 20 mm. เราจะหาจุดเริ่มโค้งขึ้นของอิเลคโตรด โดยการสมมติให้ $h = 10^{-1}$ mm. เพื่อจะนำไปหาค่า (x_o/a) จากกราฟความสัมพันธ์ของ Stoerk จะได้ $(x_o/a) = 1.7$ ดังนั้น $x_o = 1.7 \times 20 = 35$ mm. ในการหาจุด P ตามส่วนโค้งของอิเลคโตรด เราจะสมมติค่า h ไปเรื่อย ๆ (โดยเริ่มต้นจาก $h = 10^{-1}$ mm [8]) และเราจะหาค่า x ได้จากกราฟความสัมพันธ์ของ Stoerk ในการออกแบบนี้จะเริ่มต้นที่ $h = 10^{-1}$ mm ถึง h = 50 mm ซึ่งวิธีการหาค่า x ตามการเปลี่ยนแปลงของ h ได้แสดงดังนี้ [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติให้ h = 2.5 mm.

a = 20 mm.

จะได้ค่า (h/a) = (2.5/20) = 1.25×10^{-1}

นำค่า (h/a) ที่คำนวณได้ ไปหาค่า (x/a) จากกราฟความสัมพันธ์

จะได้ค่า (x/a) = 3.3

x = 3.3 * 20 = 66 mm.

จะได้จุด ๆ หนึ่ง ตามแกนในแนว Infinite plane เป็น 66 mm.

สมมติให้ h = 5.0 mm.

a = 20 mm.

จะได้ค่า (h/a) = (5.0/20) = 2.5×10^{-1}

นำค่า (h/a) ที่คำนวณได้ ไปหาค่า (x/a) จากกราฟความสัมพันธ์

จะได้ค่า (x/a) = 3.5

x = 3.5 * 20 = 70 mm.

จะได้จุด ๆ หนึ่ง ตามแกนในแนว Infinite plane เป็น 70 mm

สมมติให้ h = 7.5 mm.

a = 20 mm.

จะได้ค่า (h/a) = (7.5/20) = 3.76×10^{-1}

นำค่า (h/a) ที่คำนวณได้ ไปหาค่า (x/a) จากกราฟความสัมพันธ์

จะได้ค่า (x/a) = 3.8

x = 3.8 * 20 = 76 mm.

จะได้จุด ๆ หนึ่ง ตามแกนในแนว Infinite plane เป็น 76 mm

สมมติให้ h = 10.0 mm.

a = 20 mm.

จะได้ค่า (h/a) = (10.0/20) = 5×10^{-1}

นำค่า (h/a) ที่คำนวณได้ ไปหาค่า (x/a) จากกราฟความสัมพันธ์

จะได้ค่า (x/a) = 3.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

x = 3.8 * 20 = 76 mm.

.จะได้จุด ๆ หนึ่ง ตามแกนในแนว Infinite plane เป็น 76 mm

สมมติให้ h = 12.5 mm.

a = 20 mm.

จะได้ค่า (h/a) = (12.5/20) = 6.25×10^{-1}

นำค่า (h/a) ที่คำนวณได้ ไปหาค่า (x/a) จากกราฟความสัมพันธ์

จะได้ค่า (x/a) = 3.8

x = 3.8 * 20 = 76 mm.

.จะได้จุด ๆ หนึ่ง ตามแกนในแนว Infinite plane เป็น 76 mm

สมมติให้ h = 15 mm.

a = 20 mm.

จะได้ค่า (h/a) = (15/20) = 7.5×10^{-1}

นำค่า (h/a) ที่คำนวณได้ ไปหาค่า (x/a) จากกราฟความสัมพันธ์

จะได้ค่า (x/a) = 4

x = 4 * 20 = 80 mm.

จะได้จุด ๆ หนึ่ง ตามแกนในแนว Infinite plane เป็น 80 mm

สมมติให้ h = 17.5 mm.

a = 20 mm.

จะได้ค่า (h/a) = (17.5/20) = 8.75×10^{-1}

นำค่า (h/a) ที่คำนวณได้ ไปหาค่า (x/a) จากกราฟความสัมพันธ์

จะได้ค่า (x/a) = 3.9

x = 3.9 * 20 = 78 mm.

จะได้จุด ๆ หนึ่ง ตามแกนในแนว Infinite plane เป็น 78 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติให้ h = 20 mm.

a = 20 mm.

จะได้ค่า (h/a) = (20/20) = 1

นำค่า (h/a) ที่คำนวณได้ ไปหาค่า (x/a) จากกราฟความสัมพันธ์

จะได้ค่า (x/a) = 3.8

x = 3.8 * 20 = 76 mm.

จะได้จุด ๆ หนึ่ง ตามแกนในแนว Infinite plane เป็น 76 mm

สมมติให้ h = 22.5 mm.

a = 20 mm.

จะได้ค่า (h/a) = (22.5/20) = 1.125

นำค่า (h/a) ที่คำนวณได้ ไปหาค่า (x/a) จากกราฟความสัมพันธ์

จะได้ค่า (x/a) = 3.7

x = 3.7 * 20 = 74 mm.

จะได้จุด ๆ หนึ่ง ตามแกนในแนว Infinite plane เป็น 74 mm

สมมติให้ h = 30 mm.

a = 20 mm.

จะได้ค่า (h/a) = (30/20) = 1.5

นำค่า (h/a) ที่คำนวณได้ ไปหาค่า (x/a) จากกราฟความสัมพันธ์

จะได้ค่า (x/a) = 3.7

x = 3.7 * 20 = 74 mm.

จะได้จุด ๆ หนึ่ง ตามแกนในแนว Infinite plane เป็น 74 mm

สมมติให้ h = 25 mm.

a = 20 mm.

จะได้ค่า (h/a) = (25/20) = 1.25

นำค่า (h/a) ที่คำนวณได้ ไปหาค่า (x/a) จากกราฟความสัมพันธ์

จะได้ค่า (h/a) = 3.8

x = 3.8 * 20 = 76 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้จุด ๆ หนึ่ง ตามแกนในแนว Infinite plane เป็น 76 mm

สมมติให้ h = 27.5 mm.

a = 20 mm.

จะได้ค่า (h/a) = (27.5/20) = 1.375

นำค่า (h/a) ที่คำนวณได้ ไปหาค่า (x/a) จากกราฟความสัมพันธ์

จะได้ค่า (x/a) = 3.7

x = 3.7 * 20 = 74 mm.

จะได้จุด ๆ หนึ่ง ตามแกนในแนว Infinite plane เป็น 74 mm

สมมติให้ h = 32.5 mm.

a = 20 mm.

จะได้ค่า (h/a) = (32.5/20) = 1.625

นำค่า (h/a) ที่คำนวณได้ ไปหาค่า (x/a) จากกราฟความสัมพันธ์

จะได้ค่า (x/a) = 3.5

x = 3.5 * 20 = 70 mm.

จะได้จุด ๆ หนึ่ง ตามแกนในแนว Infinite plane เป็น 70 mm

สมมติให้ h = 40 mm.

a = 20 mm.

จะได้ค่า (h/a) = (40/20) = 2.0

นำค่า (h/a) ที่คำนวณได้ ไปหาค่า (x/a) จากกราฟความสัมพันธ์

จะได้ค่า (x/a) = 3.5

x = 3.5 * 20 = 70 mm.

จะได้จุด ๆ หนึ่ง ตามแกนในแนว Infinite plane เป็น 70 mm

สมมติให้ h = 35 mm.

a = 20 mm.

จะได้ค่า (h/a) = (35/20) = 1.75

นำค่า (h/a) ที่คำนวณได้ ไปหาค่า (x/a) จากกราฟความสัมพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ค่า (x/a) = 3.7

x = 3.7 * 20 = 74 mm.

จะได้จุด ๆ หนึ่ง ตามแกนในแนว Infinite plane เป็น 74 mm

สมมติให้ h = 37.5 mm.

a = 20 mm.

จะได้ค่า (h/a) = (37.5/20) = 1.875

นำค่า (h/a) ที่คำนวณได้ ไปหาค่า (x/a) จากกราฟความสัมพันธ์

จะได้ค่า (x/a) = 3.55

x = 3.55 * 20 = 71 mm.

จะได้จุด ๆ หนึ่ง ตามแกนในแนว Infinite plane เป็น 71 mm

สมมติให้ h = 42.5 mm.

a = 20 mm.

จะได้ค่า (h/a) = (42.5/20) = 2.125

นำค่า (h/a) ที่คำนวณได้ ไปหาค่า (x/a) จากกราฟความสัมพันธ์

จะได้ค่า (x/a) = 3.5

x = 3.5 * 20 = 70 mm.

จะได้จุด ๆ หนึ่ง ตามแกนในแนว Infinite plane เป็น 70 mm

สมมติให้ h = 45 mm.

a = 20 mm.

จะได้ค่า (h/a) = (45/20) = 2.25

นำค่า (h/a) ที่คำนวณได้ ไปหาค่า (x/a) จากกราฟความสัมพันธ์

จะได้ค่า (x/a) = 3.5

x = 3.5 * 20 = 70 mm.

จะได้จุด ๆ หนึ่ง ตามแกนในแนว Infinite plane เป็น 70 mm

สมมติให้ h = 47.5 mm.

a = 20 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ค่า (h/a) = (47.5/20) = 2.375

นำค่า (h/a) ที่คำนวณได้ ไปหาค่า (x/a) จากกราฟความสัมพันธ์

จะได้ค่า (x/a) = 3.3

x = 3.3 * 20 = 66 mm.

จะได้จุด ๆ หนึ่ง ตามแกนในแนว Infinite plane เป็น 66 mm

สมมติให้ h = 50 mm.

a = 20 mm.

จะได้ค่า (x/a) = (50/20) = 2.5

นำค่า (h/a) ที่คำนวณได้ ไปหาค่า (x/a) จากกราฟความสัมพันธ์

จะได้ค่า (h/a) = 3.2

x = 3.2 * 20 = 64 mm.

จะได้จุด ๆ หนึ่ง ตามแกนในแนว Infinite plane เป็น 64 mm

จากการคำนวณหาค่า X ทุกค่าเราสามารถหาค่า D ได้จากรูป

$$D/2 = D_o/2 - x_o + x$$

$$D = D_o - 2x_o + 2x$$

$$D = D_o + 2(x-x_o)$$

ดังนั้น เราสามารถหาค่าเส้นผ่าศูนย์กลาง (D) ได้ โดยแทนค่า x, x_o, D_o จากการออกแบบ เมื่อใช้ค่า $\psi = (2/3)\pi$ จะได้ Profile ที่มี Flat Central Portion เท่ากับ 120 mm. และ Straight Portion ทำมุม 120 กับ Electrode จาก Profile $\psi = (2/3)\pi$ จะเกิดการเบรคดาวน์ที่ตรงกลางของอิเลคโตาดก่อนเสมอ ส่วนขอบที่เป็นส่วนโค้งของอิเลคโตรดจะมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นน้อยกว่าบริเวณตรงกลางจึงไม่เกิดการเบรคดาวน์ขึ้นบริเวณนี้

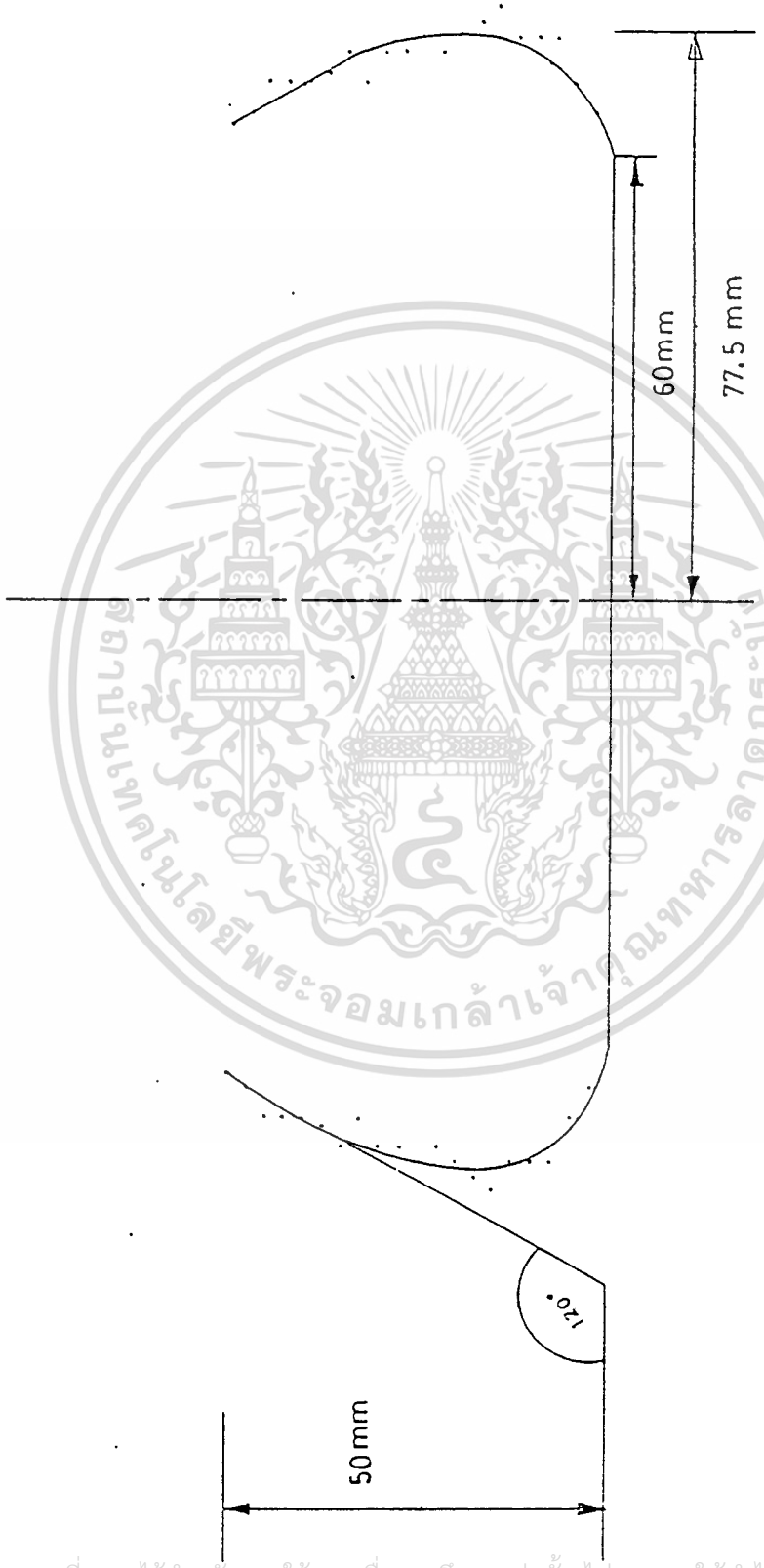
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.8

ตารางแสดงการหา Diameter ของจุดต่าง ๆ บน Profile ที่ออกแบบ

h mm.	h/a	x/a	X mm.	$X - X_0$ mm.	$2(X-X_0)$	$2(X-X_0) + D_0=D$ mm.
2.5	$1.25*10^{-1}$	3.3	66	31	62	132
5.0	0.25	3.5	70	35	70	140
7.5	0.37	3.8	76	41	82	152
10	0.5	3.8	76	41	82	152
12.5	0.62	3.8	76	41	82	152
15.0	0.75	4	80	45	90	160
17.5	0.87	3.9	78	43	86	156
20	1	3.8	76	41	82	152
22.5	1.12	3.7	74	39	78	148
30	1.5	3.7	74	39	78	148
25	1.25	3.8	76	41	82	152
27.5	1.37	3.7	74	39	78	148
32.5	1.62	3.5	70	35	70	140
40	2.	3.5	70	35	70	140
35	1.75	3.7	74	39	78	148
37.5	1.87	3.5	71	36	72	142
42.5	2.12	3.5	70	35	70	140
45	2.25	3.5	70	35	70	140
47.5	2.37	3.3	66	31	62	132
50	2.5	3.2	64	29	58	128

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 แสดงรูป Profile ของอิเลคโตรดที่ออกแบบ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาโนดและคาโถดจะถูกพัฒนาและออกให้เป็นรูป Rogowski (รูปอยู่ในภาคผนวก ก) อาโนดนี้จะทำจากอลูมิเนียม (ALUMINUM-ALLOY) ที่ผ่านขบวนการรีด เพื่ออัดผิวให้แน่นไม่มีรูพรุน ซึ่งจะมีคุณสมบัติที่ดีคือมีน้ำหนักเบา ขึ้นรูปได้ง่าย ทำให้มีผิวเรียบและไม่มีรูพรุนหรือฟองอากาศในเนื้ออลูมิเนียมได้ง่าย ที่บริเวณตรงกลางของตัวอาโนดจะถูกเจาะเป็นรู 49 รู โดยแต่ละรูจะมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มม. และรูทั้งหมดจะอยู่ในวงกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 ซม. อาโนดจะถูกยึดติดด้วยเกลียวติดอยู่กับ Anode Bushing และตั้งฉากกับผิวของคาโถดสำหรับรูที่เจาะ 49 รู มีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นช่องให้รังสีอุลตราไวโอเลตส่องผ่านไปตกกระทบที่ผิวของคาโถด เพื่อให้เกิดกระแสเริ่มแรก(Io) คาโถดจะตั้งอยู่บน Cathode Supportor ที่ปรับระดับขึ้น-ลงได้ตามแนวตั้งเป็นระยะ 4 ซม. คาโถดนี้จะทำมาจากทองเหลือง ตรงกลางจะเป็นพื้นราบมี Flat Central Protion เท่ากับ 120 mm. และมีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 155 mm. Catnode Supportor จะทำมาจากเหล็กเหนียว (SS-41) เป็นชิ้นส่วนที่ออกแบบขึ้นมาเพื่อเป็นตัวรองรับคาโถด ซึ่งสามารถถอดเปลี่ยนคาโถดได้โดยยื่นมือเข้ามาทางหน้าต่างของแชมเบอร์ Cathode Supportor นี้จะติดตั้งอยู่บน Adjusting Screns จำนวน 3 ตัว และยึดติดห่างกัน 120 องศา เพื่อใช้เป็นตัวปรับระยะของคาโถดให้ขึ้นลงตามแนวตั้ง [5]

3.3.4 การวัดความต้านทานรั่ว (Leakage Resistance)

การวัดความต้านทานรั่ว จะแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือระหว่างอาโนดกับตัวถังและคาโถดกับตัวถัง สาเหตุที่วัดใน 2 กรณีนี้คือ

1. ถ้าเกิดความต้านทานรั่วระหว่างอาโนดกับตัวถังอาจทำให้เกิดประกายไฟ (Spark) ระหว่างอาโนดกับตัวถังหรือเกิด Corona ระหว่าง Corona Shield กับตัวถังขึ้นได้
2. ถ้าเกิดความต้านทานรั่วระหว่างคาโถดกับตัวถัง จะทำให้ไม่สามารถวัดกระแสได้ และทำให้ไม่สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ของการไอโอไนเซชั่น(α) ได้ จากการทดสอบวัดค่าความต้านทานระหว่างอาโนดกับตัวถังจะมีค่าเท่ากับ 3×10^{14} Ω และความต้านทานระหว่างคาโถดกับตัวถังจะมีค่าเท่ากับ 10^{14} Ω ซึ่งเป็นค่าที่สูงมากดังนั้นกระแสรั่วไหลระหว่างอาโนดและคาโถดกับตัวถังจึงมีค่าน้อยมาก

3.3.5 การทดสอบการวัดความดันในไอโอไนเซชั่นแชมเบอร์

ขณะที่แชมเบอร์ถูกปั๊มอากาศออกโดย Rotary Vane Vacuum Pump ที่ความดันเริ่มแรก 1 บรรยากาศ (1 atm) ความดันจะลดลงเรื่อย ๆ เมื่อเวลาผ่านไป ในช่วงแรกของการปั๊มความดันจะลดลงอย่างรวดเร็วและจะค่อย ๆ ลดลงอย่างช้า ๆ เมื่อเวลามากขึ้นผลของการทดสอบได้แสดงไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามตารางที่ 3.9 โดยตารางที่ 3.9 จะแสดงความดันกับเวลาของการปั๊มเป็นวินาที

ตารางที่ 3.9

แสดงค่าความดันภายในแชมเบอร์กับเวลาของการปั๊มเป็นวินาที

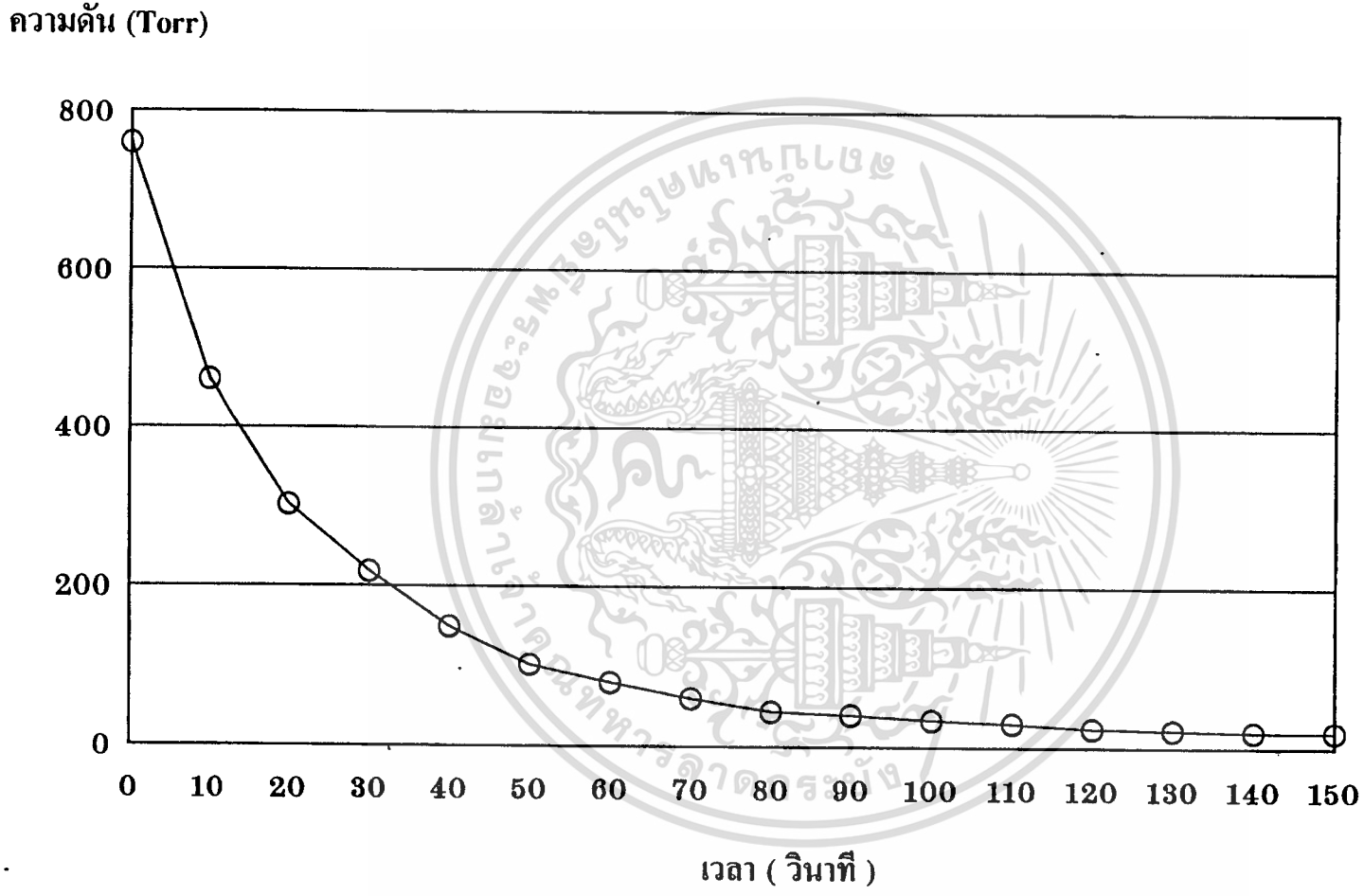
เวลา(วินาที)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
ความดัน(Torr)	760	460	302	218	150	102	80	60	44	40	34	30

ตารางที่ 3.9 (ต่อ)

เวลา(วินาที)	120	130	140	150
ความดัน (Torr)	24	22	20	20

และเมื่อนำค่าตามตารางที่ 3.9 ไปพล๊อตกราฟจะได้กราฟตามรูปที่ 3.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 กราฟแสดงความดันกับเวลาที่ใช้ในการปั๊มอากาศออกจากแชมเบอร์

3.3.6 หน่วยวัดสุญญากาศ

หน่วยที่ใช้วัดค่าความเป็นสุญญากาศ คือ นิ้วปรอท (Mercury Inch), มิลลิเมตรของปรอท (mm.Hg),. ทอร์ (Torr), บาร์ (bar), ปาสคาล (Pa) ดังนั้นในบางครั้งจึงมีความจำเป็นที่จะต้องแปลงหน่วยเพื่อที่ให้เกิดความสะดวกในการศึกษาตารางที่ 3.10 จะแสดงการเปรียบเทียบหน่วยและการเปลี่ยนหน่วยของความดัน

ตารางที่ 3.10

แสดงการเปรียบเทียบหน่วย และการเปลี่ยนหน่วยความดัน [9]

	ปาสคาล (Pascal)	บาร์ (bar)	มิลลิบาร์ (m bar)	ทอร์ (Torr)	ความดันบรรยากาศ (atm)
1 pa = 1 N/m^2	1	1×10^{-5}	0.01	7.500×10^{-3}	9.8692×10^{-6}
1 bar = 10 N/cm^2	1×10^5	1	10^3	750.062	0.986923
1 mbar=1 N/dm^2	100	10^{-3}	1	0.750062	9.8692×10^{-4}
1 Torr=1mm-Hg	133.3324	1.333×10^{-3}	1.33322	1	1.316×10^{-3}
1 atm=1 kp/cm^2	1.013×10^5	1.01325	1013.25	760	1

สำหรับการแปลงเป็นหน่วยอื่น : [10]

1 atm = 14.7 lbs/in^2

= 10.33 mH_2o

1 micron = 10^{-3} mmHg (0° c)

1 bar = 1 dyne/sq.cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.7 การวัดแรงดันในช่องว่างระหว่างอิเลคโตรดที่เป็นทรงกลม

จากมาตราฐาน IEC 52 ได้แสดงค่าแรงดันเบรคดาวน์ระหว่างอิเลคโตรดที่เป็นทรงกลมที่ใช้เป็นมาตราฐานที่อุณหภูมิ 20°C และมีระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดจาก 0.05 ถึง 6.0 cm ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกลมที่ใช้มีขนาดตั้งแต่ 2 ถึง 200 cm ในหัวข้อนี้จะแสดงการเปรียบเทียบแรงดันเบรคดาวน์ของอิเลคโตรดที่เป็นทรงกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 cm และมีระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดจาก 1.0 ถึง 6.0 cm ที่อุณหภูมิ 31°C (อุณหภูมิภายในห้องทดลอง) ที่ได้ในงานวิจัยนี้ กับแรงเบรคดาวน์ตามมาตราฐาน IEC 52 ที่อิเลคโตรดมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 cm และมีระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดจาก 1.0 ถึง 6.0 cm ที่อุณหภูมิ 20°C เพื่อศึกษาดูว่าแรงดันเบรคดาวน์จะเปลี่ยนแปลงไปมากน้อยแค่ไหนเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป (สำหรับอิเลคโตรดที่เป็นทรงกลม) ตารางที่ 3.11 จะแสดงค่าแรงดันเบรคดาวน์ระหว่างอิเลคโตรดที่เป็นทรงกลมที่วัดได้ในงานวิจัยนี้ ตารางที่ 3.12 จะแสดงค่าแรงดันเบรคดาวน์ระหว่างอิเลคโตรดที่เป็นทรงกลมตามมาตราฐาน IEC 52 และเมื่อนำค่าตามตารางที่ 3.11 และ 3.12 ไปพล็อตกราฟจะได้กราฟตามรูปที่ 3.9

ตารางที่ 3.11

ตารางแสดงระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดที่เป็นทรงกลมกับแรงดันเบรคดาวน์ (เป็น kV) ที่วัดได้ในอากาศที่ความดันบรรยากาศ (1 atm) ที่อุณหภูมิ 31°C

d (cm)	1.0	1.2	1.4	1.5	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4
Ub (kV)	28.5	32.1	37.8	40.2	42.3	48.0	53.4	59.4	64.8

ตารางที่ 3.11 (ต่อ)

d (cm)	2.6	2.8	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
Ub (kV)	69.3	74.1	80.1	90.0	102.6	114.0	126.0	139.5	148.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.12

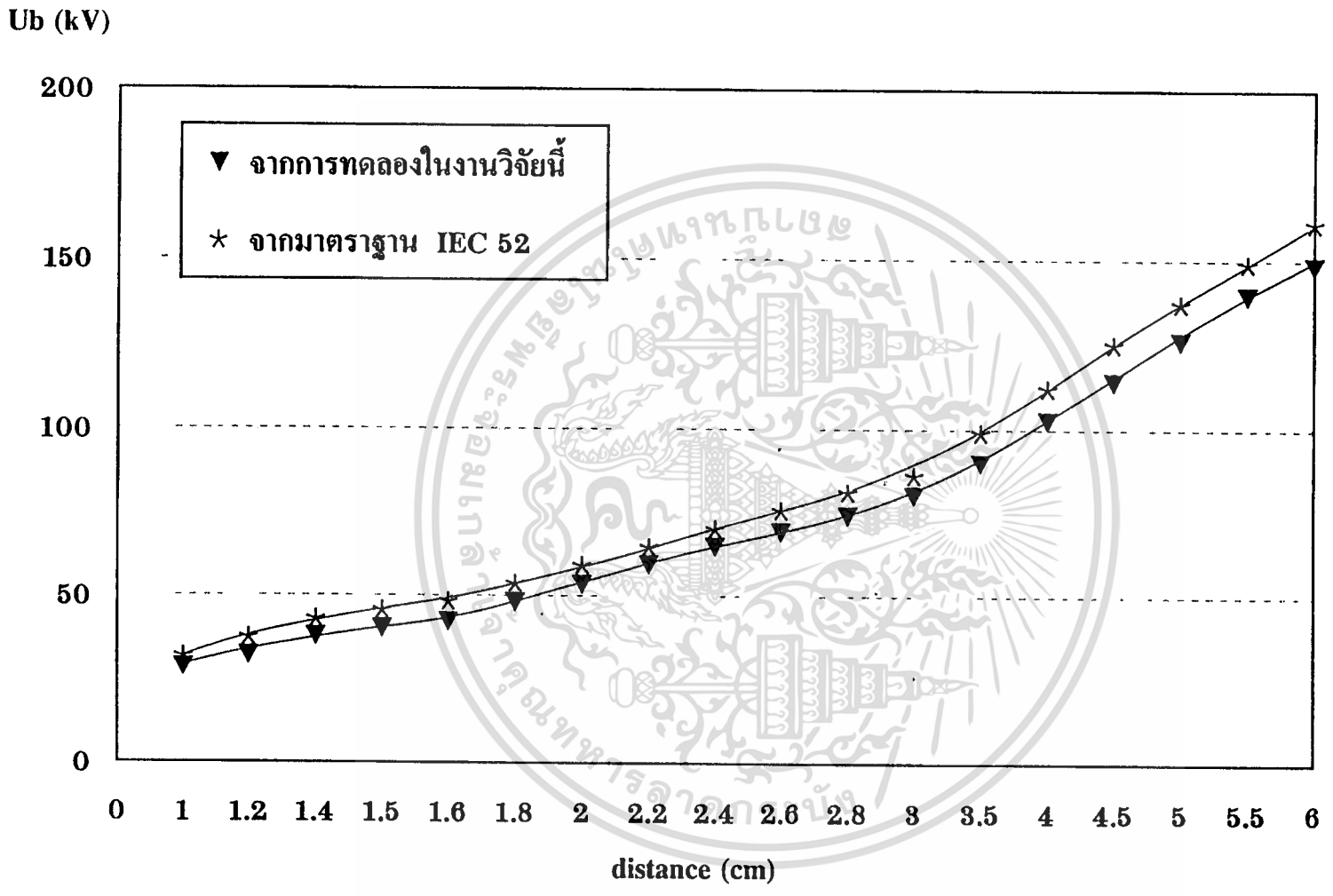
ตารางแสดงระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดที่เป็นทรงกลมกับแรงดันเบรคดาวน์ (เป็น kV) ตามมาตราฐาน IEC 52 ที่ความดันบรรยากาศ (1 atm) ที่อุณหภูมิ 20°C

d (cm)	1.0	1.2	1.4	1.5	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4
Ub (kV)	31.7	37.4	42.9	45.5	48.1	53.5	59.0	64.5	70.0

ตารางที่ 3.12 (ต่อ)

d (cm)	2.6	2.8	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
Ub (kV)	75.5	81.0	86.0	99.0	112	125	137	149	161

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ในอากาศที่ได้ในงานวิจัยนี้ กับแรงดันเบรคดาวน์ในอากาศตามมาตราฐาน IEC 52

บทที่ 4
การทดลองหาแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์และความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้น

4.1 การทดลองหาแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์

วิธีทำการทดลองเพื่อหาแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซชนิดต่าง ๆ นี้เราจะทำการทดลองโดย

1. จะสูบอากาศออกจากแชมเบอร์เป็นเวลา 40 นาที เพื่อให้ความดันอากาศภายในแชมเบอร์ลดลงเหลือ $5.8*10^{-1}$ mbar
2. เปิดชุด High Voltage ทิ้งไว้ 30 นาที เพื่อให้เสถียร
3. ตั้งระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดตามค่าที่ต้องการ
4. เติมก๊าซเข้าไปภายในแชมเบอร์ให้มีความดันตามต้องการ
5. แรงดันและกระแสขณะทำการทดลองจะถูกวัดโดย Galvanometer

ก๊าซที่ใช้ในการทดลองนี้ประกอบด้วยก๊าซฟรีออน ก๊าซไนโตรเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซฮีเลียม และก๊าซอาร์กอน

4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของก๊าซที่ใช้ในการทดลอง

ก๊าซฮีเลียมและก๊าซอาร์กอน เป็นก๊าซเฉื่อย (Inert gases) ตามตารางธาตุจะอยู่ในหมู่ที่ 8 คุณสมบัติของธาตุในหมู่นี้คือ จะมีการจัดเรียงตัวของอีเลคตรอนวงนอกสุดครบ 8 ตัว (ยกเว้นฮีเลียมมีอีเลคตรอนวงนอกสุดเพียง 2 ตัว) ซึ่งถือว่าเป็นสภาพที่อะตอมเสถียรและธาตุในหมู่นี้ยังเป็น Monoatomic ด้วยคือหนึ่งโมเลกุลจะประกอบด้วยหนึ่งอะตอมเท่านั้น (ธาตุในหมู่นี้ในสภาพปกติจะเป็นก๊าซ) ซึ่งผิดกับก๊าซชนิดอื่นที่เป็น Diatomic คือหนึ่งโมเลกุลจะประกอบด้วยอะตอมมากกว่าหนึ่งอะตอมก๊าซฮีเลียมและก๊าซอาร์กอนนี้เป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่เป็นพิษเป็นอโลหะ ในอากาศมีอยู่น้อยเป็นก๊าซที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีมาก

ก๊าซไนโตรเจนจะประกอบด้วยอะตอมของธาตุไนโตรเจนสองอะตอม มีการจัดเรียงตัวของอีเลคตรอนวงนอกสุดห้าตัว ตามตารางธาตุจะอยู่ในหมู่ที่ห้าเป็นก๊าซที่ ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่ติดไฟ ไม่เป็นพิษและไม่ระเบิด เป็นอโลหะ ในอากาศมีอยู่มากเป็นก๊าซที่ไม่ไวต่อปฏิกิริยาเคมีภายใต้สภาวะปกติ

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะอยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ ซึ่งจะประกอบด้วย คาร์บอนหนึ่งอะตอมและออกซิเจนสองอะตอมการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศจะทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิของบรรยากาศสูงขึ้นจนเกิดเป็นปรากฏการเรือนกระจก

ก๊าซฟรีออน จะอยู่ในรูปของสารประกอบคลอรีนเป็นสารประกอบที่เกิดจากคลอรีน ฟูลออรีน และคาร์บอน สารเหล่านี้จะทำให้เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นตัวทำลายชั้นบรรยากาศ ถ้าใช้มากเกินไปและก๊าซฟรีออนจะทำให้เกิดสารที่เป็นพิษเมื่อถูกเปลวไฟหรือสัมผัสกับผิวโลหะที่ร้อน

4.2 ความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้น

4.2.1 ความผิดพลาดเนื่องจากโวลเตจ

ในการทดลองนี้แรงดันเบรคดาวน์จะถูกวัดโดยใช้ Galvanometer ความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจะเกิดจากการเปลี่ยนย่านวัดขณะทำการทดลองเมื่อแรงดันเริ่มเกิดการเบรคดาวน์สูงขึ้นและอาจจากการรั่วไหลของกระแสระหว่าง High Voltage Bushing (Brass Tube) กับตัวถังของแชมเบอร์ถ้าความต้านทานระหว่าง High Voltage Bushing กับตัวถังมีค่าน้อยการรั่วไหลของกระแสก็จะมีค่ามาก แรงดันที่วัดได้ ก็จะมีค่าผิดพลาดมากขึ้นด้วย

4.2.2 ความผิดพลาดเนื่องจากความดัน

อัตราการรั่วและสิ่งเจือปนที่ปะปนอยู่ในแชมเบอร์จะเป็นข้อจำกัดที่สำคัญ ของระบบสุญญากาศภายในแชมเบอร์เพราะถ้าอัตราการรั่วและสิ่งเจือปนมีอยู่มากนั้นจะทำให้โรตารี่ปั๊ม (Rotary Pump) ปั๊มอากาศออกได้ที่ความดันไม่ต่ำมากนัก อัตราการรั่วจะมีผลต่อความดันคือ จะทำให้ความดันภายในไม่คงที่จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามอัตราการรั่ว ซึ่งจะทำให้ขณะที่ทดลองความดันจะไม่คงที่ทำให้เกิดความผิดพลาดเนื่องจากความดันที่ใช้ในขณะที่ทดลองขึ้นและเนื่องจากอากาศที่รั่วเข้าไปในแชมเบอร์นี้จะทำให้ก๊าซที่อยู่ภายในแชมเบอร์ปนกับอากาศทำให้ความบริสุทธิ์ของก๊าซลดน้อยลง ความผิดพลาดก็จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากความไม่บริสุทธิ์ของก๊าซดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องลดอัตราการรั่วลง โดยการซีลตามข้อต่อต่าง ๆ ให้ดี

4.2.3 ความผิดพลาดเนื่องจากการตั้งระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด

ระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดสามารถวัดและตั้งระยะห่างได้อย่างละเอียดและถูกต้อง โดยใช้เวอร์เนียร์ ซึ่งเวอร์เนียร์นี้จะถูกติดตั้งอยู่ที่ด้านล่างของแชมเปอร์ความผิดพลาดจากการตั้งระยะห่างหรือการวัดระยะห่างอาจเกิดขึ้นได้ ถ้าขาดทักษะในการวัดหรือการใช้เครื่องมือที่ไม่ถูกต้อง ระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดสามารถตั้งได้แคบสุด 1 มิลลิเมตร และตั้งได้กว้างสุด 4.00 เซนติเมตร

4.2.4 ความผิดพลาดเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้า

การออกแบบขั้วอิเลคโตรดให้มีรูปร่างลักษณะเป็นแบบ Rogowski สามารถลดความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าบริเวณขอบอิเลคโตรดลงไปได้ ดังนั้นจึงถือว่าบริเวณผิวหน้าของขั้วอิเลค-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โตรดทั้งสองนี้มีสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอและสาเหตุอีกประการหนึ่งที่จะทำให้สนามไฟฟ้าบริเวณผิวหน้าของอิเลคโตอาจจะไม่สม่ำเสมอ คือในการตั้งระยะห่างอิเลคโตรดต้องตั้งให้ตั้งฉากกันในทุก ๆ จุดของผิวของขั้วอิเลคโตรดทั้งสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดลองในก๊าซสามัญ

5.1 ผลการทดลองในก๊าซฟรีออน (CCl_2F_2)

จากผลการทดลองที่ได้ในการวัดแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ ในก๊าซฟรีออนที่ความดัน 100, 200 และ 300 torr และระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด 0.3 cm ถึง 3.9 cm อุณหภูมิขณะทำการทดลอง 31° C (อุณหภูมิของอากาศรอบ ๆ แชมเบอร์, อุณหภูมิห้อง) อัตราการรั่วขณะทำการทดลอง 2.7 torr ความดันอากาศภายในแชมเบอร์ก่อนเติมก๊าซ (ก๊าซที่ใช้ในการทดลอง) $5.8 * 10^{-1}$ mbar

ผลการทดลองที่ได้ ได้แสดงไว้ตามตารางที่ 5.1.1 เมื่อนำผลการทดลองที่ได้นี้ไปพล๊อตกราฟจะได้กราฟดังที่แสดงตามรูปที่ 5.1.1 และ 5.1.2 รูปที่ 5.1.1 เป็นกราฟแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ ที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างอีเลคโตรด (d) รูปที่ 5.1.2 เป็นกราฟแสดงแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ที่เป็นฟังก์ชันของผลคูณของความดันกับระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด (pd)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1.1

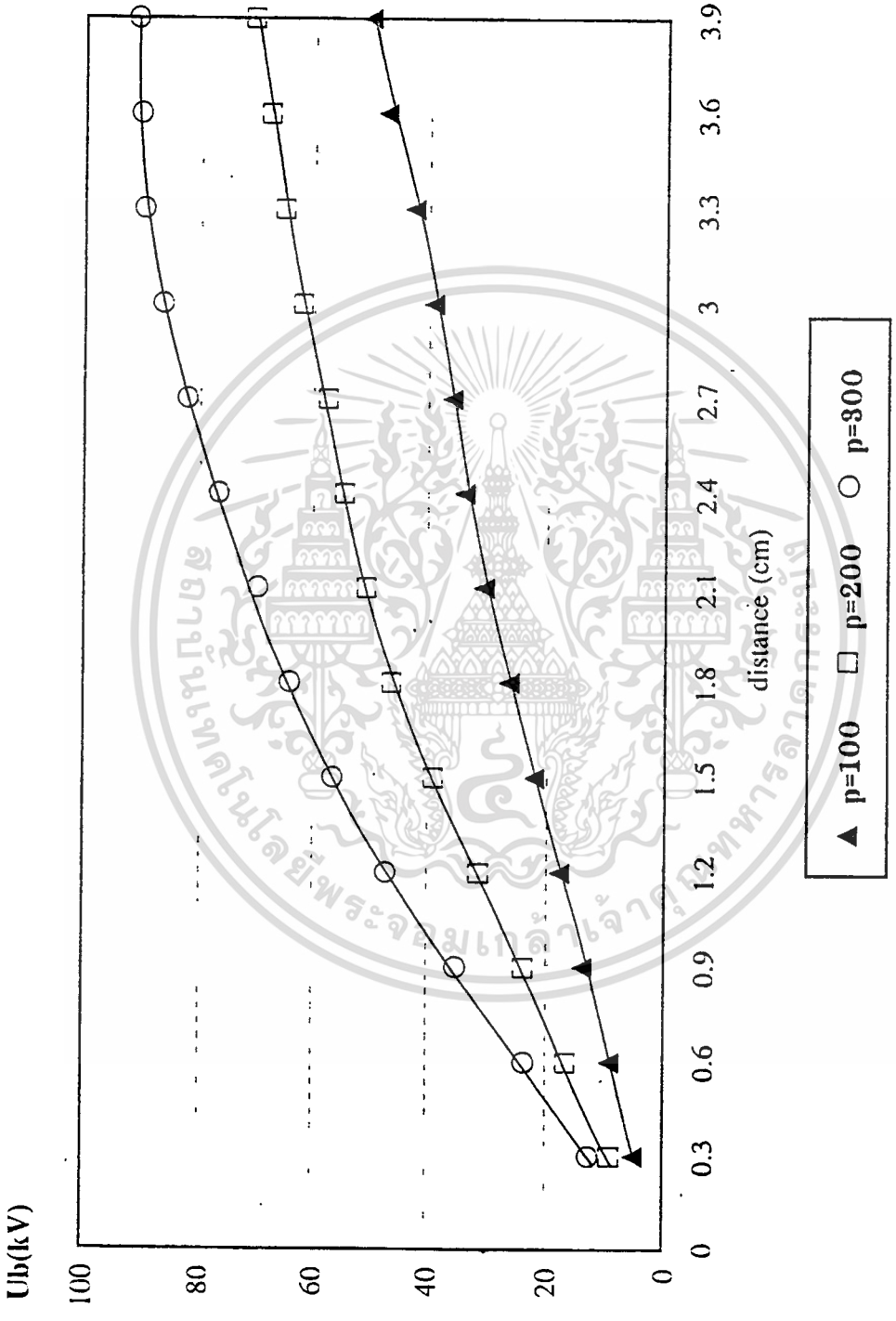
แสดงระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดกับแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ (เป็น kV)ที่วัดได้ใน ก๊าซฟรีออนที่ความดัน (เป็น Torr) ต่าง ๆ (อุณหภูมิขณะทำการทดลอง 31° C)

d (cm)	0.30	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80
P=100	5.10	9.15	13.80	17.76	22.20	26.40
P=200	9.00	16.56	23.85	31.35	39.00	46.20
P=300	12.60	23.70	35.10	47.10	56.55	64.14

ตารางที่ 5.1.1 (ต่อ)

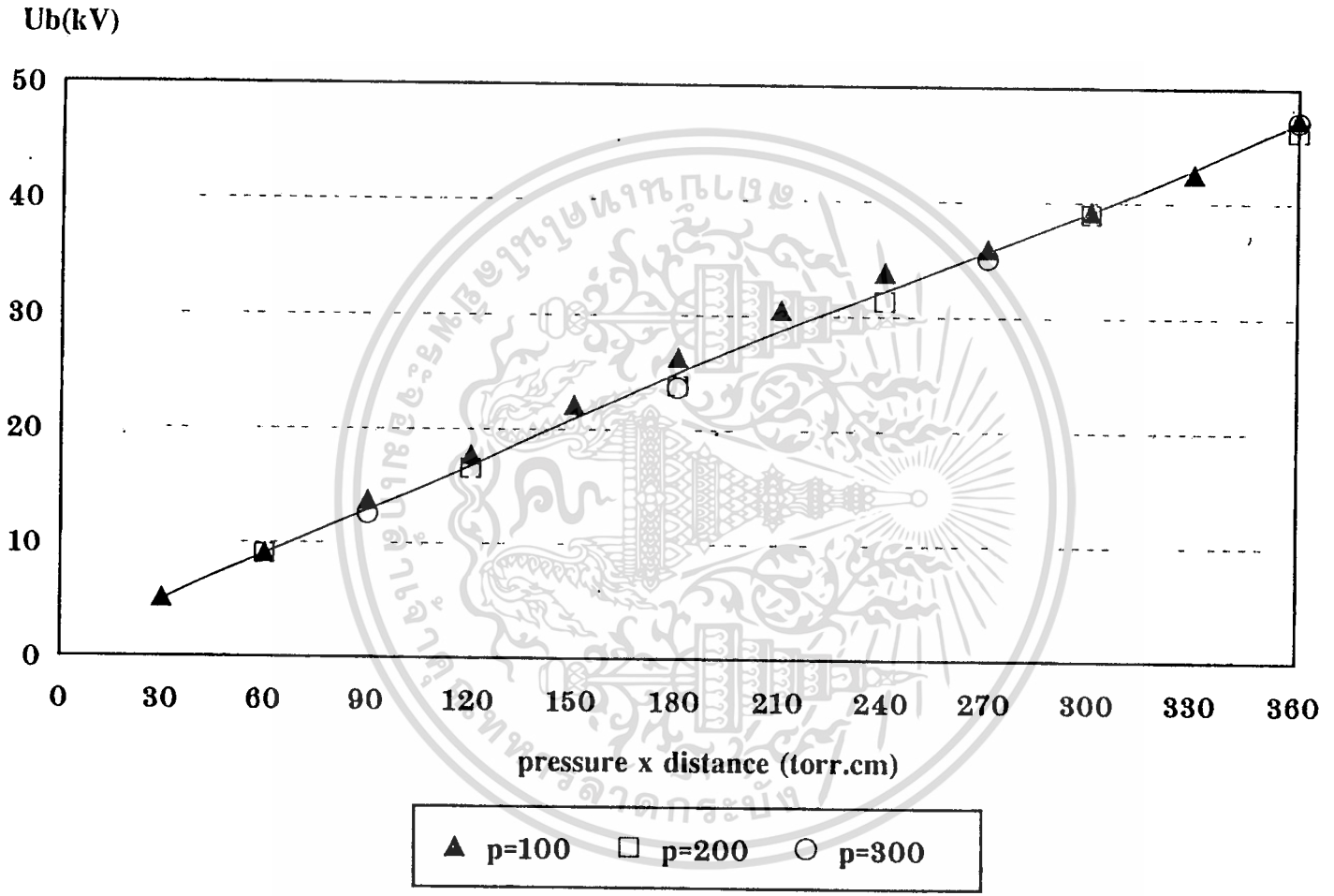
d (cm)	2.10	2.40	2.70	3.00	3.30	3.60	3.90
P=100	30.60	33.90	36.00	39.30	42.60	47.40	50.40
P=200	50.70	54.60	57.60	62.10	65.25	67.80	70.65
P=300	69.75	76.65	82.35	86.70	90.00	90.60	91.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1.1 กราฟแสดงแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด (d) ของก๊าซฟรีออนที่อุณหภูมิ 81 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1.2 กราฟแสดงแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ที่เป็นฟังก์ชันของผลคูณของความดันกับระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด (pd) ของก๊าซฟรีออนที่อุณหภูมิ 31°C

5.2 ผลการทดลองในก๊าซไนโตรเจน (N_2)

จากผลการทดลองที่ได้ในการวัดแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ ในก๊าซไนโตรเจนที่ความดัน 100, 200 และ 300 torr และระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด 0.3 cm ถึง 3.9 cm อุณหภูมิขณะทำการทดลอง 27° C (อุณหภูมิของอากาศรอบ ๆ แชมเบอร์, อุณหภูมิห้อง) ความบริสุทธิ์ของก๊าซไนโตรเจนที่ใช้ 99.99 % อัตราการรั่วขณะทำการทดลอง 2.7 torr ความดันอากาศภายในแชมเบอร์ก่อนเติมก๊าซ (ก๊าซที่ใช้ในการทดลอง) $5.8 * 10^{-1}$ mbar

ผลการทดลองที่ได้ ได้แสดงไว้ตามตารางที่ 5.2.1 เมื่อนำผลการทดลองที่ได้นี้ไปพล๊อตกราฟจะได้กราฟดังที่แสดงตามรูปที่ 5.2.1 และ 5.2.2 รูปที่ 5.2.1 เป็นกราฟแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด (d) รูปที่ 5.2.2 เป็นกราฟแสดงแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ที่เป็นฟังก์ชันของผลคูณของความดันกับระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด (pd)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2.1

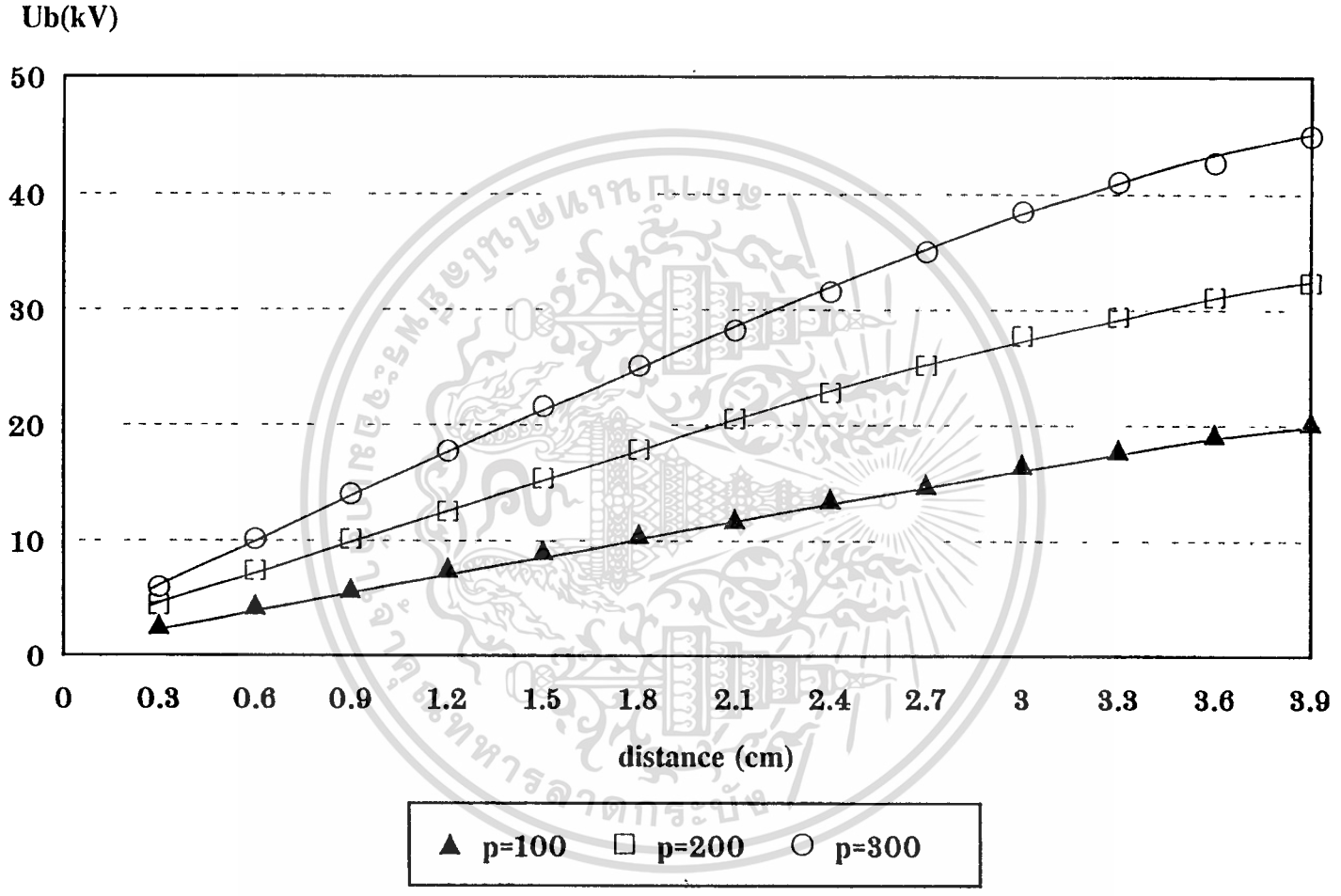
แสดงระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดกับแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์(เป็น kV)ที่วัดได้ในก๊าซไนโตรเจนที่ความดัน (เป็น Torr) ต่าง ๆ (อุณหภูมิขณะทำการทดลอง 27° C)

d (cm)	0.30	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80
P=100	2.70	4.44	5.88	7.69	9.24	10.65
P=200	4.38	7.38	10.14	12.54	15.42	17.88
P=300	5.94	10.14	14.04	17.76	21.60	25.14

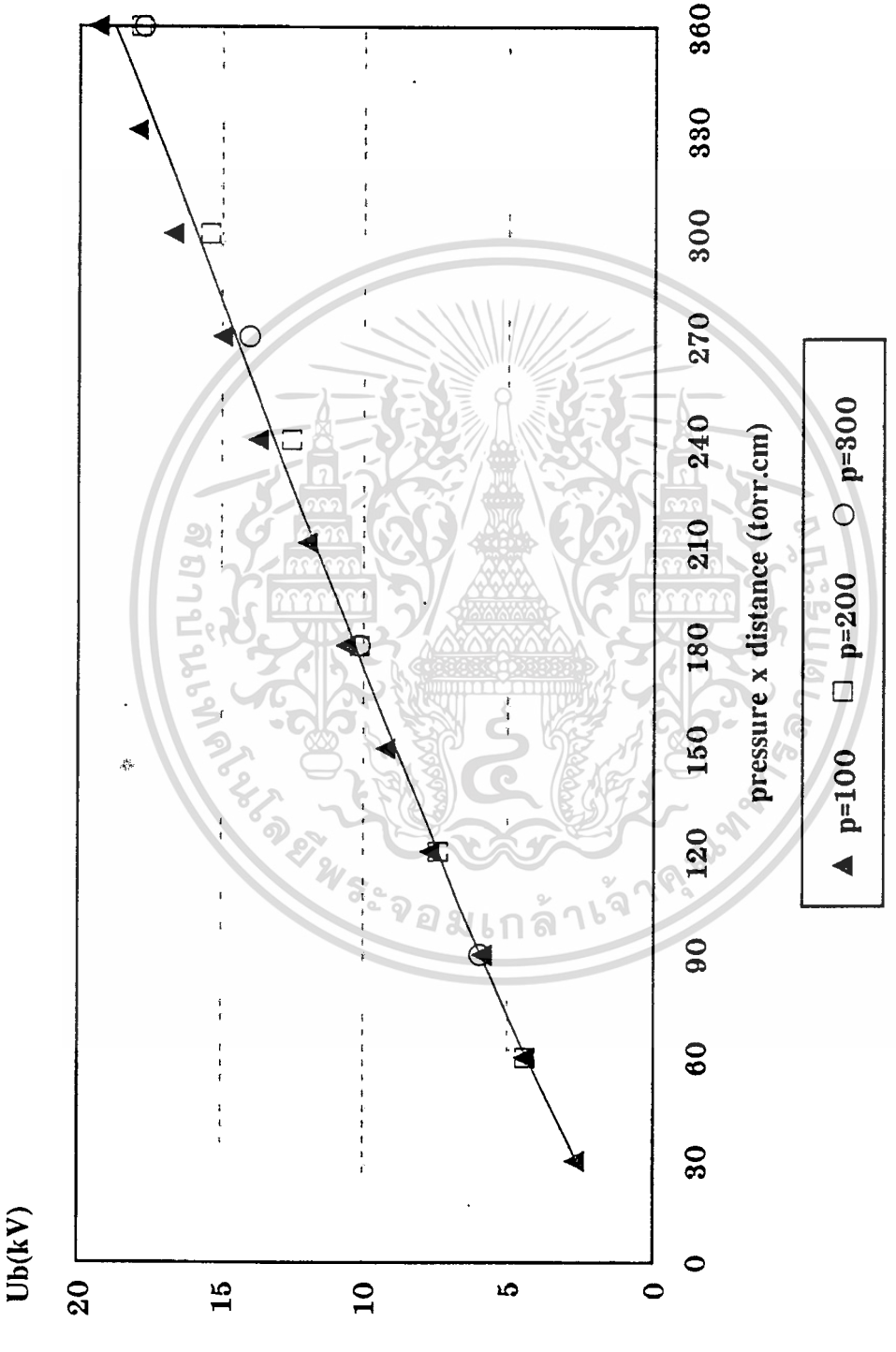
ตารางที่ 5.2.1 (ต่อ)

d (cm)	2.10	2.40	2.70	3.00	3.30	3.60	3.90
P=100	12.00	13.74	15.00	16.74	18.00	19.38	20.40
P=200	20.55	22.80	25.20	27.75	29.40	31.14	32.40
P=300	28.20	31.59	35.10	38.55	41.10	42.75	45.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2.1 กราฟแสดงแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด (d) ของก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 27°C



รูปที่ 5.2.2 กราฟแสดงแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ที่เป็นฟังก์ชันของผลคูณของความดันกับระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด (pd) ของก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 27°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ผลการทดลองในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)

จากผลการทดลองที่ได้ในการวัดแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซคาร์ไดออกไซด์ที่ความดัน 100, 200 และ 300 torr และระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด 0.3 cm ถึง 3.9 cm อุณหภูมิขณะทำการทดลอง 29° C (อุณหภูมิของอากาศรอบ ๆ แชมเบอร์, อุณหภูมิห้อง) ความบริสุทธิ์ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ใช้ 99.8 % อัตราการรั่วขณะทำการทดลอง 2.7 torr ความดันอากาศภายในแชมเบอร์ก่อนเติมก๊าซ (ก๊าซที่ใช้ในการทดลอง) $5.8*10^{-1}$ mbar

ผลการทดลองที่ได้ ได้แสดงไว้ตามตารางที่ 5.3.1 เมื่อนำผลการทดลองที่ได้นี้ไปพล๊อตกราฟจะได้กราฟดังที่แสดงตามรูปที่ 5.3.1 และ 5.3.2 รูปที่ 5.3.1 เป็นกราฟแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ ที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด (d) รูปที่ 5.3.2 เป็นกราฟแสดงแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ที่เป็นฟังก์ชันของผลคูณของความดันกับระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด (pd)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3.1

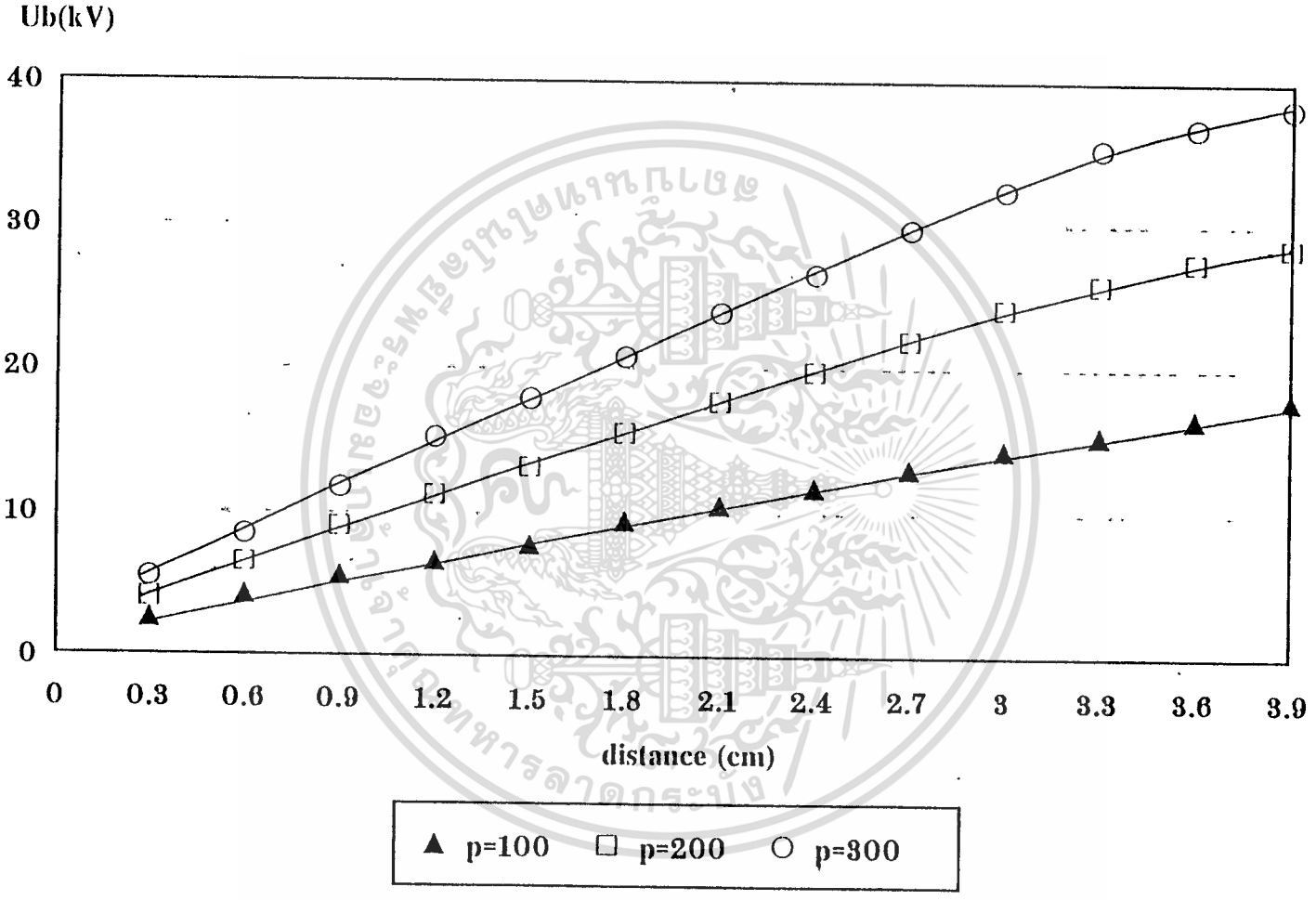
แสดงระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดกับแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ (เป็น kV) ที่วัดได้ในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน (เป็น Torr) ต่าง ๆ (อุณหภูมิขณะทำการทดลอง 29° C)

d (cm)	0.30	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80
P=100	2.55	4.20	5.55	6.60	7.80	9.48
P=200	3.99	6.48	9.06	11.28	13.26	15.63
P=300	5.40	8.64	11.76	15.30	17.94	20.79

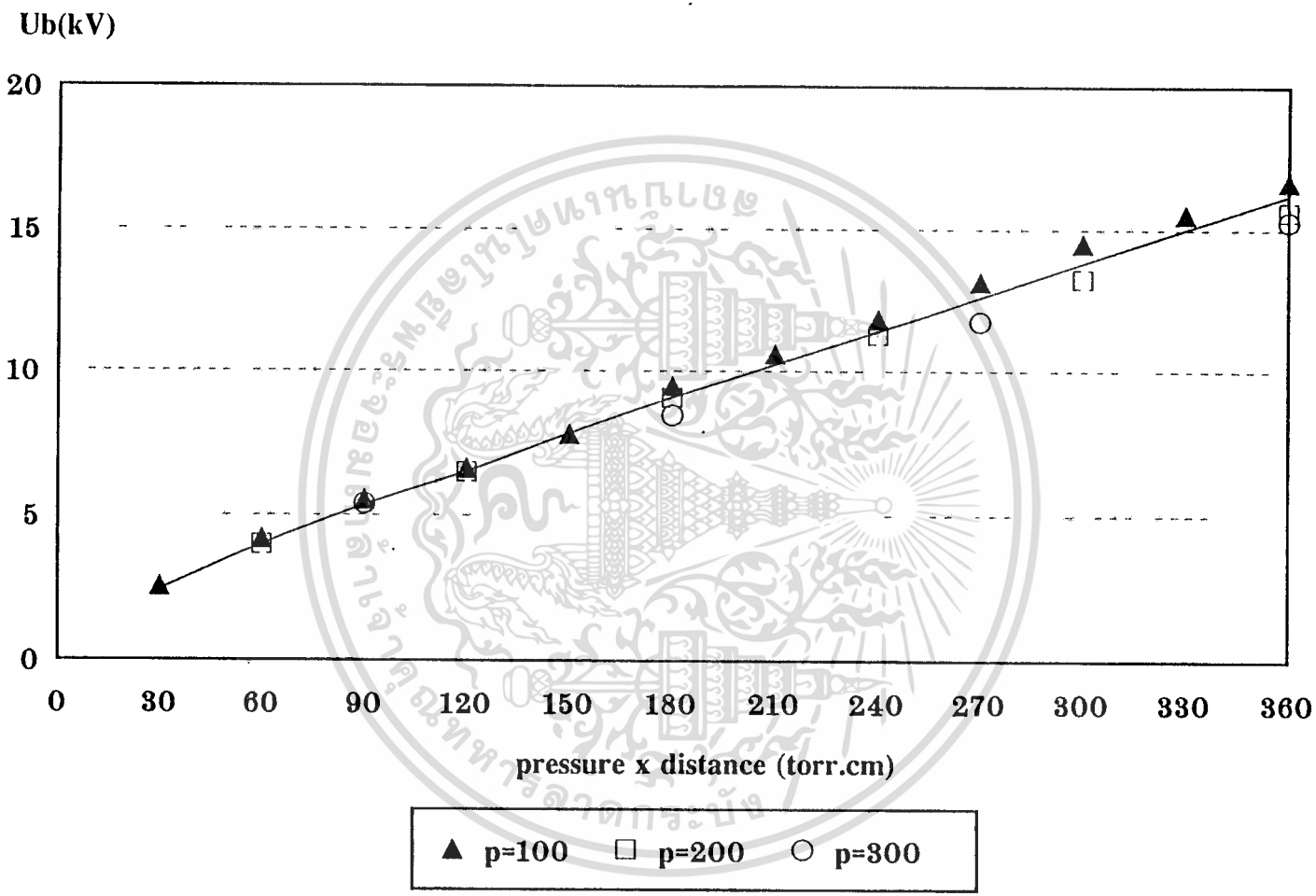
ตารางที่ 5.3.1 (ต่อ)

d (cm)	2.10	2.40	2.70	3.00	3.30	3.60	3.90
P=100	10.62	11.85	13.17	14.52	15.54	16.71	18.00
P=200	17.76	19.80	21.96	24.18	25.86	27.45	28.50
P=300	23.85	26.52	29.70	32.46	35.40	36.90	38.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3.1 กราฟแสดงแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรกดาวน์ที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด (d) ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 29°C



รูปที่ 5.3.2 กราฟแสดงแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ที่เป็นฟังก์ชันของผลคูณของความดันกับระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด (pd) ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 29°C

5.4 ผลการทดลองในก๊าซอีเลียม (He)

จากผลการทดลองที่ได้ ในการวัดแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซฮีเลียมที่ความดัน 100, 200 และ 300 torr และระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด 0.3 cm ถึง 3.9 cm อุณหภูมิขณะทำการทดลอง 30.5° C (อุณหภูมิของอากาศรอบ ๆ แชมเบอร์, อุณหภูมิห้อง) ความบริสุทธิ์ของก๊าซฮีเลียม 99.99 % อัตราการรั่วขณะทำการทดลอง 2.7 torr ความดันอากาศภายในแชมเบอร์ก่อนเติมก๊าซ (ก๊าซที่ใช้ในการทดลอง) $5.8 * 10^{-1}$ mbar

ผลการทดลองที่ได้ ได้แสดงไว้ตามตารางที่ 5.4.1 เมื่อนำผลการทดลองที่ได้นี้ไปพล๊อตกราฟจะได้กราฟดังที่แสดงตามรูปที่ 5.4.1 และ 5.4.2 รูปที่ 5.4.1 เป็นกราฟแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ ที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด (d) รูปที่ 5.4.2 เป็นกราฟแสดงแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ที่เป็นฟังก์ชันของผลคูณของความดันกับระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด (pd)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.4.1

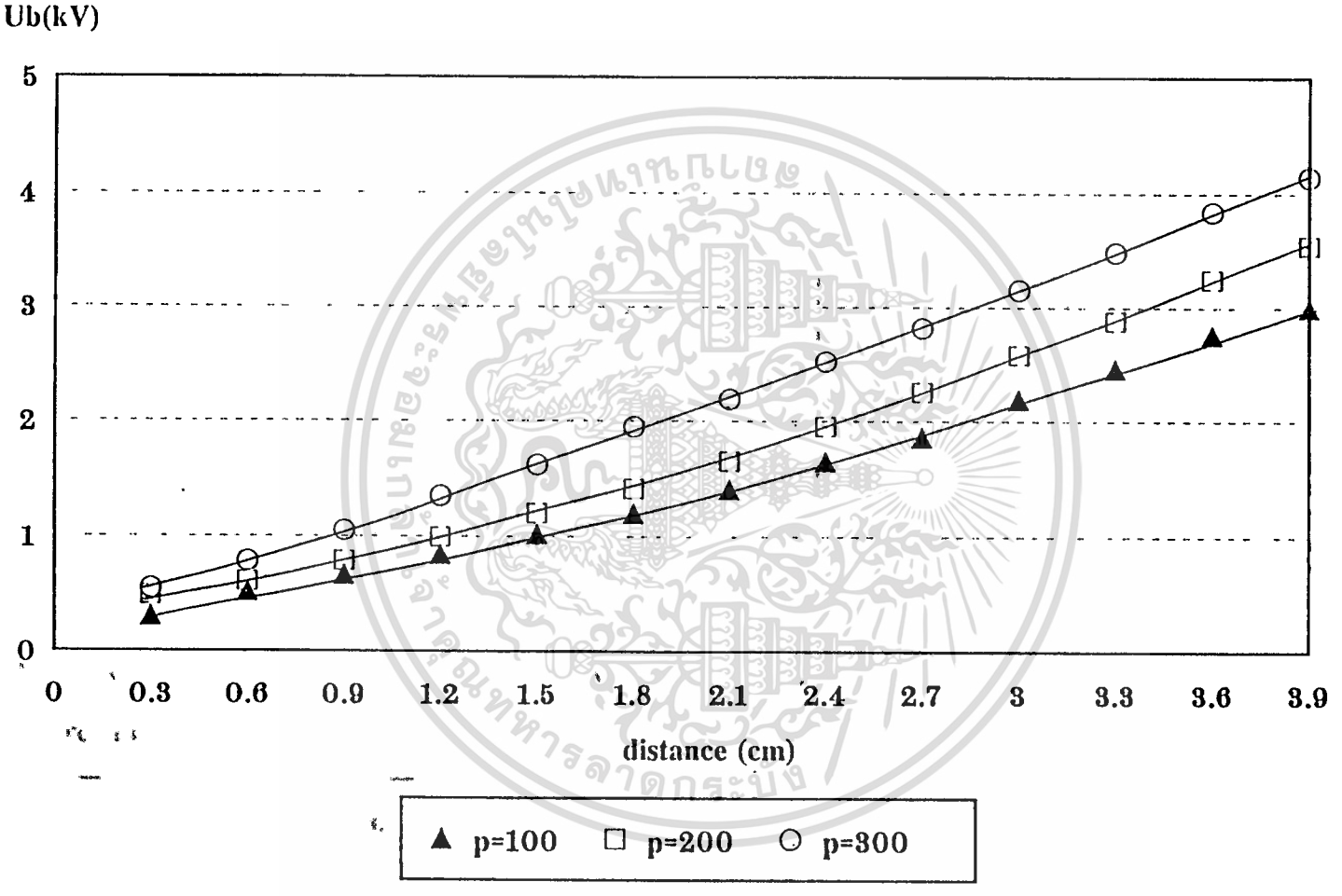
แสดงระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดกับแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ (เป็น kV) ที่วัดได้ในก๊าซฮีเลียมที่ความดัน (เป็น Torr) ต่าง ๆ (อุณหภูมิขณะทำการทดลอง 30.5° C)

d (cm)	0.30	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80
P=100	0.30	0.51	0.66	0.84	1.02	1.20
P=200	0.48	0.60	0.78	0.99	1.20	1.41
P=300	0.54	0.78	1.05	1.35	1.62	1.95

ตารางที่ 5.4.1 (ต่อ)

d (cm)	2.10	2.40	2.70	3.00	3.30	3.60	3.90
P=100	1.41	1.65	1.86	2.19	2.46	2.76	3.00
P=200	1.65	1.95	2.25	2.58	2.88	3.24	3.54
P=300	2.19	2.52	2.82	3.15	3.48	3.84	4.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4.1 กราฟแสดงแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด (d) ของก๊าซฮีเลียมที่อุณหภูมิ 30.5°C

5.5 ผลการทดลองในก๊าซอาร์กอน (Ar)

จากผลการทดลองที่ได้ ในการวัดแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซอาร์กอนที่ความดัน 100,200 และ 300 torr และระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด 0.3 cm ถึง 3.9cm อุณหภูมิขณะทำการทดลอง 27° C (อุณหภูมิของอากาศรอบ ๆ แชมเบอร์, อุณหภูมิห้อง) ความบริสุทธิ์ของก๊าซอาร์กอนที่ใช้ 99.993 % อัตราการรั่วขณะทำการทดลอง 2.7 torr ความดันอากาศภายในแชมเบอร์ก่อนเติมก๊าซ (ก๊าซที่ใช้ในการทดลอง) $5.8 * 10^{-1}$ mbar

ผลการทดลองที่ได้ ได้แสดงไว้ตามตารางที่ 5.5.1 เมื่อนำผลการทดลองที่ได้นี้ไปพล๊อตกราฟจะได้กราฟดังที่แสดงตามรูปที่ 5.5.1 และ 5.5.2 รูปที่ 5.5.1 เป็นกราฟแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรค-ดาวน์ที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด (d) รูปที่ 5.5.2 เป็นกราฟแสดงแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ที่เป็นฟังก์ชันของผลคูณของความดันกับระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด (pd)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.5.1

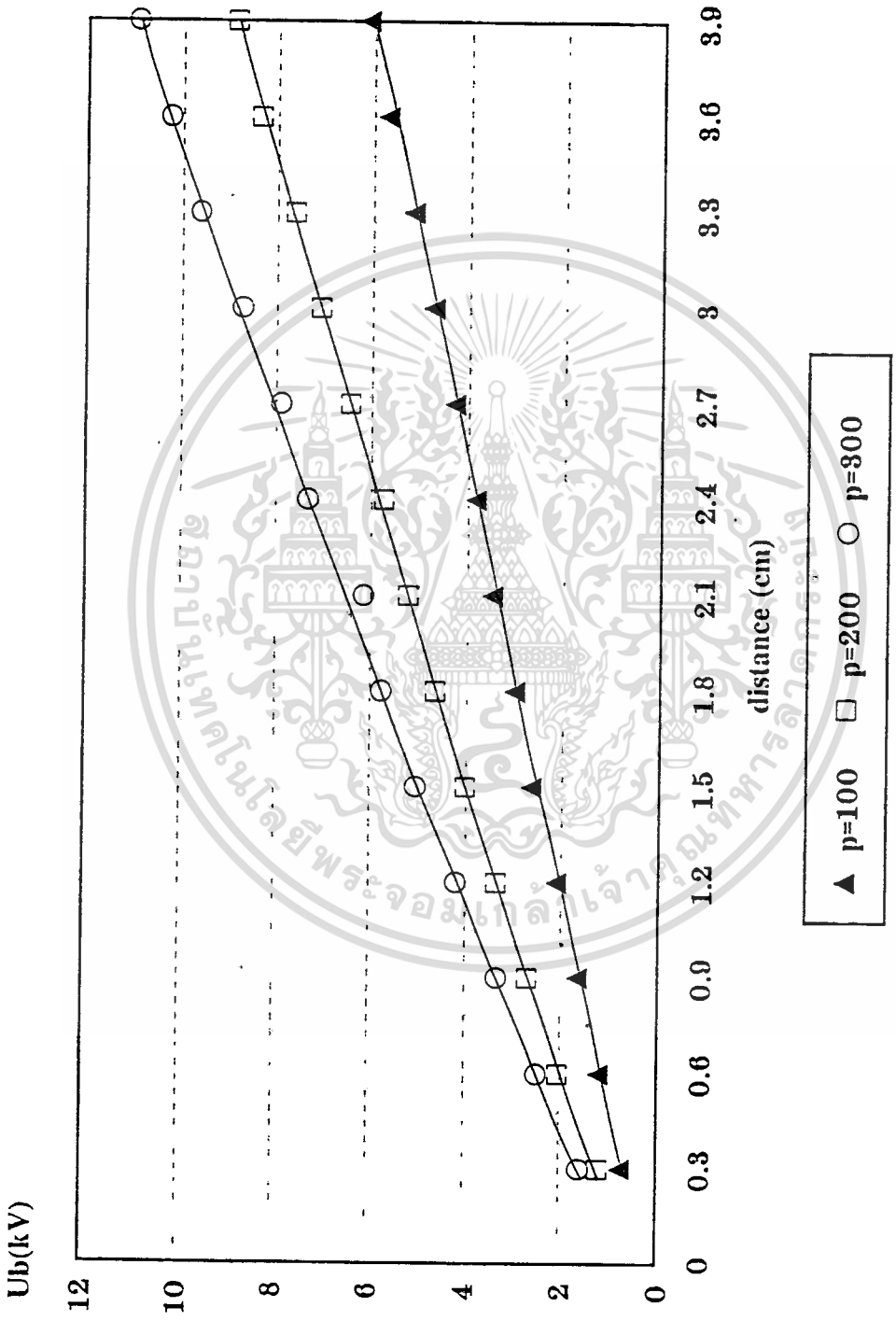
แสดงระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดกับแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ (เป็น kV) ที่วัดได้ในก๊าซอาร์กอนที่ความดัน (เป็น Torr) ต่าง ๆ (อุณหภูมิขณะทำการทดลอง 27° C)

d (cm)	0.30	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80
P=100	0.75	1.20	1.65	2.10	2.64	3.00
P=200	1.20	2.04	2.70	3.36	4.02	4.65
P=300	1.59	2.49	3.33	4.20	5.04	5.76

ตารางที่ 5.5.1 (ต่อ)

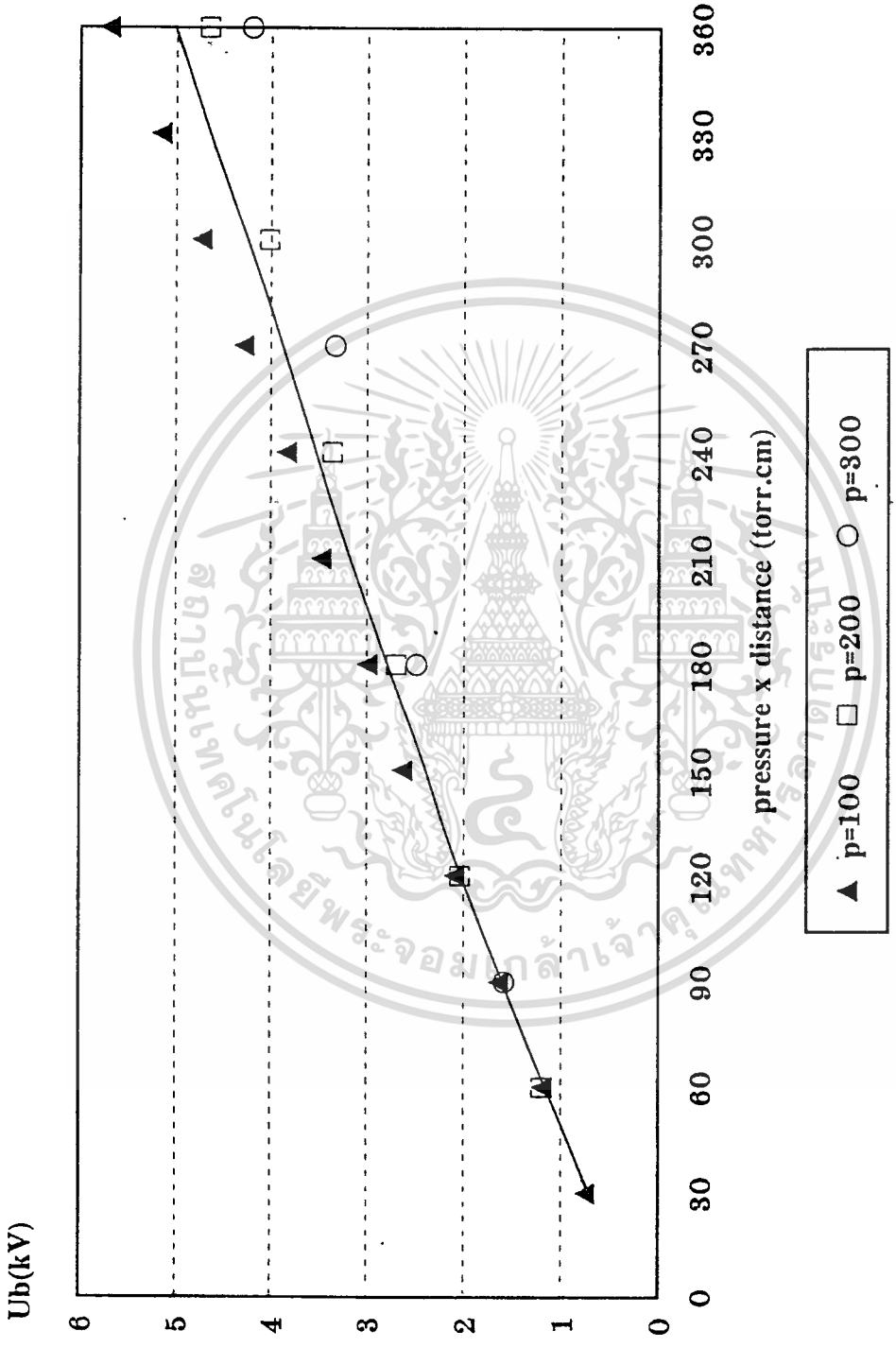
d (cm)	2.10	2.40	2.70	3.00	3.30	3.60	3.90
P=100	3.48	3.84	4.29	4.74	5.16	5.70	6.12
P=200	5.22	5.73	6.45	7.08	7.62	8.34	8.85
P=300	6.15	7.32	7.89	8.70	9.60	10.26	10.95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5.1 กราฟแสดงแรงดันเริ่มเกิดการเบรคดาวน์ที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด (d) ของก๊าซอาร์กอนที่อุณหภูมิ 27 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5.2 กราฟแสดงแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ที่เป็นฟังก์ชันของผลคูณของความดันกับระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด (pd) ของก๊าซอาร์กอนที่อุณหภูมิ 27 ^{o}C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6 การเปรียบเทียบผลการทดลองในก๊าซสามัญกับผลการทดลองในอากาศ

เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ในก๊าซสามัญมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้ในอากาศเพื่อศึกษาดูว่าคุณสมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้าของก๊าซสามัญเมื่อเทียบกับอากาศ จะมีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนไฟฟ้าที่สูงกว่าหรือต่ำกว่าอากาศ ตารางที่ 5.6.1 จะแสดงระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดกับแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ (เป็น kV) ที่วัดได้ในอากาศที่ความดัน(p) ต่าง ๆ

ตารางที่ 5.6.1

แสดงระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดกับแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ (เป็น kV) ที่วัดได้ในอากาศที่ความดัน (เป็น Torr) ต่าง ๆ (อุณหภูมิขณะทำการทดลอง 30° C)

d (cm)	0.30	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80
P=100	2.28	3.93	5.52	7.08	8.52	9.93
P=200	3.93	6.90	9.45	12.30	14.76	17.10
P=300	5.43	9.45	13.20	16.98	20.94	24.48

ตารางที่ 5.6.1 (ต่อ)

d (cm)	2.10	2.40	2.70	3.00	3.30	3.60	3.90
P=100	11.52	12.90	14.40	15.90	17.19	18.24	19.20
P=200	19.80	22.41	24.99	27.24	28.80	30.06	30.51
P=300	27.30	30.78	34.35	36.60	38.34	40.20	43.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการเปรียบเทียบนี้จะเปรียบเทียบที่ความดัน (p) เท่ากับ 100 Torr และระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด (d) เท่ากับ 1.80 และ 3.00 cm ตามตารางที่ 5.6.2

ตารางที่ 5.6.2

ตารางแสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของก๊าซสามัญกับผลการทดลองของอากาศที่ความดันเท่ากับ 100 Torr และระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดเท่ากับ 1.80 และ 3.00 cm.

ระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด (cm)	1.80	3.00
แรงดันเบรคดาวน์ (kV) ในก๊าซฟรีออน	26.40	39.30
แรงดันเบรคดาวน์ (kV) ในก๊าซไนโตรเจน	0.65	16.74
แรงดันเบรคดาวน์ (kV) ในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	9.48	14.52
แรงดันเบรคดาวน์ (kV) ในก๊าซฮีเลียม	1.20	2.19
แรงดันเบรคดาวน์ (kV) ในก๊าซอาร์กอน	3.00	4.74
แรงดันเบรคดาวน์ (kV) ในอากาศ	9.93	15.90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 5.6.2 จะเห็นได้ว่าที่ระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดเท่ากับ 1.80 และ 3.00 cm แรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซชนิดต่าง ๆ นั้นจะแตกต่างกันดังนี้

แรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซฟรีออนจะเท่ากับ 26.40 และ 39.30 kV ตามลำดับ

แรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซไนโตรเจนจะเท่ากับ 10.65 และ 16.74 kV ตามลำดับ

แรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเท่ากับ 9.48 และ 14.52 kV ตามลำดับ

แรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซฮีเลียมจะเท่ากับ 1.20 และ 2.19 kV ตามลำดับ

แรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซอาร์กอนจะเท่ากับ 3.00 และ 4.74 kV ตามลำดับ

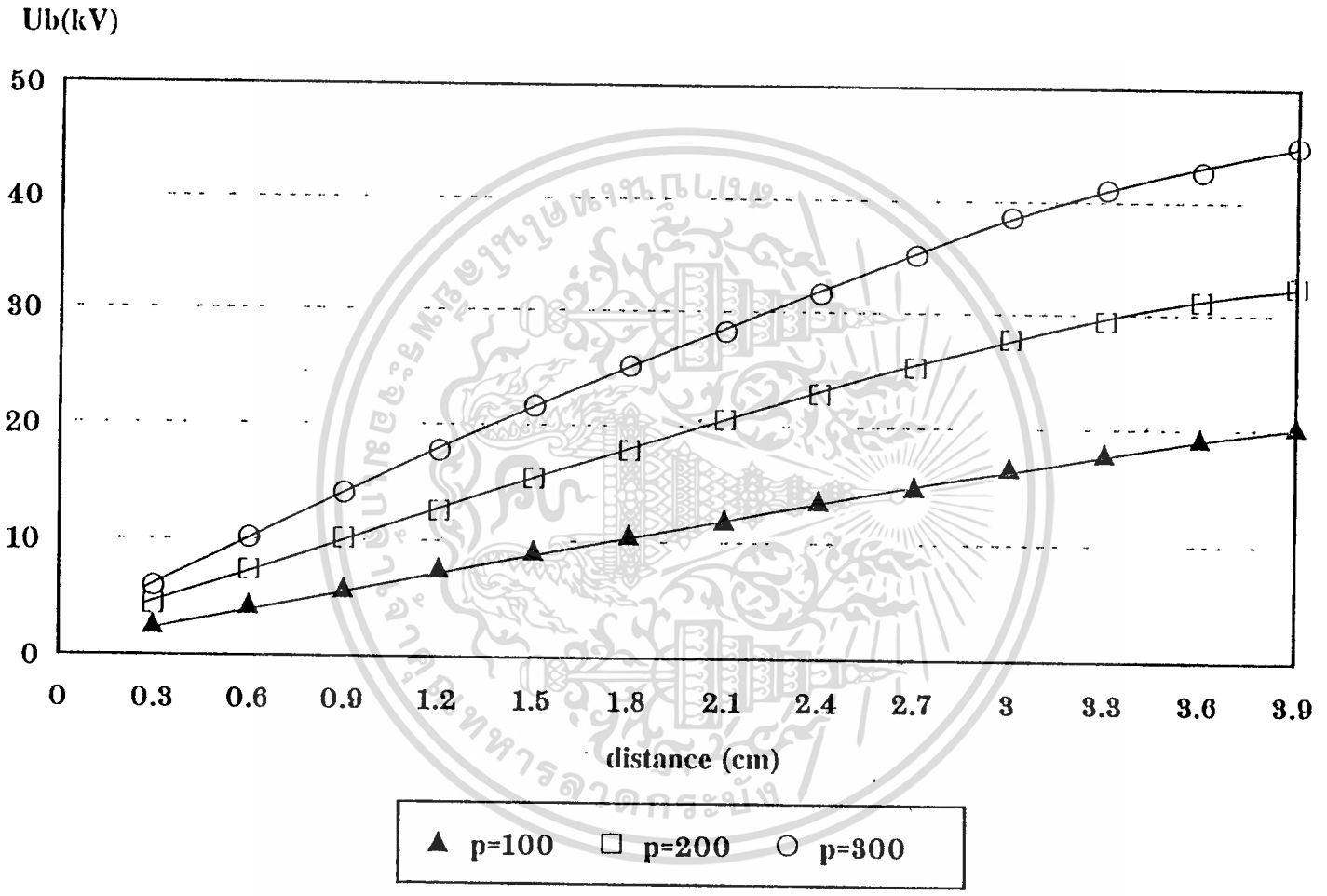
แรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ในอากาศจะเท่ากับ 9.93 และ 15.90 kV ตามลำดับ

จะเห็นได้ว่าที่ระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดเท่ากันแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ในอากาศจะสูงกว่าในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซฮีเลียม และก๊าซอาร์กอน แต่จะต่ำกว่าก๊าซฟรีออนและก๊าซไนโตรเจน ดังนั้นอากาศจึงมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีกว่า ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซฮีเลียม และก๊าซอาร์กอน แต่จะมีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ต่ำกว่าก๊าซฟรีออนและก๊าซไนโตรเจน

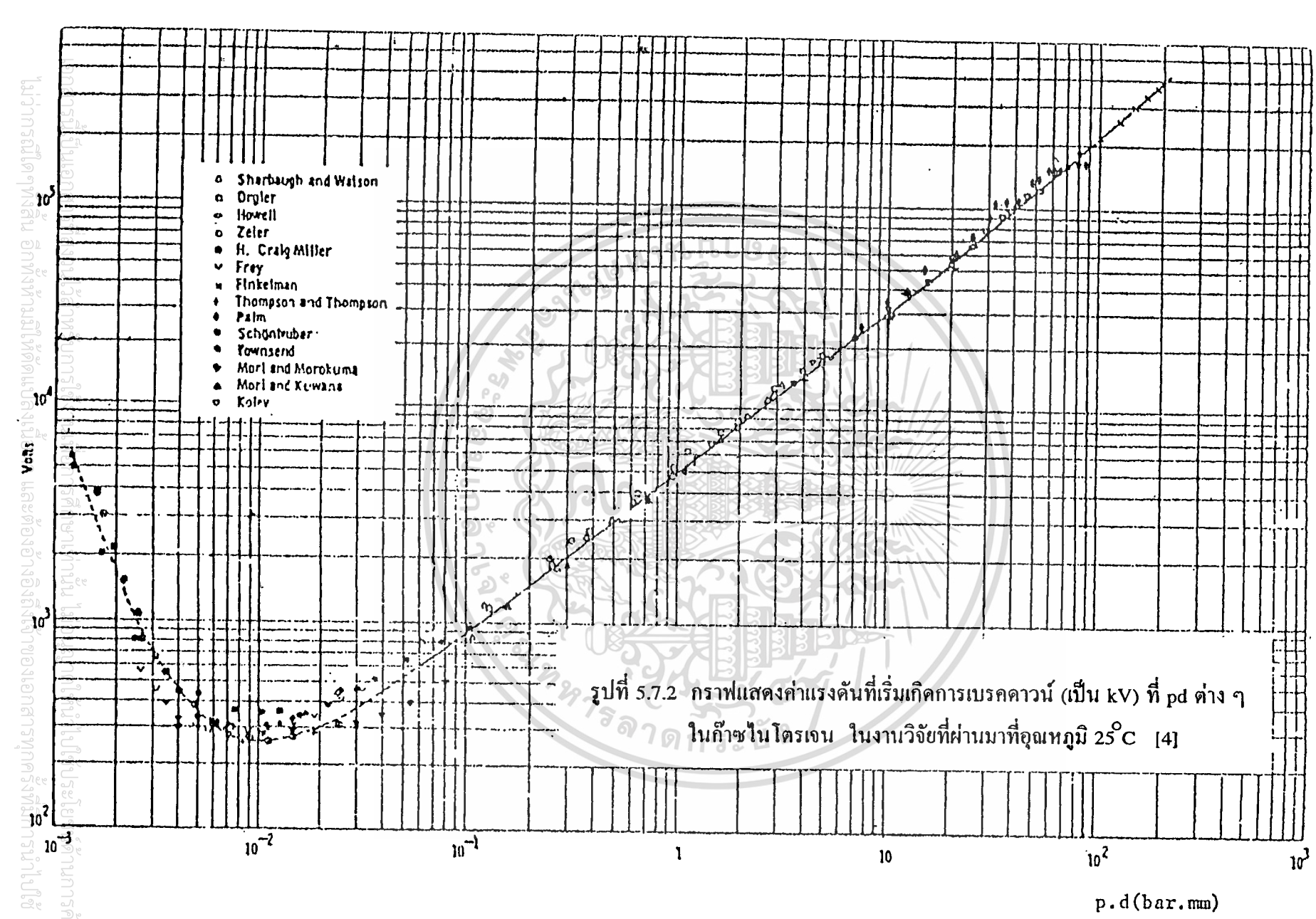
5.7 การเปรียบเทียบผลการทดลองในก๊าซไนโตรเจนกับผลการทดลองที่ผ่านมา

ผลที่ได้จากการวัดแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซไนโตรเจนที่ pd ต่าง ๆ กัน (สำหรับในก๊าซฟรีออน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซฮีเลียม ก๊าซอาร์กอน ไม่สามารถหาผลการทดลองที่ผ่านมาได้จึงไม่มีการเปรียบเทียบ) เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ผ่านมาจะมีค่าที่ใกล้เคียงกันดังแสดงตามรูปที่ 5.7.1 และรูปที่ 5.7.2 รูปที่ 5.7.1 เป็นกราฟแสดงแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ (kV) ที่ pd ต่าง ๆ กันที่ได้จากการทดลองในงานวิจัยนี้ รูปที่ 5.7.2 เป็นกราฟแสดงแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ที่ pd ต่าง ๆ กันที่ได้จากการทดลองที่ผ่านมา[4] (ในการเปรียบเทียบกันนี้จะแปลงหน่วยจาก bar.mm ในงานวิจัยที่ผ่านมาให้เป็น Torr.cm โดยคูณด้วย 75 แล้วจึงอ่านค่าแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์จากกราฟ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7.1 กราฟแสดงแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด (d) ของก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 27°C



รูปที่ 5.7.2 กราฟแสดงค่าแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ (เป็น kV) ที่ pd ต่าง ๆ ในก๊าซไนโตรเจน ในงานวิจัยที่ผ่านมาที่อุณหภูมิ 25°C [4]

จากกราฟรูปที่ 5.7.1 ที่ pd เท่ากับ 60 , 180 และ 360 Torr.cm ค่าแรงดันเบรคดาวน์ที่ได้ในงานวิจัยนี้จะเท่ากับ 4.41 , 10.31 และ 18.34 kV ตามลำดับ และจากกราฟรูปที่ 5.7.2 ที่ pd เท่ากับ 60 , 180 และ 360 Torr.cm ค่าแรงดันเบรคดาวน์ที่อ่านได้จากกราฟโดยประมาณจะเท่ากับ 4.30 , 10.00 และ 17.50 kV ตามลำดับ (หมายเหตุที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 - 4°C จะทำให้แรงดันเบรคดาวน์สูงขึ้นเพียงเล็กน้อย) และเมื่อนำค่าแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ที่ pd ต่าง ๆ กันนี้มาเขียนเป็นตารางจะได้ตามที่ 5.7.1

ตารางที่ 5.7.1

ตารางแสดงการเปรียบเทียบแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซไนโตรเจน* ที่ได้ในงานวิจัยนี้กับในงานวิจัยที่ผ่านมาที่ pd เท่ากับ 60, 180, 360 Torr.cm

pd (Torr.cm)	60	180	240
แรงดันเบรคดาวน์ในก๊าซไนโตรเจน ที่วัดได้ในงานวิจัยนี้	4.41	10.31	18.34
แรงดันเบรคดาวน์ในก๊าซไนโตรเจน ที่วัดได้ในงานวิจัยที่ผ่านมา **	4.30	10.00	17.50

* เป็นค่าเฉลี่ยของแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ที่ pd เท่ากัน

** เป็นค่าโดยประมาณที่ได้จากการอ่านกราฟ [4]

จากตารางที่ 5.7.1 จะเห็นได้ว่าที่ pd เท่ากันแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์จะมีค่าใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.8 การเปรียบเทียบผลการทดลองและผลการคำนวณในการก๊าซฮีเลียม

เมื่อนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณ(สูตรที่ใช้ในการคำนวณจะใช้สูตรตามสมการที่ 3.4) ที่ความดัน 100, 200 และ 300 Torr และมีระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดจาก 0.3 ถึง 3.9 cm ซึ่งค่าที่ได้จากการคำนวณได้แสดงไว้ตามตารางที่ 5.8.1 และเมื่อนำค่าที่ได้จากการคำนวณนี้ไปพล๊อตกราฟเพื่อเปรียบเทียบกับกราฟที่ได้จากการทดลอง จะได้กราฟตามรูปที่ 5.8.2 จากกราฟจะเห็นได้ว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกัน (สำหรับในก๊าซที่ใช้ในการทดลองชนิดอื่น ไม่สามารถหาค่าของแกมม่า(Γ) ได้จึงไม่มีการเปรียบเทียบ)

ตารางที่ 5.8.1

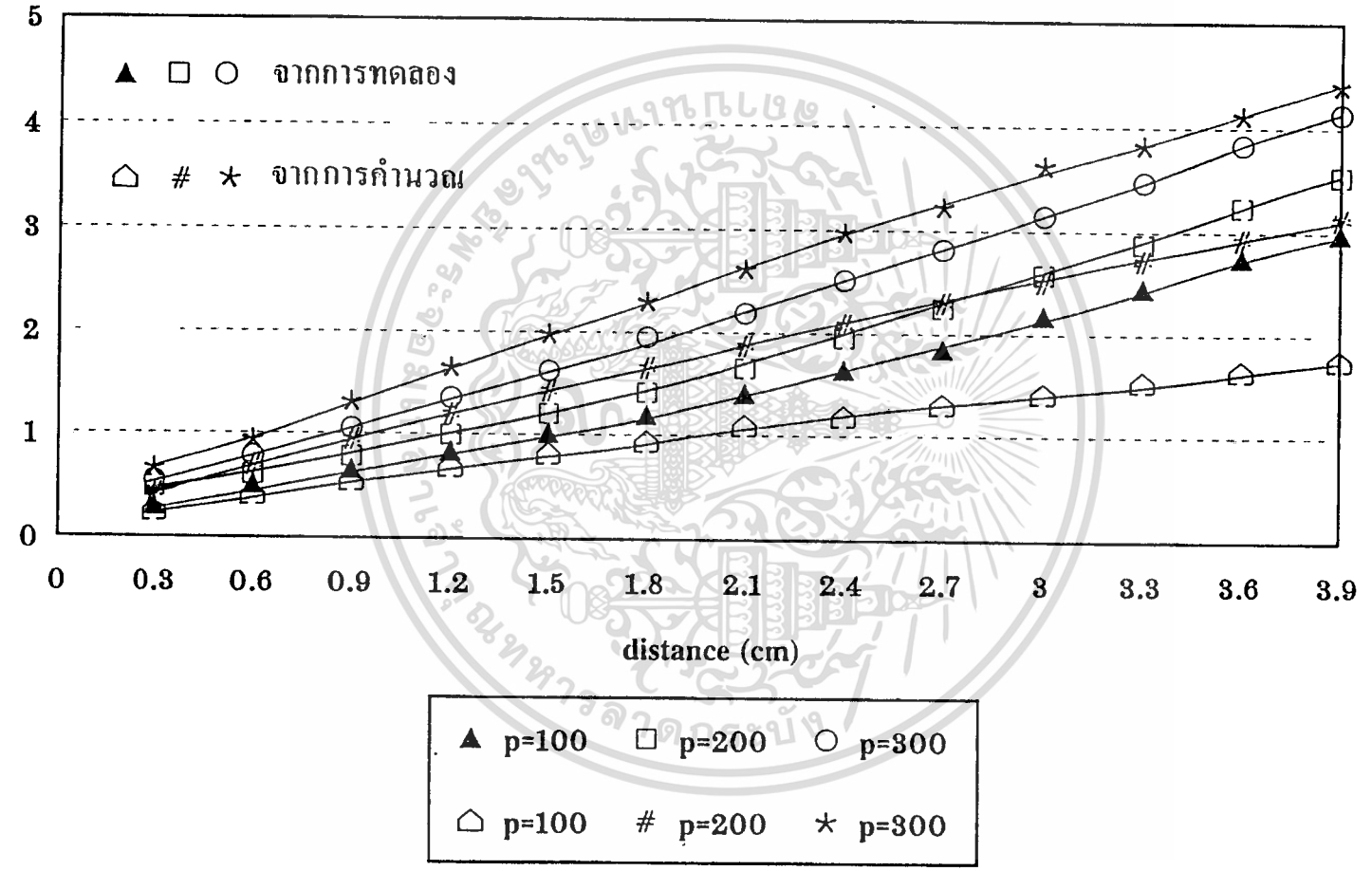
ตารางแสดงระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดกับแรงดันที่เกิดการเบรคดาวน์(เป็น kV)
ที่ได้จากการคำนวณในก๊าซฮีเลียมที่ความดัน(เป็น Torr) ต่าง ๆ

d (cm)	0.30	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80
P=100	0.25	0.41	0.55	0.69	0.82	0.94
P=200	0.41	0.69	0.94	1.19	1.42	1.65
P=300	0.66	0.94	1.31	1.65	1.98	2.30

ตารางที่ 5.8.1 (ต่อ)

d (cm)	2.10	2.40	2.70	3.00	3.30	3.60	3.90
P=100	1.10	1.19	1.31	1.42	1.54	1.65	1.75
P=200	1.87	2.09	2.30	2.51	2.72	2.93	3.13
P=300	2.62	2.93	3.23	3.53	3.83	4.12	4.41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8.2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด(d) ของก๊าซฮีเลียมที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ

บทที่ 6
บทสรุปและวิจารณ์

จากผลการทดลองวัดแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซฟรีออน (CCl_2F_2) ก๊าซไนโตรเจน (N_2) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซฮีเลียม(He) และก๊าซอาร์กอน(Ar) ที่ความดัน 100, 200 และ 300 Torr และมีระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด 0.3 cm ถึง 3.9 cm ความดันอากาศภายในแชมเบอร์ก่อนที่จะเติมก๊าซที่ใช้ในการทดลองเข้าไป $5.8* 10^{-1}$ mbar อัตราการรั่ว 6 Torr/ชม. จากผลการทดลองที่ได้ในก๊าซทั้ง 5 ชนิด ที่ใช้ในการศึกษาพบว่าที่ความดันของก๊าซภายในแชมเบอร์ต่ำแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์จะต่ำ และเมื่อเพิ่มความดันของก๊าซภายในแชมเบอร์มากขึ้นจะมีผลทำให้แรงดันที่เริ่มทำให้เกิดการเบรคดาวน์นั้นจะสูงขึ้นตามไปด้วย สำหรับระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดจะมีผลต่อแรงดันที่เริ่มทำให้เกิดการเบรคดาวน์คือที่ระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดน้อยแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์จะน้อย และเมื่อระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดมีค่ามากขึ้นแรงดันที่เริ่มทำให้เกิดการเบรคดาวน์จะมีค่ามากขึ้นด้วย

ผลที่ได้จากการทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติในการเป็นฉนวนไฟฟ้าของก๊าซทั้ง 5 ชนิดเมื่อนำแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ที่ pd ต่าง ๆ กันมาเปรียบเทียบกันตามตารางที่ 6.1 จากตารางที่ 6.1 จะเห็นได้ว่าที่ pd เท่ากัน ในก๊าซต่างชนิดกันแรงดันที่เริ่มทำให้เกิดการเบรคดาวน์จะมีค่าไม่เท่ากัน แสดงว่าคุณสมบัติในการเป็นฉนวนไฟฟ้าของก๊าซแต่ละชนิดนั้นต่างกัน (ผลที่ได้จากการทดลองนี้ยังไม่ได้เปรียบเทียบกับมาตราฐาน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.1

ตารางแสดงการเปรียบเทียบแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์* (เป็น kV) ในก๊าซฟรีออน ก๊าซไนโตรเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซฮีเลียม และก๊าซอาร์กอนที่ pd เท่ากับ 60, 180 และ 360 Torr.cm

pd (Torr.cm)	60	180	360
ก๊าซฟรีออน	9.08	24.65	46.90
ก๊าซไนโตรเจน	4.41	10.31	18.34
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	40.10	9.00	15.88
ก๊าซฮีเลียม	0.50	0.92	1.84
ก๊าซอาร์กอน	1.20	2.73	4.85

* เป็นค่าเฉลี่ยของแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ที่ pd เท่ากัน

จากตารางที่ 6.1 ที่ pd เท่ากับ 60, 180 และ 360 Torr.cm แรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซชนิดต่างๆ นั้นจะมีค่าที่แตกต่างกันดังนี้

ในก๊าซฟรีออนที่ pd เท่ากับ 60, 180 และ 360 Torr.cm แรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์จะเป็น 9.08, 24.65 และ 46.90 kV ตามลำดับ

ในก๊าซไนโตรเจนที่ pd เท่ากับ 60, 180 และ 360 Torr.cm แรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์จะเป็น 4.41, 10.31 และ 18.34 kV ตามลำดับ

ในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ pd เท่ากับ 60, 180 และ 360 Torr.cm แรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์จะเป็น 4.10, 9.00 และ 15.88 kV ตามลำดับ

ในก๊าซฮีเลียมที่ pd เท่ากับ 60, 180 และ 360 Torr.cm แรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์จะเป็น 0.50, 0.94 และ 1.84 kV ตามลำดับ

ในก๊าซอาร์กอนที่ pd เท่ากับ 60, 180 และ 360 Torr.cm แรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์จะเป็น 1.20, 2.73 และ 4.85 kV ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการศึกษาคุณสมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้าของก๊าซ จะพิจารณาดูจากแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซที่ pd เท่ากัน ถ้าก๊าซชนิดใดมีแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์สูงกว่า ก๊าซชนิดนั้นจะมีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีกว่า ในก๊าซทั้ง 5 ชนิดที่ใช้ในการศึกษานี้จะเห็นได้ว่าแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซฟรีออนจะสูงกว่าก๊าซชนิดอื่น ก๊าซฟรีออนจึงมีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนที่ดีกว่าก๊าซชนิดอื่น

ดังนั้นจึงสามารถสรุปคุณสมบัติในการเป็นฉนวนไฟฟ้าของก๊าซทั้ง 5 ชนิด โดยเรียงตามลำดับจากก๊าซที่มีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีที่สุด (หมายเลข 1) ไปจนถึงก๊าซที่มีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนไฟฟ้าต่ำสุด (หมายเลข 5) ได้ดังนี้

1. ก๊าซฟรีออน
2. ก๊าซไนโตรเจน
3. ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
4. ก๊าซอาร์กอน
5. ก๊าซฮีเลียม

เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ในการศึกษาคุณสมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้า ของก๊าซทั้ง 5 ชนิดนี้ไปเปรียบเทียบกับก๊าซซัลเฟอร์เฮกซาฟลูออไรด์ (SF_6) ซึ่งเป็นก๊าซที่ใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันจากกราฟในภาคผนวก ข รูปที่ 1 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่าแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซ SF_6 ที่เป็นฟังก์ชันของผลคูณของความดันกับระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด(pd) ในงานวิจัยที่ผ่านมา[4] (ซึ่ง pd จะมีหน่วยเป็น bar.mm ในการเปรียบเทียบจะแปลงหน่วยจาก bar.mm เป็น Torr.cm โดยคูณด้วย 75)ในการเปรียบนี้จะเปรียบเทียบที่ pd เท่ากัน ถ้าก๊าซชนิดใดมีแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์สูงกว่าก๊าซชนิดนั้นจะมีคุณสมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีกว่าโดยนำค่าแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซฟรีออน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจน ก๊าซอาร์กอน ก๊าซฮีเลียม มาเขียนเป็นตารางเปรียบเทียบกับแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซ SF_6 ที่ได้จากการอ่านกราฟ (เป็นค่าโดยประมาณ) ตารางที่ 6.2 จะเป็นตารางแสดงการเปรียบเทียบแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซทั้ง 5 ชนิดที่ใช้ในการศึกษานี้ กับก๊าซ SF_6 ที่ pd เท่ากับ 60, 120, 180, 240 และ 300 Torr.cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.2

ตารางแสดงการเปรียบเทียบแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซสามัญทั้ง 5 ชนิด*
ที่ใช้ในการศึกษา กับก๊าซ SF_6 ที่ pd ต่างๆ กัน

pd (Torr.cm)	60	120	180	240	300
ก๊าซฟรีออน	9.08	17.16	24.65	32.63	39.15
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	4.10	6.65	9.00	11.57	13.90
ก๊าซไนโตรเจน	4.41	7.54	10.31	13.14	16.10
ก๊าซอาร์กอน	1.20	2.07	2.73	3.60	4.38
ก๊าซฮีเลียม	0.50	0.72	0.92	1.32	1.70
ก๊าซ SF_6 **	7.88	12.00	20.00	28.00	35.00

* เป็นค่าเฉลี่ยของแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ที่ pd เท่ากัน

** เป็นค่าโดยประมาณที่อ่านได้จากกราฟในงานวิจัยที่ผ่านมา [4]

จากตารางจะเห็นได้ว่าที่ pd เท่ากัน แรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซ SF_6 จะสูงกว่าในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจน ก๊าซอาร์กอน ก๊าซฮีเลียม แต่จะต่ำกว่าในก๊าซฟรีออน

ในการนำก๊าซไปประยุกต์ใช้งาน จะต้องศึกษาถึงคุณสมบัติทางกายภาพคุณสมบัติทางเคมีและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วย

ก๊าซฟรีออน จากการทดลองวัดแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์จะเห็นได้ว่ามีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนไฟฟ้าดีกว่าก๊าซชนิดอื่น ๆ ที่ใช้ในการศึกษานี้ ดังนั้นจึงน่าจะมีความเหมาะสมกับการนำไปใช้ในการเป็นฉนวนไฟฟ้า แต่จากการศึกษาถึงคุณสมบัติทางเคมีและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมพบว่าก๊าซฟรีออนถ้าใช้มากเกินไปจะทำลายชั้นบรรยากาศ ซึ่งจะทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เป็นก๊าซที่ไม่เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี และเมื่อถูกเปลวไฟหรือสัมผัสกับผิวโลหะที่ร้อนจะทำให้เกิดสารที่เป็นพิษขึ้น ดังนั้นจึงไม่น่าที่จะมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการเป็นฉนวนไฟฟ้า

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ถ้าในบรรยากาศมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากเกินไปจะทำให้อุณหภูมิของบรรยากาศสูงขึ้นและเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก๊าซไนโตรเจน เป็นก๊าซที่ไม่ไวต่อปฏิกิริยาเคมีเป็นก๊าซที่ไม่เป็นอันตราย และเป็นก๊าซที่ไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงน่าจะมีความเหมาะสมที่จะนำมาเป็นฉนวนไฟฟ้ามากกว่าก๊าซชนิดอื่น ๆ ที่ใช้ในการทดลอง (เมื่อแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอีเลคโตรดมีค่าไม่สูงมากนัก)

ก๊าซอาร์กอนและก๊าซฮีเลียม จะเห็นได้ว่าแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์มีค่าต่ำดังนั้นจึงไม่ควรนำมาใช้เพื่อจุดประสงค์ในการเป็นฉนวนไฟฟ้า ควรใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าที่อาศัยการทำงานโดยการดีสชาร์จของก๊าซจะมีความเหมาะสมมากกว่าเช่น นำมาใช้ในหลอดไฟโฆษณาต่าง ๆ ซึ่งจะให้แสงสีม่วงน้ำเงิน หรือใช้เป็นตัวป้องกันการเกิดปฏิกิริยาเคมีในอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ไม่มีการดีสชาร์จระหว่างขั้วอิเลคโตรดเพื่อยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์นั้น ก๊าซทั้ง 2 ชนิดนี้เป็นก๊าซที่ไม่เป็นอันตรายและไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ก๊าซ SF_6 จากการเปรียบเทียบกับก๊าซที่ใช้ในการทดลอง ก๊าซ SF_6 จะมีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ต่ำกว่าก๊าซฟรีออนเท่านั้น ก๊าซ SF_6 เป็นก๊าซที่ไม่ทำลายชั้นบรรยากาศและเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี เป็นก๊าซที่มีความเสถียรทางด้านความร้อนสูง($500^{\circ}C$) ดังนั้นจึงมีความเหมาะสมกว่าก๊าซฟรีออนในการนำมาใช้เป็นฉนวนไฟฟ้า (สำหรับความเหมาะสมในกรณีอื่น สามารถศึกษาได้จากเอกสารอ้างอิงเล่มที่ [4])

จากผลการทดลองที่ได้เมื่อนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับทฤษฎี จะเห็นได้ว่าผลการทดลองที่ได้นั้นสอดคล้องกับทฤษฎี กล่าวคือ

1) ในก๊าซที่มีสัมประสิทธิ์การไอโอไนเซชันที่สองมาก(ค่าแกมม่า) ก๊าซชนิดนั้นจะมีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ต่ำกว่าก๊าซที่มีสัมประสิทธิ์การไอโอไนเซชันที่สองน้อย เช่นในก๊าซฮีเลียมจะมีค่าแกมม่า (Γ) ประมาณ 0.01 ในก๊าซไนโตรเจนจะมีค่าประมาณ 10^{-4} ดังนั้นก๊าซไนโตรเจนจะเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีกว่าก๊าซฮีเลียม ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้ก๊าซไนโตรเจนก็จะเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีกว่าก๊าซฮีเลียม

2) ถ้าวิเคราะห์เปรียบเทียบกับความดัน ในก๊าซชนิดเดียวกันที่ความดันสูงแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์จะสูงกว่าที่ความดันต่ำ เนื่องจากการชนกันของอิเลคตรอนกับอะตอมหรืออะตอมกับอะตอมซึ่งในการชนกันนี้จะมีการถ่ายเทพลังงานให้กับอะตอมที่ถูกชน ถ้าพลังงานนี้มากกว่าพลังงานของการไอโอไนเซชั่นก็จะเกิดการไอโอไนเซชั่นและจะนำไปสู่การเกิดการเบรคดาวน์ พลังงานอันนี้สามารถพิจารณาได้จาก

$$e = 1/2\ mv^2$$

เมื่อ e เป็นพลังงานของอิเลคตรอนหรือไอออนบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

m เป็นมวลของอิเลคตรอนหรือไอออนบวก

v เป็นความเร็วของอิเลคตรอนหรือไอออนบวก

$$v^2 = u^2 + 2as$$

เมื่อ u เป็นความเร็วเริ่มต้น

a เป็นความเร่ง

s เป็นระยะห่างระหว่างอะตอม (λ)

$$a = eE/m$$

เมื่อ e เป็นประจุของอิเลคตรอนหรือไอออนบวก

E เป็นสนามไฟฟ้า

m เป็นมวลของอิเลคตรอนหรือไอออนบวก

จากสมการที่หนึ่ง จะเห็นได้ว่าพลังงานของอิเลคตรอนหรืออะตอมจะมีค่ามาก ถ้าความเร็ว (v) มีค่ามาก ซึ่งความเร็วนี้จะขึ้นอยู่กับความเร่ง (a) และระยะห่างระหว่างอะตอม (s) ถ้าให้ความเร่งคงที่ ความเร็วจะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างอะตอมในแชมเบอร์เดียวกัน ที่ความดันสูงระยะห่างระห่างอะตอมจะน้อยกว่าที่ความดันต่ำ ดังนั้นที่ความดันต่ำพลังงานของอิเลคตรอนจะมีค่ามากกว่าที่ความดันสูง (เมื่อสนามไฟฟ้าเท่ากันและเป็นก๊าซชนิดเดียวกัน) ถ้าพลังงานนี้มากกว่าพลังงานของการไอโอไนเซชั่นจะเกิดการไอโอไนเซชันขึ้น

3) การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณและการทดลองในก๊าซฮีเลียมที่ ความดันและระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดต่าง ๆ กัน จากการเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่าที่ความดันต่ำความคาดเคลื่อน (Error) จะมีค่ามาก เนื่องจากภายในแชมเบอร์ก่อนที่จะใส่ก๊าซฮีเลียมเข้าไปยังมีโมเลกุลของก๊าซอื่น ๆ ปะปนอยู่ (ในการปั๊มอากาศออกจากแชมเบอร์จะปั๊มอากาศออกให้ความดันภายในแชมเบอร์เหลือต่ำลงประมาณ 5.8×10^{-1} mbar ซึ่งเป็นไปตามการใช้งานจริงจึงทำให้ภายในแชมเบอร์มีโมเลกุลของก๊าซอื่นเหลืออยู่บ้าง) แต่ค่าที่ได้จากการคำนวณเป็นแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซฮีเลียมที่บริสุทธิ์

ที่ความดันสูงขึ้นค่าที่ได้จากการคำนวณและการทดลองจะมีค่าที่ใกล้เคียงกันเนื่องจากที่ความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดันสูงจำนวนโมเลกุลของก๊าซที่ใช้ในการทดลองจะมีค่ามากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนโมเลกุลของก๊าซอื่นที่ปนอยู่ภายในแชมเบอร์ ดังนั้นความบริสุทธิ์ของก๊าซที่ใช้ในการทดลองจะเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าที่ได้จากการทดลองและการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] ประโมทย์ อุณห์ไวทยะ และ จุมพล พรหมพิทักษ , วิชาอิเล็คโทรนิคส์ในก๊าซ , คณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2520.

[2] นิพนธ์ สุขุม. KINETIC THEORY OF GASES และ GAS DISCHARGE. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2534

[3] A. VON ENGEL , IONIZED GASES, Oxford University Press 1969

[4] สำรวย สังข์สะอาด. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528

[5] สุพร กอเจริญรัตน์, "การพัฒนาและออกแบบไอโอเซชั่นแชมเบอร์" , (วิทยานิพนธ์ ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2537)

[6] บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่นจำกัด, ผู้รวบรวม, 74เรื่องน่ารู้ เทคนิคเครื่องกล ชุดที่ 2 (กรุงเทพฯ : หจก. นำอักษรการพิมพ์, 2535)

[7] F.W. Sears & M.W. Zemansky, UNIVERSITY PHYSICS,Addison Wesley Publishing Commpany,1967

[8] James Dillon Cobine "Gaseous Conductors " 1958 , Ideal Pland Electordes , 177 - 181.

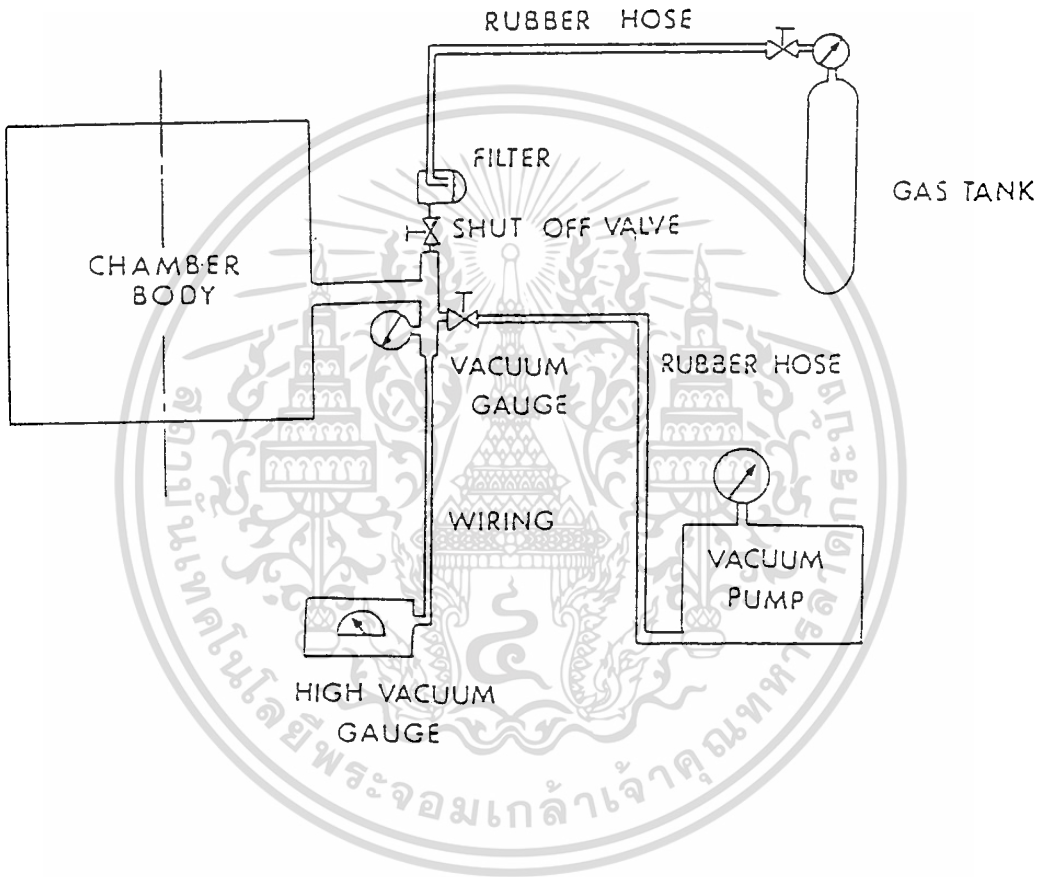
[9] Leybold-Heraeus, High Vacuum Pump Systems(Germany : Leybold - heraeus, 1986), pag 8.2

[10] Ned H.C. Hwang and Carlos E. Hita. FUNDAMENTALS OF HYDRAULIC ENGINEERING SYSTEMS. University of Houston Houston, Texas,1987.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.

ภาคผนวก ก

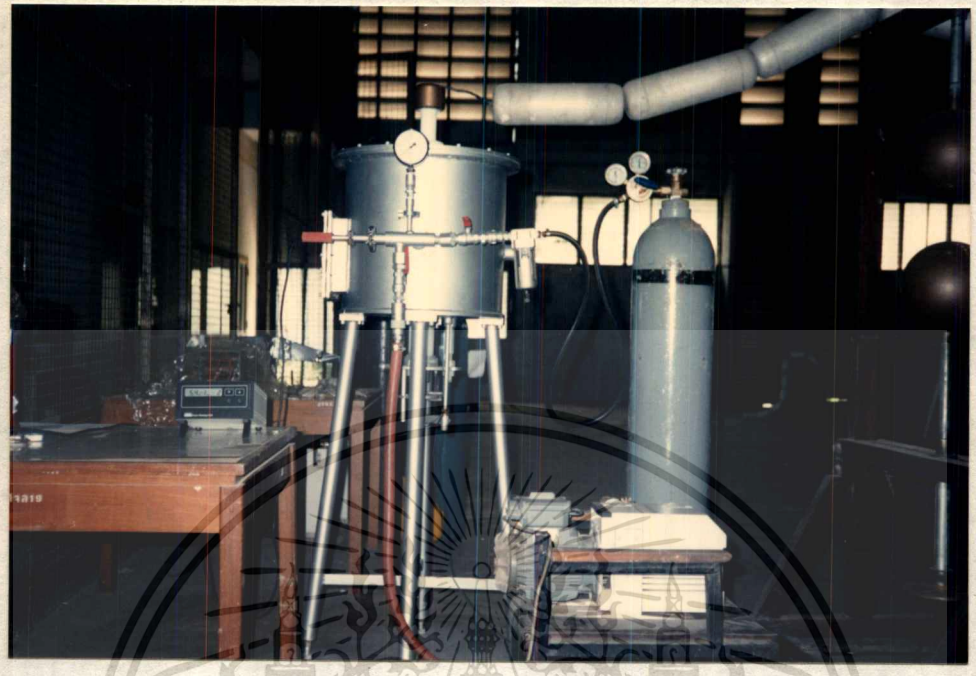
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



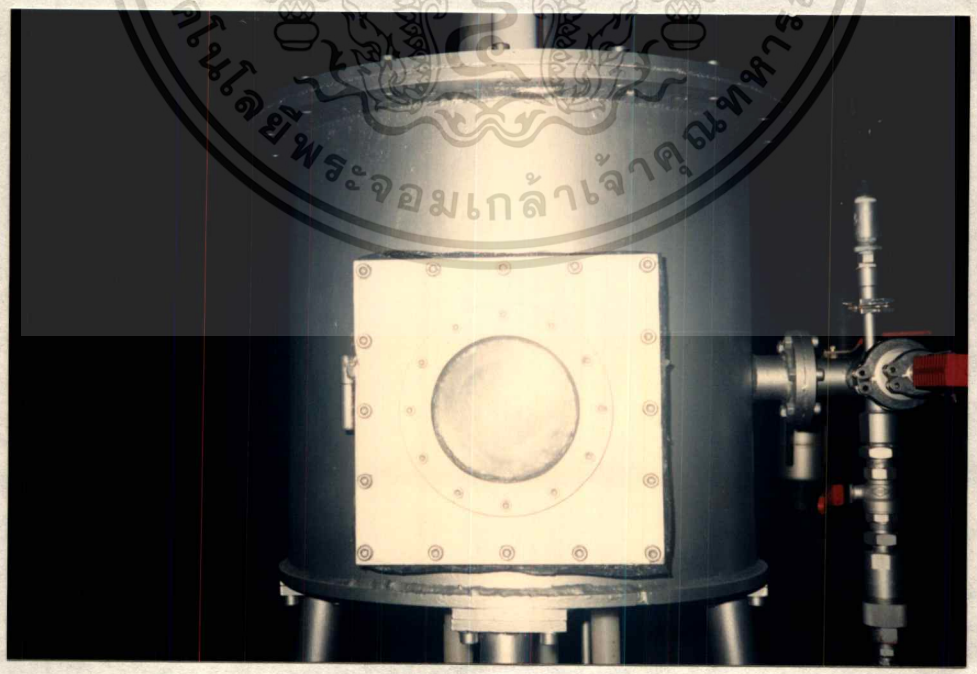
ไดอะแกรมแสดงการต่อ แชมเบอร์ เกจวัดความดัน ปั๊มสุญญากาศ ตัวกรองอากาศและท่อสำหรับใส่ก๊าซเข้าด้วยกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแสดงการต่อ แชมเบอร์ ถังก๊าซ เกจวัดความดันและโรตารี่เวนปั๊มเข้าด้วยกัน

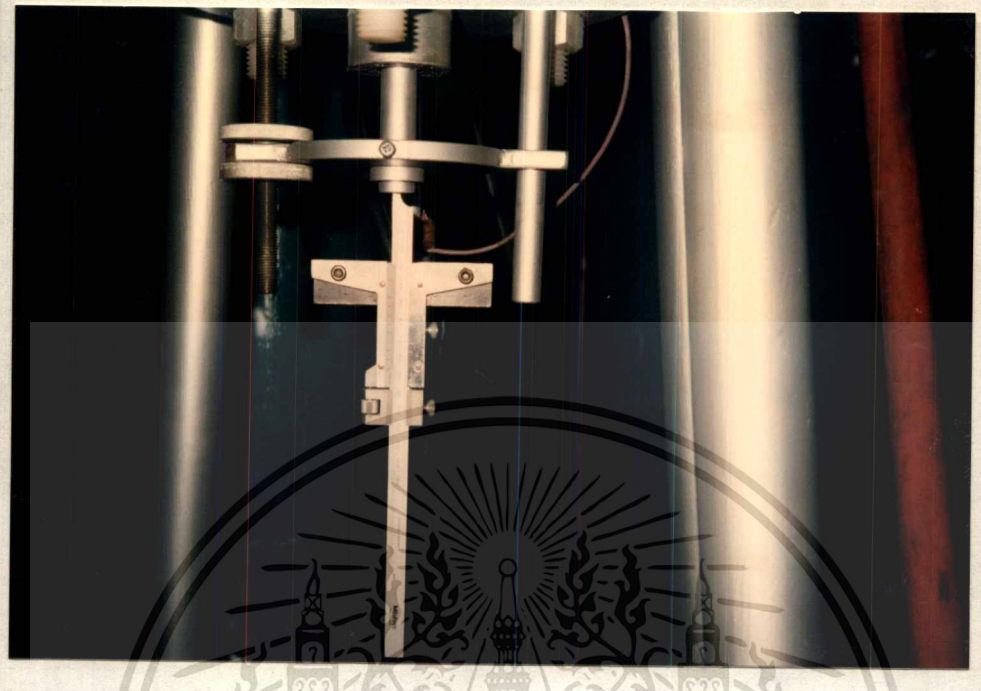


รูปหน้าต่างของแชมเบอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

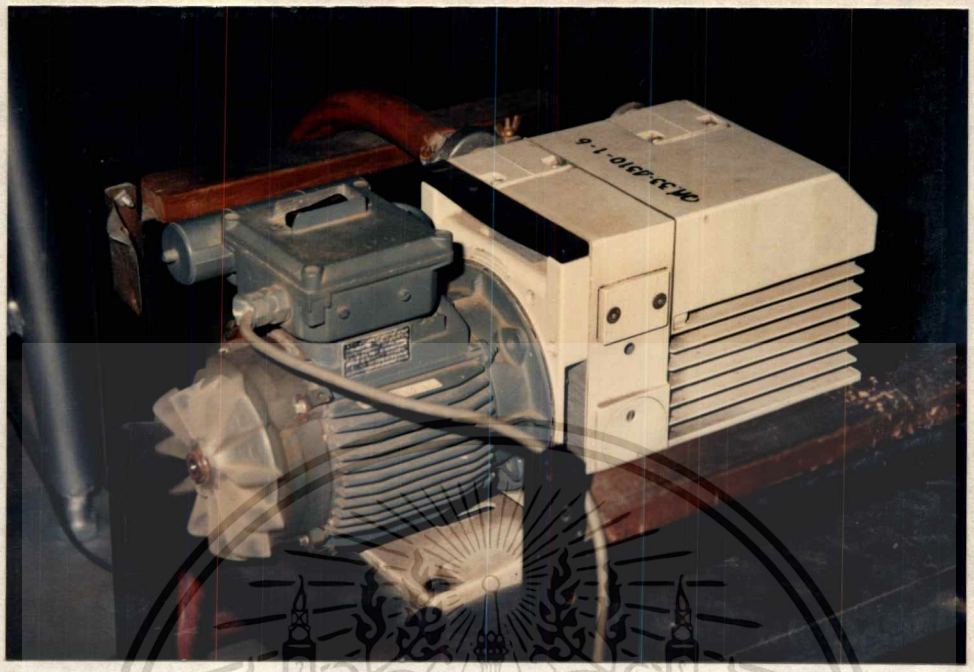
รูปแสดงการติดตั้งเวอร์เนียที่อยู่ด้านล่างแชมเบอร์



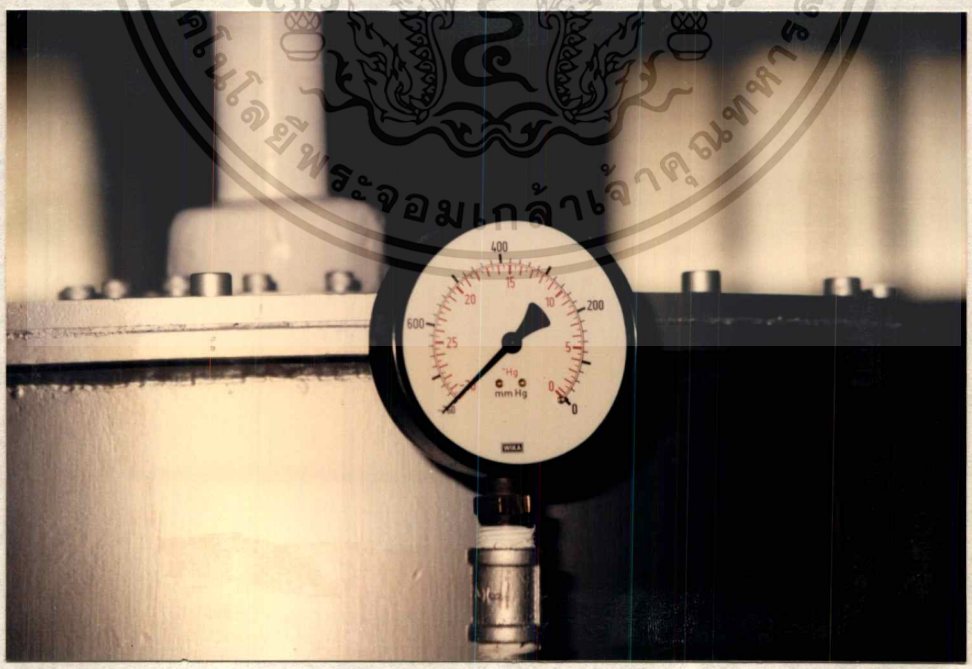
รูปแสดงขั้วอิเลคโตรดแบบ Rogowsky

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแสดงโรตารี่เวนปั๊มที่ใช้ในการปั๊มอากาศออก



รูปแสดงเกจวัดความดัน (แบบ BOURDON GAUGE)



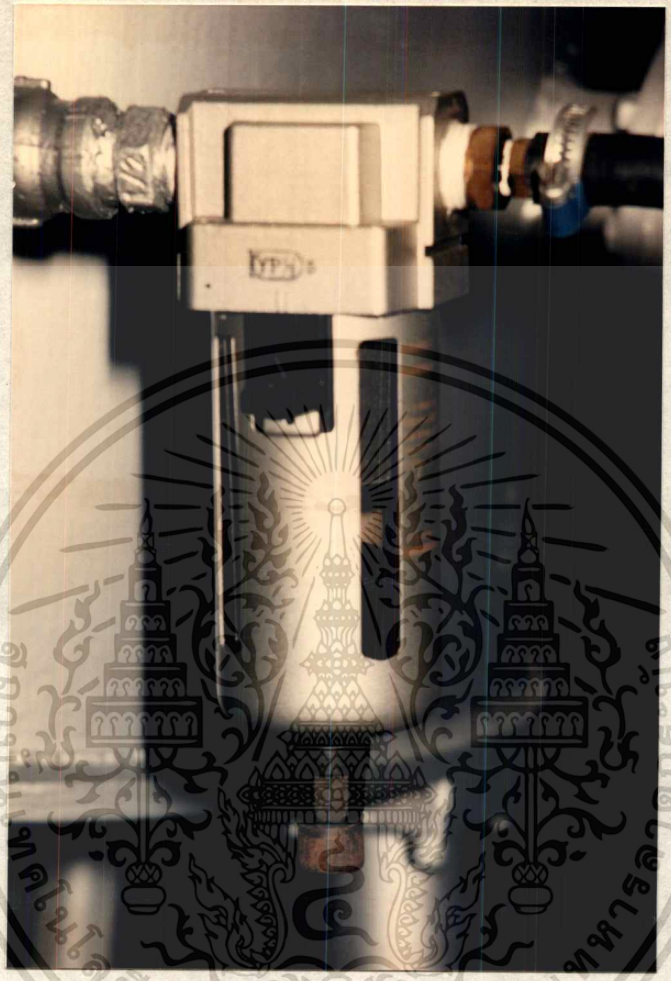
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแสดงเกจวัดความดัน (แบบ PENNING GAUGE)

รูปแสดงขณะเกิดการเบรคดาวน์ขึ้นภายในแชมเบอร์

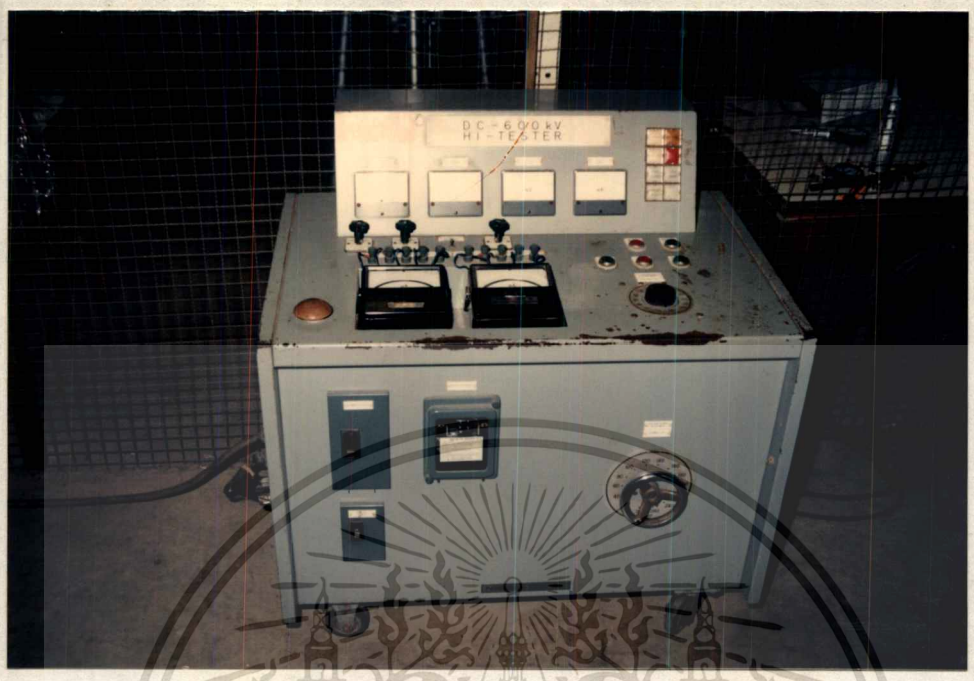
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแสดงตัวกรองก๊าซ (FILTER)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

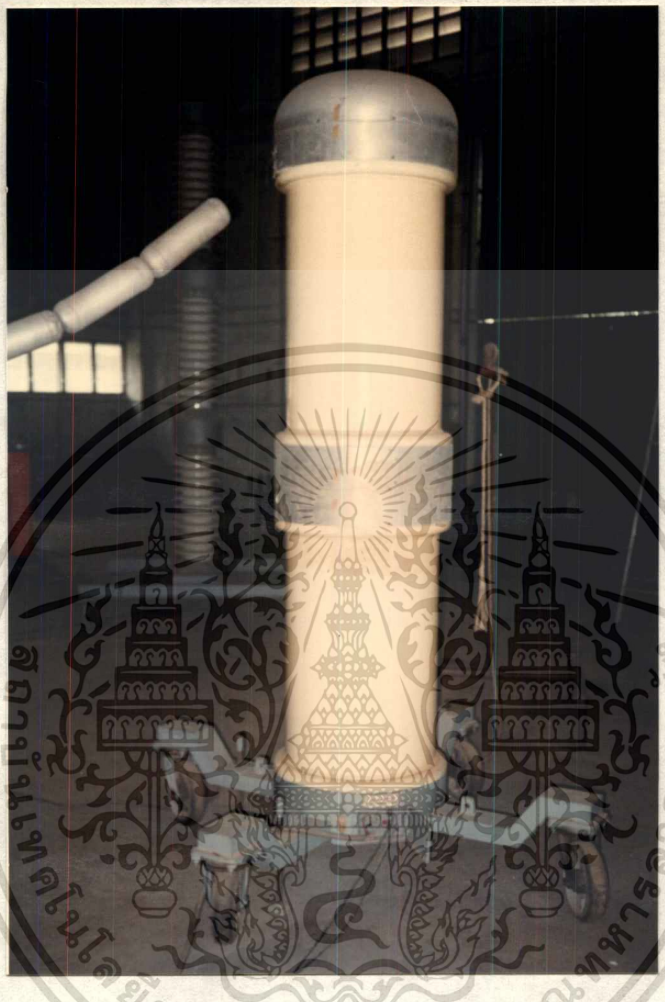
รูปแสดงเครื่องควบคุม DC HIGH VOLTAGE GENERATOR



รูปแสดง GALVANOMETER ที่ใช้ในการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแสดง DC HIGH VOLTAGE GENERATOR



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซฮีเลียม

สูตรที่ใช้ในการคำนวณหาแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซฮีเลียม คือ

$$Ub = \left[\frac{Bpd}{\ln \frac{Apd}{\ln(1/\Gamma + 1)}} \right]$$

เมื่อ Ub คือ แรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์

A และ B เป็นค่าคงตัวของก๊าซแต่ละชนิด (ซึ่งแสดงค่าไว้ตามตาราง ที่ 3.1)

P คือ ความดัน

d คือ ระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด

Γ คือ สัมประสิทธิ์การไอโอไนเซชั่นที่สองทั้งหมด (สำหรับในก๊าซฮีเลียมมีค่าเท่ากับ 0.01)

ตัวอย่างการคำนวณหาแรงดันเบรคดาวน์ในก๊าซฮีเลียม ที่ความดัน (p) เท่ากับ 100, 200 และ 300 Torr และมีระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด (d) เท่ากับ 0.3 และ 0.9 cm

1. ต้องการหาแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซฮีเลียมที่ความดันเท่ากับ 100 Torr และมีระหว่างอิเลคโตรดเท่ากับ 0.3 cm.

จากสูตร

$$Ub = \left[\frac{Bpd}{\ln \frac{Apd}{\ln(1/\Gamma + 1)}} \right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A และ B เป็นค่าคงตัวของก๊าซจากตารางที่ 3.1 จะมีค่าเท่ากับ 3 cm^{-1} $Torr^{-1}$ และ 25 V cm^{-1} $Torr^{-1}$ ตามลำดับ และจากโจทย์ที่กำหนดให้ p มีค่าเท่ากับ 100 Torr และ d มีค่าเท่ากับ 0.3 cm. ค่าแกมม่า (Γ) ในก๊าซฮีเลียมมีค่าเท่ากับ 0.01 เมื่อนำค่าต่าง ๆ แทนในสูตรจะได้

$$Ub = [25 \times 100 \times 0.3]/ \ln (3 \times 100 \times 0.3/ \ln (1/0.01+1))$$

$$Ub = 252.49 \text{ V}$$

ดังนั้นแรงดันที่เกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซฮีเลียมที่ p = 100 Torr และ d = 0.3 cm. จะเท่ากับ 252.49 V ทำเป็น kV โดยหารด้วย 1,000 จะได้เท่ากับ 0.25 kV

2. ต้องการหาแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซฮีเลียมที่ความดันเท่ากับ 200 Torr และมีระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดเท่ากับ 0.3 cm.

จากสูตร

$$Ub = \left[\frac{Bpd}{\ln \frac{Apd}{\ln(1/\Gamma + 1)}} \right]$$

A และ B เป็นค่าคงตัวของก๊าซจากตารางที่ 3.1 จะมีค่าเท่ากับ 3 cm^{-1} $Torr^{-1}$ และ 25 V cm^{-1} $Torr^{-1}$ ตามลำดับ และจากโจทย์ที่กำหนดให้ p จะมีค่าเท่ากับ 200 Torr และ d มีค่าเท่ากับ 0.3 cm. ค่าแกมม่า (Γ) ในก๊าซฮีเลียมมีค่าเท่ากับ 0.01 เมื่อนำค่าต่าง ๆ แทนในสูตรจะได้

$$Ub = [25 \times 200 \times 0.3]/ \ln (3 \times 200 \times 0.3/ \ln (1/0.01+1))$$

$$Ub = 409.43 \text{ V}$$

ดังนั้นแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซฮีเลียมที่ p = 100 Torr และ d = 0.3 cm. จะเท่ากับ 409.43 V ทำเป็น kV โดยหารด้วย 1,000 จะได้เท่ากับ 0.41 kV

3. ต้องการหาแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซฮีเลียมที่ความดันเท่ากับ 300 Torr และมีระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดเท่ากับ 0.3 cm.

จากสูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Ub = \left[\frac{Bpd}{\ln \frac{Apd}{\ln(1/\Gamma + 1)}} \right]$$

A และ B เป็นค่าคงตัวของก๊าซจากตารางที่ 3.1 จะมีค่าเท่ากับ 3 cm^{-1} $Torr^{-1}$ และ 25 V cm^{-1} $Torr^{-1}$ ตามลำดับ และจากโจทย์ที่กำหนดให้ p จะมีค่าเท่ากับ 300 Torr และ d มีค่าเท่ากับ 0.3 cm. ค่าแกมม่า (Γ) ในก๊าซฮีเลียมมีค่าเท่ากับ 0.01 เมื่อนำค่าต่าง ๆ แทนในสูตรจะได้

Ub = [25 x 300 x 0.3]/ ln (3 x 300 x 0.3/ ln (1/0.01+1))

Ub = 552.95 V

ดังนั้นแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซฮีเลียมที่ p = 100 Torr และ d = 0.3 cm. จะเท่ากับ 552.95 V ทำเป็น kV โดยหารด้วย 1,000 จะได้เท่ากับ 0.55 kV

4. ต้องการหาแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซฮีเลียมที่ความดันเท่ากับ 100 Torr และมีระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดเท่ากับ 3.9 cm.

จากสูตร

$$Ub = \left[\frac{Bpd}{\ln \frac{Apd}{\ln(1/\Gamma + 1)}} \right]$$

A และ B เป็นค่าคงตัวของก๊าซจากตารางที่ 3.1 จะมีค่าเท่ากับ 3 cm^{-1} $Torr^{-1}$ และ 25 V cm^{-1} $Torr^{-1}$ ตามลำดับ และจากโจทย์ที่กำหนดให้ p จะมีค่าเท่ากับ 100 Torr และ d มีค่าเท่ากับ 3.9 cm. ค่าแกมม่า (Γ) ในก๊าซฮีเลียมมีค่าเท่ากับ 0.01 เมื่อนำค่าต่าง ๆ แทนในสูตรจะได้

Ub = [25 x 100 x 3.9]/ ln (3 x 100 x 3.9/ ln (1/0.01+1))

Ub = 1761.38 V

ดังนั้นแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซฮีเลียมที่ p = 100 Torr และ d = 3.9 cm. จะเท่ากับ 552.95 V ทำเป็น kV โดยหารด้วย 1,000 จะได้เท่ากับ 1.76 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ต้องการหาแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซฮีเลียมที่ความดันเท่ากับ 200 Torr และมีระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดเท่ากับ 3.9 cm.

จากสูตร

$$Ub = \left[\frac{Bpd}{\ln \frac{Apd}{\ln(1/\Gamma + 1)}} \right]$$

A และ B เป็นค่าคงตัวของก๊าซจากตารางที่ 3.1 จะมีค่าเท่ากับ 3 cm^{-1} $Torr^{-1}$ และ 25 V cm^{-1} $Torr^{-1}$ ตามลำดับ และจากโจทย์ที่กำหนดให้ p จะมีค่าเท่ากับ200 Torr และ d มีค่าเท่ากับ 3.9 cm. ค่าแกมม่า (Γ) ในก๊าซฮีเลียมมีค่าเท่ากับ 0.01 เมื่อนำค่าต่าง ๆ แทนในสูตรจะได้

Ub = [25 x 200 x 3.9]/ ln (3 x 200 x 3.9/ ln (1/0.01+1))

Ub = 3130.74 V

ดังนั้นแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซฮีเลียมที่ p = 200 Torr และ d = 3.9 cm. จะเท่ากับ 3130.74 V ทำเป็น kV โดยหารด้วย 1,000 จะได้เท่ากับ 3.13 kV

6. ต้องการหาแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซฮีเลียมที่ความดันเท่ากับ 300 Torr และมีระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดเท่ากับ 3.9 cm.

จากสูตร

$$Ub = \left[\frac{Bpd}{\ln \frac{Apd}{\ln(1/\Gamma + 1)}} \right]$$

A และ B เป็นค่าคงตัวของก๊าซจากตารางที่ 3.1 จะมีค่าเท่ากับ 3 cm^{-1} $Torr^{-1}$ และ 25 V cm^{-1} $Torr^{-1}$ ตามลำดับ และจากโจทย์ที่กำหนดให้ p จะมีค่าเท่ากับ 300 Torr และ d มีค่าเท่ากับ 3.9 cm. ค่าแกมม่า (Γ) ในก๊าซฮีเลียมมีค่าเท่ากับ 0.01 เมื่อนำค่าต่าง ๆ แทนในสูตรจะได้

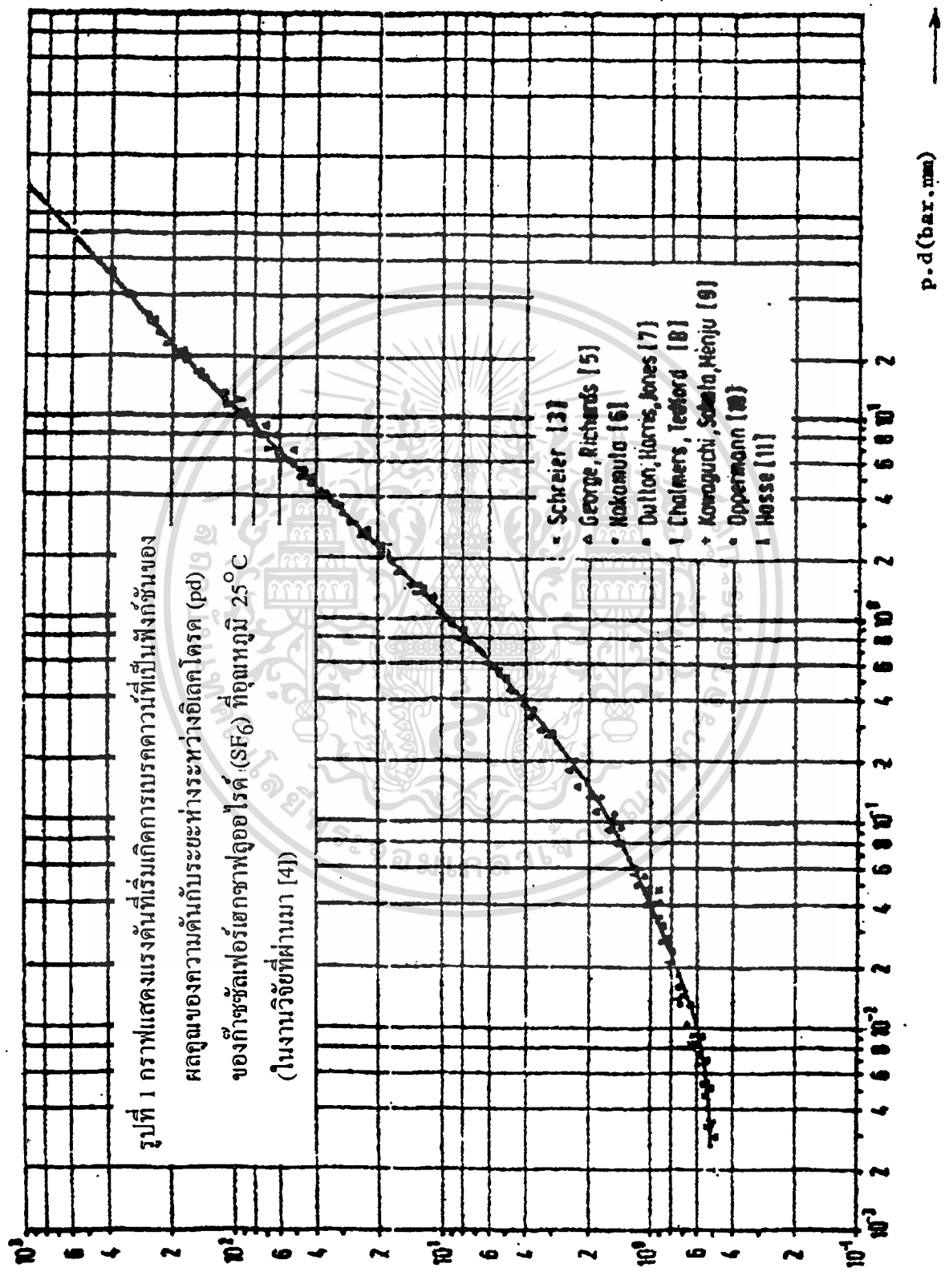
Ub = [25 x 300 x 3.9]/ ln (3 x 300 x 3.9/ ln (1/0.01+1))

Ub = 4409.08 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ในก๊าซฮีเลียมที่ p = 300 Torr และ d = 3.9 cm. จะเท่ากับ 4409.08 V ทำเป็น kV โดยหารด้วย 1,000 จะได้เท่ากับ 4.41 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 กราฟแสดงแรงดันที่เริ่มเกิดการเบรคดาวน์ที่เป็นฟังก์ชันของ
ผลคูณของความดันกับระยะห่างระหว่างอิเลคโตรด (pd)
ของก๊าซซัลเฟอร์เฮกซาฟลูออไรด์ (SF_6) ที่อุณหภูมิ 25°C
(ในงานวิจัยที่ผ่านมา [4])

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบด้วยไฟฟ้าแรงสูงแบบกระแสตรงของ IEEE

(Tests with Direct Voltage)

2.1 ข้อกำหนดในการทดสอบด้วยไฟฟ้าแรงสูงแบบกระแสตรง (Requirements of direct voltage tests)

ข้อกำหนดข้องแรงดันทดสอบ (Requirements of direct voltage tests) แรงดันทดสอบที่ป้อนให้แก่วัสดุทดสอบจะต้องเป็นแรงดันแบบกระแสตรงที่มีค่า ripple factor ไม่เกิน 5 % ยกเว้นจะมีการกำหนดตามมาตรฐานของอุปกรณ์ทดสอบต่างหาก และจะต้องคำนึงด้วยว่าเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบในวงจรทดสอบแล้ว จะมีผลต่อค่า ripple factor

2.2 ปริมาณที่ต้องทำการวัด, ความละเอียดในการวัด และข้อกำหนดของระบบการวัด (Quantities to be measured, Accuracies required and Requirement of the measuing systems)

ปริมาณที่ต้องทำการวัดในการทดสอบด้วยไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงประกอบด้วย

- ค่าเฉลี่ยของแรงดันทดสอบ (mean value of the test voltage) ซึ่งจะต้องผิดพลาดไม่เกิน 3 %
- ขนาด peak-to-peak voltage ซึ่งจะผิดพลาดไม่เกิน 10% ของขนาด ripple จริง หรือไม่เกิน 1 % ของค่าเฉลี่ยของแรงดันทดสอบ

ส่วนรายละเอียดของการวัดจะขึ้นอยู่กับระบบที่ทดสอบ โดยในตอนที่ติดตั้งระบบการวัดจะต้องแสดงถึงรายละเอียดต่อไปนี้ของระบบคือ

1) ค่าสเกลแฟคเตอร์และช่วงการใช้งานอย่างถูกต้องของค่าดังกล่าว ค่าสเกลแฟคเตอร์ (Scale factors)ของระบบคือค่าแฟคเตอร์ตัวคูณซึ่งใช้คูณกับค่าเอาท์พุตที่อ่านได้เพื่อแสดงให้ทราบถึงอินพุทที่ป้อนให้แก่ระบบ โดยค่าแฟคเตอร์นี้อาจเป็นค่าคงที่ที่ค่าหนึ่งหรือแสดงเป็นช่วงความถี่ก็ได้

2) คุณสมบัติการตอบสนองของระบบ (Response characteristics) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของแรงดันหรือกระแสที่จะทำการวัด

3) อิทธิพลของวัตถุข้างเคียง ต่อสเกลแฟคเตอร์และต่อระบบการต่อสนองไม่ว่าวัตถุข้างเคียงจะอยู่ในสภาพที่ถูกกราวด์ (grounded) หรือถูก energized หรือกำลังนำกระแสค่าสูงๆอยู่ก็ตามทั้งนี้ระบบการวัดยังต้องบ่งบอกระยะปลอดภัยต่ำสุด (minimum clearance) ของวัตถุข้างเคียงด้วย

4) ผลของขนาดและช่วงการทำงานของแรงดัน และกระแสที่ป้อนให้แก่ระบบรวมทั้งสภาวะแวดล้อมขณะทำการทดลองและความสกปรกของผิวหน้าวัสดุทดสอบ (surface

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

contamination) ต่อคุณสมบัติที่วัดได้ของระบบ

5) ความสามารถของระบบการวัดในการทำงานที่ค่ากระแสและแรงดันพิกัดสูงสุดนอกจากนี้ในขณะทำการทดลอง Performance tests ยังต้องบ่งบอกถึงข้อต่อไปนี้

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

ข) ค่ากระแสที่ถูกดึงโดยตัวแบ่งระดับแรงดันหรืออิมพิแดนซ์แรงดันสูง ต้องไม่น้อยกว่า 0.05 มิลลิแอมป์

ค) คุณสมบัติการตอบสนองความถี่ของระบบที่ใช้วัดค่าแรงดัน ripple จะต้องถูกต้องแม่นยำเพียงพอในช่วง 10 % สำหรับการใช้งานที่ความถี่ตั้งแต่ความถี่มูลฐาน (fundamental frequence) ของแรงดัน ripple จนกระทั่งถึงความถี่ 5 เท่า ของความถี่มูลฐาน

2.3 ขบวนการในการทดสอบ (Test procedures)

2.3.1 การทดสอบช่วงระยะสั้น (Rated withstand voltage tests)

กระทำได้โดยการป้อนแรงดันแก่อุปกรณ์ทดสอบ โดยค่าแรงดันเริ่มแรกจะต้องมีค่าต่ำเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดแรงดันเกิน (overvoltage) อันเนื่องมาจากการ switching transients หลังจากนั้นจึงค่อย ๆ เพิ่มแรงดันขึ้นอย่างช้า ๆ ขนาดที่กำหนดให้สามารถอ่านค่าที่วัดได้อย่างละเอียดตามต้องการแต่การเพิ่มแรงดันอย่างช้า ๆ นี้ต้องไม่ทำให้ความเครียดของอุปกรณ์ทดสอบที่ระดับแรงดันทดสอบนานเกินความจำเป็น ซึ่งโดยปกติแล้วที่แรงดันเกิน 70 % ของแรงดันสุดท้ายที่ประมาณไว้จะนิยมเพิ่มแรงดันขึ้นด้วยอัตรา 2 % ของแรงดันทดสอบต่อวินาที และจะต้องรักษาระดับแรงดันนั้นไว้ประมาณ 1 นาที ถ้าวัสดุทดสอบสามารถทดทานระดับแรงดันนั้นได้โดยไม่เกิดการดิสชาร์จแบบ disruptive ขึ้นก็แสดงว่าวัสดุทดสอบนั้นผ่านการทดสอบช่วงระยะเวลาสั้น

2.3.2 การทดสอบแรงดันดีสชาร์จแบบ disruptive ที่แน่นอน (Assured disruptive discharge voltage tests)

เป็นการทดสอบค่าแรงดันดิสชาร์จแบบ disruptive ที่เกิดขึ้นจริงโดยขบวนการทดสอบก็เช่นเดียวกับการทดสอบช่วงระยะสั้น แต่ทำการเพิ่มแรงดันจนกระทั่งเกิดการดีสชาร์จแบบ disruptive ขึ้นที่วัสดุทดสอบ ก็จะได้แรงดันที่ทำให้เกิดการดิสชาร์จแบบ disruptive ที่แน่นอนตามต้องการ

2.4 ข้อควรระวังและที่อาจทำให้เกิดความผิดพลาดในการทดสอบ (Precautions and possible source of error)

1) เมื่อทำการทดสอบด้วยความต้านทานสูง ๆ โดยใช้แรงดันกระแสตรงควรจะระวัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อผิดพลาดอันเนื่องมาจากกระแสโคโรน่า หรือกระแสลีคเกจ (leakage currents) ที่เกิดคร่อมผิวหน้าฉนวนที่สกปรกหรือชื้นได้ ดังนั้นในการทดลองจึงควรใช้อิเลคโตรดที่กลมมนที่สุด และผิวหน้าราบเรียบที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

2) ข้อผิดพลาดในการทดสอบอาจจะมีผลเนื่องมาจากคุณสมบัติของตัวต้านทาน ซึ่งมักจะมีค่าความผิดพลาดไปบ้างที่ระดับแรงดันหรืออุณหภูมิทดสอบสูง ๆ หรือเนื่องมาจากเครื่องมือที่ใช้วัดเมื่อมีกระแสสูง ๆ ไหลผ่าน

3) สำหรับ Generating voltmeter และ Electrostatic voltmeter นั้นอาจจะมีความผิดพลาดอันเนื่องมาจากการ distortion ของสนามไฟฟ้าไปในอากาศหรือไปตามผิวหน้าของวัตถุฉนวนซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามประจุไฟฟ้าสถิตย์ที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

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

RECOMMANDATION DE LA C.E.I.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

(affiliated to the International Organization for Standardization — ISO)

I.E.C. RECOMMENDATION

Publication 52

Deuxième édition – Second edition

1960

Recommandations pour la mesure des tensions au moyen d'éclateurs à sphères (une sphère à la terre)

Recommendations for voltage measurement by means of sphere-gaps (one sphere earthed)

Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

Bureau Central de la Commission Électrotechnique Internationale

1, rue de Varembé

Genève, Suisse

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CONTENTS

Page

FOREWORD 5

PREFACE 5

Clause

1. *Scope and Object* 9

2. *Standard sphere-gap* 9

2.1 Requirements for the spheres 9

2.2 Construction of the shanks of the spheres 11

2.3 Height of the spheres above the horizontal earth plane 13

2.4 Clearance round the spheres 13

2.5 Clearance round the spheres (table) 13

3. *Connection of the sphere-gap* 15

3.1 Earthing 15

3.2 High-voltage conductor 15

3.3 Protective series resistance in the measurement of alternating and direct voltages 15

3.4 Protective series resistance in the measurement of impulse voltages 17

4. *The use of the sphere-gap* 17

4.1 Irradiation 17

4.2 Voltage measurements 17

5. *Sphere-gap disruptive discharge voltages* 19

5.1 Numerical values in the tables 19

5.2 Accuracy of the tables 21

5.3 Influence of atmospheric conditions 21

Appendix A — Range of experimental calibrations 25

Appendix B — Procedure by which the values in Tables I and II have been derived from National Standards and other sources 27

Table I 29

Table II 33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

RECOMMENDATIONS FOR VOLTAGE MEASUREMENT BY MEANS OF SPHERE-GAPS (ONE SPHERE EARTHED)

FOREWORD

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

PREFACE

The work of revising the first edition of I.E.C. Publication 52, which was issued in 1935, was commenced before the War, but was not resumed until 1954, when a draft prepared in 1939 was discussed at a meeting held in London of Sub-Committee 36-3: High Voltage Tests.

As a result of this meeting a new draft was circulated which was discussed in Paris in 1955. Work was then taken over by the newly-formed Technical Committee No. 42: High Voltage Testing Techniques, and successive drafts were discussed at Munich in 1956 and Stockholm in 1958. The Stockholm meeting resulted in a final draft being submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in December 1958.

The following National Committees voted explicitly in favour of publication:

Austria
Belgium
Canada
Czechoslovakia
Denmark
Finland
France
Germany
Italy
Netherlands
Norway
Poland
Sweden
Switzerland
Turkey
Union of Soviet Socialist Republics
United Kingdom
United States of America
Yugoslavia

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

As explained in Appendix B, the present Publication is a compromise which has been accepted by almost all National Committees and is a truly international Publication on the measurement of voltages by means of sphere-gaps. However, the tables are based on calibrations made under conditions which were not always recorded in detail and which may sometimes have departed significantly from those specified in this Publication. The National Committees are therefore asked to verify the calibrations under the conditions laid down in this document so as to provide information which can be taken into account in any revision of the tables.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RECOMMENDATIONS FOR VOLTAGE MEASUREMENT BY MEANS OF SPHERE-GAPS (ONE SPHERE EARTHED)

1. Scope and Object

These recommendations concern the construction and use of sphere-gaps for voltage measurement. The rules apply to the measurement of the peak value of:

a) alternating voltages

b) full standard impulses as defined in I.E.C. Publication 60 and impulses with longer tails

c) direct voltages.

The peak values of the disruptive voltages in air for various spacings between the spheres are given in two tables.

Appendix A gives the limits of voltage and frequency over which the tables have been derived from experiments and can be presumed to be accurate within the tolerances specified in Clause 5.2.

Appendix B gives the procedure by which the values in the tables have been derived from previous National Standards and other sources.

2. Standard Sphere-gap

The standard sphere-gap is a peak voltage measuring device constructed and arranged in accordance with the rules in this document. It consists of two metal spheres of the same diameter (D) with their shanks, operating gear, insulating supports, supporting frame and leads for connection to the point at which the voltage is to be measured. Standard values of D are 2 – 5 – 6.25 – 10 – 12.5 – 15 – 25 – 50 – 75 – 100 – 150 and 200 cm. The spacing between the spheres is designated S.

The points on the two spheres which are closest to each other are called the sparking points. In practice the disruptive discharge may occur between other neighbouring points.

Figures 1 and 2 show two arrangements, one of which is typical of sphere-gaps with a vertical axis and the other of sphere-gaps with a horizontal axis.

2.1 Requirements for the spheres

2.1.1 *Tolerances on size and shape*

The spheres shall be carefully made so that their surfaces are smooth and their curvature is as uniform as possible.

The requirements on their shapes are as follows:

General Shape

The diameter of each sphere shall nowhere differ by more than 2% from the nominal value.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Freedom from surface irregularities in the region of the sparking point

The spheres shall be reasonably free from surface irregularities in the region of the sparking point. This region is defined by a circle such as would be drawn on the spheres by a pair of dividers set to an opening of 0.3 D and centred on the sparking point.

The freedom from surface irregularities is checked by a spherometer of which the feet are between 0.125 D and 0.25 D apart.

The spherometer measures the distance h of its central point from the plane passing through the three feet of the instrument, which form an equilateral triangle of side a.

When the three feet and the central point are in contact with a perfectly spherical surface of radius $\frac{D}{2}$ the following value is obtained for h:

$$h = \frac{D}{2} - \frac{1}{2}\sqrt{D^2 - \frac{4}{3}a^2}$$

or, with adequate accuracy,

$$h = \frac{D}{3}\left[\left(\frac{a}{D}\right)^2 + \frac{1}{3}\left(\frac{a}{D}\right)^4\right]$$

The measured values may differ from the above. When the feet of the spherometer are placed in various positions in the region defined above, the difference between the measured values of h and the value given in the formula shall nowhere exceed:

0.1 % of the diameter (D) if this is less than or equal to 100 cm

0.2 % of the diameter (D) if this is greater than 100 cm.

If a spherometer is not available, flat circular gauges may be used for an approximate evaluation of irregularities of the surface.

Note: The tolerances on size and shape need usually only be checked in the manner described above when the spheres are first supplied. It will normally be sufficient to make subsequent examinations by feeling the spheres or inspecting them visually.

2.1.2 *State of the surfaces*

The surfaces of the spheres in the neighbourhood of the sparking points shall be free from any trace of varnish, grease, or other protective coating. They shall be clean and dry but need not be polished. If the spheres become excessively roughened or pitted in use they shall be re-burnished or replaced.

Note: If the relative humidity of the air exceeds about 90 %, moisture may condense on the surface and the measurements will then cease to be accurate.

2.2 Construction of the shanks of the spheres

2.2.1 *Vertical gap*

When the spheres are arranged vertically, the shank of the high-voltage sphere shall be free from sharp edges or corners and the diameter of the shank shall not exceed 0.2 D over a length D. This requirement is made in order to reduce the influence of the high-voltage shank on the disruptive discharge voltage. If a stress distributor is used at the end of the shank its greatest dimension, perpendicular to the axis of the spheres, shall not exceed 0.5 D. Such stress distributors shall be at least 2 D from the sparking point of the high-voltage sphere.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The earthed shank and the operating gear have a smaller effect and their dimensions are therefore less important.

Figure 1 (page 36) gives the limits of size of the components of a typical vertical sphere-gap.

2.2.2 *Horizontal gap*

When the spheres are arranged horizontally the limiting dimensions of a typical sphere-gap are given in Figure 2 (page 37). They are the same for both sides of the gap.

Note: The sphere shanks shall be reasonably in line, whichever arrangement of gap be used.

2.3 Height of the spheres above the horizontal earth plane

The sphere-gap should be used above a horizontal earth plane such as a conducting network in or on the floor of the laboratory or a conducting surface on the support on which the sphere-gap is placed. The height A of the sparking point of the high-voltage sphere above such an earth plane shall be within the limits given in the table of Clause 2.5. This requirement applies both to vertical and horizontal gaps.

If the sphere-gap is mounted with the earthed sphere nearest to the ceiling and if other surfaces such as walls and the floor are at a considerably greater distance, then the ceiling may be regarded as the horizontal plane, from which the distance A is measured downwards.

2.4 Clearance round the spheres

The distance from the sparking point of the high-voltage sphere to any extraneous objects (such as walls, ceilings, transformer tanks, bushings, impulse generators, etc.), and also to the supporting framework for the spheres if this is made of conducting material, shall not be less than the value of B in the table of Clause 2.5. Except as permitted below, B should not be less than 2 D, regardless of the value of S.

Supporting frameworks for the spheres made of insulating material are exempt from this stipulation provided that they are clean and dry and that the spheres are used for the measurement of alternating or impulse voltages only. The distance B between the sparking point of the high-voltage sphere and the framework may then be less than is prescribed in the table of Clause 2.5, but it must not be below 1.6 D.

2.5 Clearance round the spheres (table)

Sphere diameter D cm	Minimum value of A	Maximum value of A	Minimum value of B
up to 6.25	7 D	9 D	14 S
10 – 15	6 D	8 D	12 S
25	5 D	7 D	10 S
50	4 D	6 D	8 S
75	4 D	6 D	8 S
100	3.5 D	5 D	7 S
150	3 D	4 D	6 S
200	3 D	4 D	6 S

Note 1. The requirements in the above table relate to approved sphere-gaps within the meaning of these recommendations. Sometimes, however, the test conditions render it impossible to make the values of A and B comply with the minimum requirements of the table.
Such sphere-gaps may also be regarded as approved if it can be demonstrated during systematic tests in the actual testing plant and under the actual test conditions that the disruptive voltages do not significantly deviate from those in these recommendations.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Note 2. At small sphere-gap spacings earthed objects of small size in the neighbourhood of the gap affect the results insignificantly, but at greater spacings the presence of large areas such as walls, even at the distance *B*, have an important effect. The sphere-gap should therefore be erected in an open laboratory with not more than one wall at the distance *B* and the other walls at greater distances. The calibrations given in Tables I and II have been based on experiments made under these conditions and they will be seriously in error if the sphere-gap is placed, say, in a cylindrical container of radius *B*, except when the spacing is very small.

Note 3. For the measurement of very high voltages it may be necessary to increase *A* and *B* above the minimum values given in the table of Clause 2.5, as these are not always sufficient to prevent disruptive discharge to earthed objects, especially those with sharp edges or corners.

3. Connection of the sphere-gap

3.1 Earthing

One sphere shall preferably be connected directly to earth, but may be connected through a resistor for special purposes. In the interests of personal safety, however, such resistors should be of very low values.

3.2 High-voltage conductor

The high-voltage conductor, including any series resistor not in the shank itself, shall be connected to a point on the shank at least 2 *D* away from the sparking point of the high-voltage sphere.

Within the region where the distance to the sparking point of the high-voltage sphere is less than *B*, the live conductor (including the series resistor if any) must not pass through the plane normal to the axis of the sphere-gap and situated at a distance 2 *D* from the sparking point of the high-voltage sphere; see Figures 1 and 2 where the plane is shown.

3.3 Protective series resistance in the measurement of alternating and direct voltages

Precautions should be taken to minimize pitting of the spheres and to prevent superimposed oscillations which may cause erratic disruptive discharges. For this purpose a resistance of 100 000 ohms to one megohm should be inserted in series with the sphere-gap. This range of resistance values applies to measurements of direct voltages and of alternating voltages at power frequencies. For alternating voltages of higher frequencies, where the effect of the voltage drop in the resistance due to the charging current of the gap may become appreciable, this resistance should be suitably reduced.

The resistor is to be placed as near as possible to the gap, usually in series with the high-voltage sphere. It should not be placed in the common connection from the voltage source to the sphere-gap and to the test object.

When brush discharges are present in the test circuit, series resistance is specially important in order to reduce the effect of the consequent transient over-voltage on the operation of the sphere-gap. When these discharges are not present either in the test circuit or in the test specimen, the resistance may be reduced to a value fixed by the permissible burning of the spheres by disruptive discharges.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 Protective series resistance in the measurement of impulse voltages

The purpose of the series resistance when measuring impulse voltages is to reduce the rate of voltage chopping, which may introduce undesirable stresses in the test object. Another purpose which is especially applicable to spheres of large diameters is to eliminate oscillations in the sphere-gap circuit which may cause a higher voltage to occur between the spheres than on the test specimen. For spheres of smaller diameter this phenomenon is generally of minor importance.

The value of the resistance should not exceed 500 ohms. It is essential for the reduction of oscillations that it should be of low inductance (not more than 30 μH). For the position of the resistor in the circuit see Clause 3.3.

4. The use of the sphere-gap

4.1 Irradiation

The disruptive discharge voltage of a sphere-gap is affected by the ionization in the gap between the spheres at the moment of application of the voltage.

The values given in the tables apply to measurements made without irradiation, apart from any random ionization already present, except in

a) the measurement of voltages below 50 kV peak, whatever the sphere diameter;

b) the measurement of voltages with spheres of 12.5 cm diameter and less, whatever the voltage.

For measurements under conditions *a*) and *b*) extra irradiation is recommended and is sometimes essential if accurate and consistent results are to be obtained. This is of special importance in the measurement of impulse voltages and for all types of voltages when very small spacings are used.

The irradiation may be obtained by a capsule containing radio-active material having an activity of not less than 0.2 millicurie and preferably of about 0.6 millicurie inserted in the high-voltage sphere near the sparking point. Another method is the irradiation of the gap by a quartz tube mercury-vapour lamp having a minimum rating of 35 watts and a current of at least one ampere. The lamp should be placed at about the distance *B* given in the table of Clause 2.5 and the light should fall on the sparking points of the spheres.

In the measurement of impulse voltages, the irradiation provided by the discharge in the gaps of the impulse generator has also been found satisfactory.

Note 1. The usual precautions should be taken in handling radio-active materials, which should be kept in a lead container except when in actual use.

Note 2. One curie is defined as the activity of one gramme of radium, which is equivalent to $3.7 \cdot 10^{10}$ disintegrated atoms per second.

4.2 Voltage measurements

The procedure usually consists in establishing a relation between a high voltage, as measured by the sphere-gap, and the indication of a voltmeter, an oscillograph or other device connected in the control circuit of the equipment.

Unless the contrary can be shown, this relation ceases to be valid if the circuit is altered in any respect other than a slight change of the spacing of the spheres. The voltage measured by the sphere-gap is derived from the spacing.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The procedure in establishing the relation varies with the type of voltage to be measured, as follows:

4.2.1 *Measurement of direct and alternating voltages*

The voltage shall be applied with an amplitude low enough not to cause disruptive discharge during the switching transient and it is then raised sufficiently slowly for the low-voltage indicator to be read accurately at the instant of disruptive discharge of the gap.

Alternatively, a constant voltage may be applied across the gap and the spacing between the spheres slowly reduced until disruptive discharge occurs.

If there is dust or fibrous material in the air, numerous low and erratic disruptive discharges may occur, especially when direct voltages are being measured, and it may be necessary to carry out a large number of tests before consistent results can be obtained.

The final measurement should be the mean of three successive readings agreeing within 3%.

4.2.2 *Measurement of impulse voltages*

In order to obtain the 50% disruptive discharge voltage of a sphere-gap, the spacing of the gap, or the charging voltage of the impulse generator, shall be adjusted in steps corresponding to not more than 2% of the expected disruptive discharge value. Six applications of the impulse shall be made at each step. The interval between applications shall not be less than 5 seconds. The value giving 50% probability of disruptive discharge is preferably obtained by interpolation between at least two gap or voltage settings, one resulting in two disruptive discharges or less, and the other in four disruptive discharges or more.

Another, less accurate, method is to adjust the settings until 4 to 6 disruptive discharges are obtained in a series of 10 successive applications.

5. Sphere-gap disruptive discharge voltages

5.1 Numerical values in the tables

The disruptive discharge voltages for various spacings between the spheres are given in Tables I and II.

Table I gives disruptive voltages (50% values in impulse tests) in kilovolts peak for:

alternating voltages

direct voltages of both polarities

full negative standard impulses as defined in I.E.C. Publication 60 and negative impulses with longer tails.

This table is not valid for the measurement of impulses below about 10 kV.

Table II gives 50% disruptive discharge voltages in kilovolts peak for full positive standard impulses as defined above and positive impulses with longer tails.

Note 1. Appendix A gives the range of voltages over which the tables have been derived from experiment and can be presumed to be accurate within the limits given in Clause 5.2.

Note 2. The tables may also be used without appreciable additional error for the measurement of impulses having longer than the standard front times.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 Accuracy of the tables

5.2.1 *Alternating and impulse voltages*

For spacings up to 0.5 D the tables are considered to be accurate within $\pm$ 3%. Values in the tables for spacings between 0.5 D and 0.75 D are regarded as of doubtful accuracy and for that reason are put in brackets.

Note: As it may be difficult to measure and adjust the gap with sufficient accuracy if the ratio of spacing to diameter is very small, it is recommended that the spacing should not be less than 0.05 D.

5.2.2 *Direct voltages*

The measurement of direct voltages is generally subject to larger errors than that of alternating or impulse voltages. Such errors are usually caused by dust or fibres in the air. There is also a tendency for abnormally low disruptive discharge values to be obtained if the voltage is maintained for a long time.

It is considered that in the absence of excessive dust the results will be accurate within $\pm$ 5% provided that the spacing is not greater than about 0.4 D.

Note: As it may be difficult to measure and adjust the gap with sufficient accuracy if the ratio of spacing to diameter is very small, it is recommended that the spacing should not be less than 0.05 D.

5.3 Influence of atmospheric conditions

5.3.1 *Atmospheric conditions valid for the tabulated values*

The tabulated values are valid for:

— an ambient temperature of 20°C

— an atmospheric pressure of 1 013 millibars (760 mm Hg at 0°C)

5.3.2 *Correction for air density*

Disruptive discharge voltages corresponding to a given spacing under atmospheric conditions other than those specified above are obtained by multiplying the values in Tables I and II by a correction factor k. This factor is a function of the relative air density d, defined by:

$$d = \frac{b}{1\,013} \times \frac{273 + 20}{273 + t} = 0.289 \times \frac{b}{273 + t}$$

where b is the atmospheric pressure in millibars, and t the temperature in degrees Centigrade.

If b is given in mm Hg at 0°C, the formula is replaced by:

$$d = \frac{b}{760} \times \frac{273 + 30}{273 + t} = 0.386 \times \frac{b}{273 + t}$$

The relation between the air density and the correction factor is given in the table of Clause 5.3.3. The correction factor is equal to the relative air density (i.e. $k = d$) for values of d between 0.95 and 1.05.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.3 *Air density correction factor (table)*

Relative air density d	Correction factor k
0.70	0.72
0.75	0.77
0.80	0.82
0.85	0.86
0.90	0.91
0.95	0.95
1.00	1.00
1.05	1.05
1.10	1.09
1.15	1.13

5.3.4 *Humidity*

The disruptive discharge voltage of a sphere-gap increases with increasing humidity of the air. The numerical value of the effect is uncertain but it is unlikely to be more than 2 or 3% over the range of humidities normally encountered in laboratories. Because of this uncertainty, no correction factor for humidity can be given at present. In any case, the humidity of the air in the various laboratories where the experimental calibrations were made was not usually recorded.

See Clause 2.1.2 for a note on the danger from condensation of moisture on the surfaces of the spheres.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

APPENDIX A

RANGE OF EXPERIMENTAL CALIBRATIONS

Tables I and II are partly derived from experiments reported in the references listed below. There is no experimental proof of their accuracy at voltages higher than the values given in the list.

Experimental calibrations of the sphere-gap

Kind of voltage	Highest voltage kV peak	Reference
Alternating voltage of power frequency	1 700	Transactions A.I.E.E. Vol. 71 (1952), Part III, page 455
Alternating voltage of power frequency	1 400	J.I.E.E. Vol. 82, (1938), page 655
Direct voltage +	800)	Zeit. techn. Phys. 18 (1937),
Direct voltage −	1 300)	page 209
Impulse voltage −	2 580)	Transactions A.I.E.E. Vol. 71 (1952)
Impulse voltage −	2 410)	Part III, page 455
Alternating voltage of high frequency		E.T.Z. Vol. 60 (1939), page 92 (see Note 1 below)
Undamped alternating voltage of high frequency	See Note 2 below	J.A.I.E.E. Vol. 46 (1927), page 1 314
		Arch. Elektr. Vol. 14 (1924), page 491
		Arch. Elektr. Vol. 24 (1930), page 525
		Arch. Elektr. Vol. 25 (1931), page 322
		Arch. Elektr. Vol. 26 (1932), page 123
Damped alternating voltage of high frequency	idem	Ann. Phys. 19 (1906), page 1 016
		Arch. Elektr. Vol. 16 (1926), page 496
		Arch. Elektr. Vol. 20 (1928), page 99

Note 1. This reference contains a summary of the calibrations with damped and undamped high-frequency voltages made over a range of voltages and frequencies up to 1939. The other references in the list give the details of most of these individual calibrations.

Note 2. From the information in the references, which is incomplete and sometimes conflicting, it appears that Table I can be used without serious error for the measurement of undamped alternating voltages at frequencies up to 20 kHz(kc/s), but only up to about 15 kV peak. At higher frequencies this voltage is reduced.

The references also show that Table I can be used for the measurement of damped alternating voltages at frequencies up to 500 kHz(kc/s), but again with the restriction that the voltage should not exceed 15 kV peak.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

APPENDIX B

PROCEDURE BY WHICH THE VALUES IN TABLES I AND II HAVE BEEN DERIVED FROM NATIONAL STANDARDS AND OTHER SOURCES

At the meeting of Technical Committee No. 42 in Munich in 1956, it was agreed that new tables should be prepared which could be accepted internationally.

Apart from certain exceptions which are noted below, the disruptive discharge voltages in the new tables were to be the mean of:

1) the values which were accepted by the I.E.C. in July 1939;
2) the values in A.S.A. Standard C 68.1 (1953) (after adjustment for temperature).

The calculation of the mean resulted in a few anomalies; in particular the disruptive discharge voltages of small gaps varied rather irregularly as the sphere diameter was increased.

These anomalies have been removed as far as was possible without introducing other anomalies.

The exceptions mentioned above are listed below:

1) No data are given in the A.S.A. Standard for 2, 5, 10 and 15 cm spheres.
   The I.E.C. figures of 1939 for 5, 10 and 15 cm spheres have therefore been included in the present tables without any changes other than the minor adjustments referred to above.

2) The figures for 2 cm spheres in the I.E.C. document of 1939, which were not applicable to positive impulses, were later found to be inaccurate at spacings up to 1 cm. A new calibration has therefore been inserted, based on J.I.E.E., vol. 95 (1948), Part II, page 309, but the values are not applicable to the measurement of impulses of either polarity below 10 kV. See Proc. I.E.E., Part II, Vol. 101, (1954), page 438, for evidence on this latter point.

3) The I.E.C. data of 1939 for voltages above 1 400 kV are regarded as being less reliable than the most recently measured values in the U.S.A. and these latter have therefore been adopted (see A.S.A. C 68.1, 1953 and Transactions A.I.E.E., vol. 71 (1952), Part III, page 455).

The figures in the tables have been rounded off as follows:

up to 50 kV	to the nearest 0.1 kV
over 50 and up to 100 kV	to the nearest 0.5 kV
over 100 and up to 500 kV	to the nearest 1 kV
over 500 and up to 1 000 kV	to the nearest 5 kV
over 1 000 kV	to the nearest 10 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE I

SPHERE-GAP WITH ONE SPHERE EARTHED

Peak values of disruptive discharge voltages in kilovolts

(50% values for impulse tests):

Valid for: — alternating voltages
— full negative standard impulses and impulses with longer tails
— direct voltages of either polarity.

Atmospheric reference conditions: 20°C and 1 013 millibars (760 mm Hg at 0°C).

Sphere gap spacing cm	Sphere diameter cm											
	2	5	6.25	10	12.5	15	25	50	75	100	150	200
0.05	2.8											
0.10	4.7											
0.15	6.4											
0.20	8.0	8.0										
0.25	9.6	9.6										
0.30	11.2	11.2										
0.40	14.4	14.3	14.2									
0.50	17.4	17.4	17.2	16.8	16.8	16.8						
0.60	20.4	20.4	20.2	19.9	19.9	19.9						
0.70	23.2	23.4	23.2	23.0	23.0	23.0						
0.80	25.8	26.3	26.2	26.0	26.0	26.0						
0.90	28.3	29.2	29.1	28.9	28.9	28.9						
1.0	30.7	32.0	31.9	31.7	31.7	31.7	31.7					
1.2	(35.1)	37.6	37.5	37.4	37.4	37.4	37.4					
1.4	(38.5)	42.9	42.9	42.9	42.9	42.9	42.9					
1.5	(40.0)	45.5	45.5	45.5	45.5	45.5	45.5					
1.6		48.1	48.1	48.1	48.1	48.1	48.1					
1.8		53.0	53.5	53.5	53.5	53.5	53.5					
2.0		57.5	58.5	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0			
2.2		61.5	63.0	64.5	64.5	64.5	64.5	64.5	64.5			
2.4		65.5	67.5	69.5	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0			
2.6		(69.0)	72.0	74.5	75.0	75.5	75.5	75.5	75.5			
2.8		(72.5)	76.0	79.5	80.0	80.5	81.0	81.0	81.0			
3.0		(75.5)	79.5	84.0	85.0	85.5	86.0	86.0	86.0	86.0		
3.5		(82.5)	(87.5)	95.0	97.0	98.0	99.0	99.0	99.0	99.0		
4.0		(88.5)	(95.0)	105	108	110	112	112	112	112		
4.5			(101)	115	119	122	125	125	125	125		
5.0			(107)	123	129	133	137	138	138	138	138	
5.5				(131)	138	143	149	151	151	151	151	
6.0				(138)	146	152	161	164	164	164	164	

Note 1. The tables are not valid for the measurement of impulse voltages below about 10 kV.

Note 2. The figures in brackets, which are for spacings of more than 0.5 *D*, are of doubtful accuracy.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE I *(continued)*

Sphere gap spacing cm	Sphere diameter cm											
	2	5	6.25	10	12.5	15	25	50	75	100	150	200
6.5				(144)	(154)	161	173	177	177	177	177	
7.0				(150)	(161)	169	184	189	190	190	190	
7.5				(155)	(168)	177	195	202	203	203	203	
8.0					(174)	(185)	206	214	215	215	215	
9.0					(185)	(198)	226	239	240	241	241	
10					(195)	(209)	244	263	265	266	266	266
11						(219)	261	286	290	292	292	292
12						(229)	275	309	315	318	318	318
13							(289)	331	339	342	342	342
14							(302)	353	363	366	366	366
15							(314)	373	387	390	390	390
16							(326)	392	410	414	414	414
17							(337)	411	432	438	438	438
18							(347)	429	453	462	462	462
19							(357)	445	473	486	486	486
20							(366)	460	492	510	510	510
22								489	530	555	560	560
24								515	565	595	610	610
26								(540)	600	635	655	660
28								(565)	635	675	700	705
30								(585)	665	710	745	750
32								(605)	695	745	790	795
34								(625)	725	780	835	840
36								(640)	750	815	875	885
38								(665)	(775)	845	915	930
40								(670)	(800)	875	955	975
45									(850)	945	1 050	1 080
50									(895)	1 010	1 130	1 180
55									(935)	(1 060)	1 210	1 260
60									(970)	(1 110)	1 280	1 340
65										(1 160)	1 340	1 410
70										(1 200)	1 390	1 480
75										(1 230)	1 440	1 540
80											(1 490)	1 600
85											(1 540)	1 660
90											(1 580)	1 720
100											(1 660)	1 840
110											(1 730)	(1 940)
120											(1 800)	(2 020)
130												(2 100)
140												(2 180)
150												(2 250)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE II

SPHERE-GAP WITH ONE SPHERE EARTHED

Peak values of disruptive discharge voltages in kilovolts (50% values)

Valid for full positive standard impulses and impulses with longer tails.

Atmospheric reference conditions: 20°C and 1 013 millibars (760 mm Hg at 0°C).

Sphere gap spacing cm	Sphere diameter cm											
	2	5	6.25	10	12.5	15	25	50	75	100	150	200
0.05												
0.10												
0.15												
0.20												
0.25												
0.30	11.2	11.2										
0.40	14.4	14.3	14.2									
0.50	17.4	17.4	17.2	16.8	16.8	16.8						
0.60	20.4	20.4	20.2	19.9	19.9	19.9						
0.70	23.2	23.4	23.2	23.0	23.0	23.0						
0.80	25.8	26.3	26.2	26.0	26.0	26.0						
0.90	28.3	29.2	29.1	28.9	28.9	28.9						
1.0	30.7	32.0	31.9	31.7	31.7	31.7	31.7					
1.2	(35.1)	37.8	37.6	37.4	37.4	37.4	37.4					
1.4	(38.5)	43.3	43.2	42.9	42.9	42.9	42.9					
1.5	(40.0)	46.2	45.9	45.5	45.5	45.5	45.5					
1.6		49.0	48.6	48.1	48.1	48.1	48.1					
1.8		54.5	54.0	53.5	53.5	53.5	53.5					
2.0		59.5	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0			
2.2		64.0	64.0	64.5	64.5	64.5	64.5	64.5	64.5			
2.4		69.0	69.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0			
2.6		(73.0)	73.5	75.5	75.5	75.5	75.5	75.5	75.5			
2.8		(77.0)	78.0	80.5	80.5	80.5	81.0	81.0	81.0			
3.0		(81.0)	82.0	85.5	85.5	85.5	86.0	86.0	86.0	86.0		
3.5		(90.0)	(91.5)	97.5	98.0	98.5	99.0	99.0	99.0	99.0		
4.0		(97.5)	(101)	109	110	111	112	112	112	112		
4.5			(108)	120	122	124	125	125	125	125		
5.0			(115)	130	134	136	138	138	138	138	138	
5.5				(139)	145	147	151	151	151	151	151	
6.0				(148)	155	158	163	164	164	164	164	
6.5				(156)	(164)	168	175	177	177	177	177	
7.0				(163)	(173)	178	187	189	190	190	190	
7.5				(170)	(181)	187	199	202	203	203	203	
8.0					(189)	(196)	211	214	215	215	215	
9.0					(203)	(212)	233	239	240	241	241	

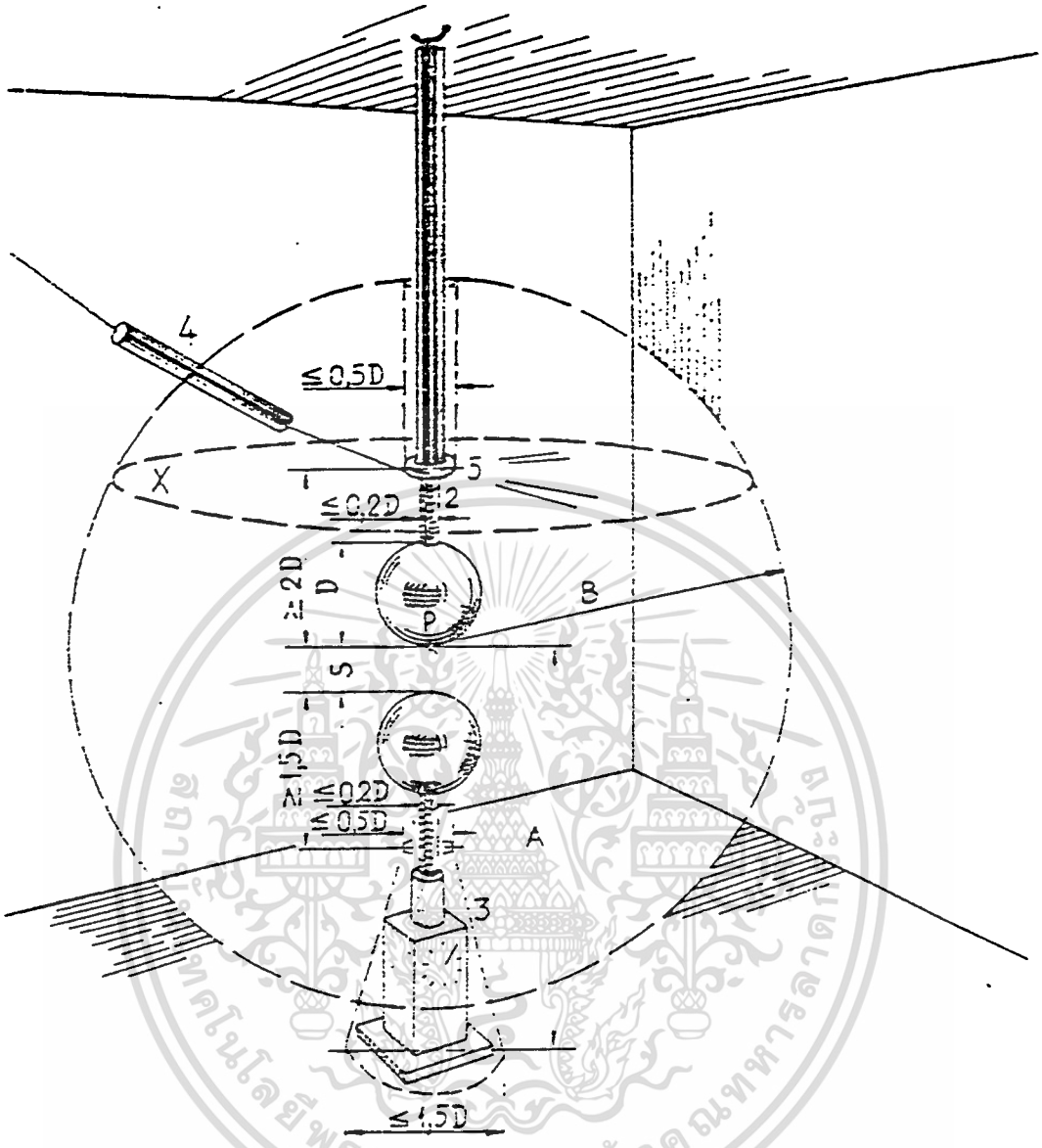
Note: The figures in brackets, which are for spacings of more than 0.5 *D*, are of doubtful accuracy.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE II *(continued)*

Sphere gap spacing cm	Sphere diameter cm											
	2	5	6.25	10	12.5	15	25	50	75	100	150	200
10					(215)	(226)	254	263	265	266	266	266
11						(238)	273	287	290	292	292	292
12						(249)	291	311	315	318	318	318
13							(308)	334	339	342	342	342
14							(323)	357	363	366	366	366
15							(337)	380	387	390	390	390
16							(350)	402	411	414	414	414
17							(362)	422	435	438	438	438
18							(374)	442	458	462	462	462
19							(385)	461	482	486	486	486
20							(395)	480	505	510	510	510
22								510	545	555	560	560
24								540	585	600	610	610
26								570	620	645	655	660
28								(595)	660	685	700	705
30								(620)	695	725	745	750
32								(640)	725	760	790	795
34								(660)	755	795	835	840
36								(680)	785	830	880	885
38								(700)	(810)	865	925	935
40								(715)	(835)	900	965	980
45									(890)	980	1 060	1 090
50									(940)	1 040	1 150	1 190
55									(985)	(1 100)	1 240	1 290
60									(1 020)	(1 150)	1 310	1 380
65										(1 200)	1 380	1 470
70										(1 240)	1 430	1 550
75										(1 280)	1 480	1 620
80											(1 530)	1 690
85											(1 580)	1 760
90											(1 630)	1 820
100											(1 720)	1 930
110											(1 790)	(2 030)
120											(1 860)	(2 120)
130												(2 200)
140												(2 280)
150												(2 350)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



1. Support isolant.
2. Tige support de la sphère.
3. Mécanisme de manœuvre avec dimensions maximales.
4. Connexion à haute tension avec résistance en série.
5. Electrode de répartition de champ, avec dimensions maximales.
P. Point d'étincelle de la sphère haute tension.
A. Hauteur de *P* au-dessus du plan de terre.
B. Rayon de l'espace qui doit être dégagé de tout objet étranger.
X. Plan que les organes du repère 4 ne doivent pas traverser à moins d'une distance *B* de *P*.

Note: La figure est dessinée à l'échelle pour un éclateur à sphères de 100 cm et un écartement égal au rayon.

1. Insulating support.
2. Sphere shank.
3. Operating gear, showing maximum dimensions.
4. High-voltage connection with series resistor.
5. Stress distributor, showing maximum dimensions.

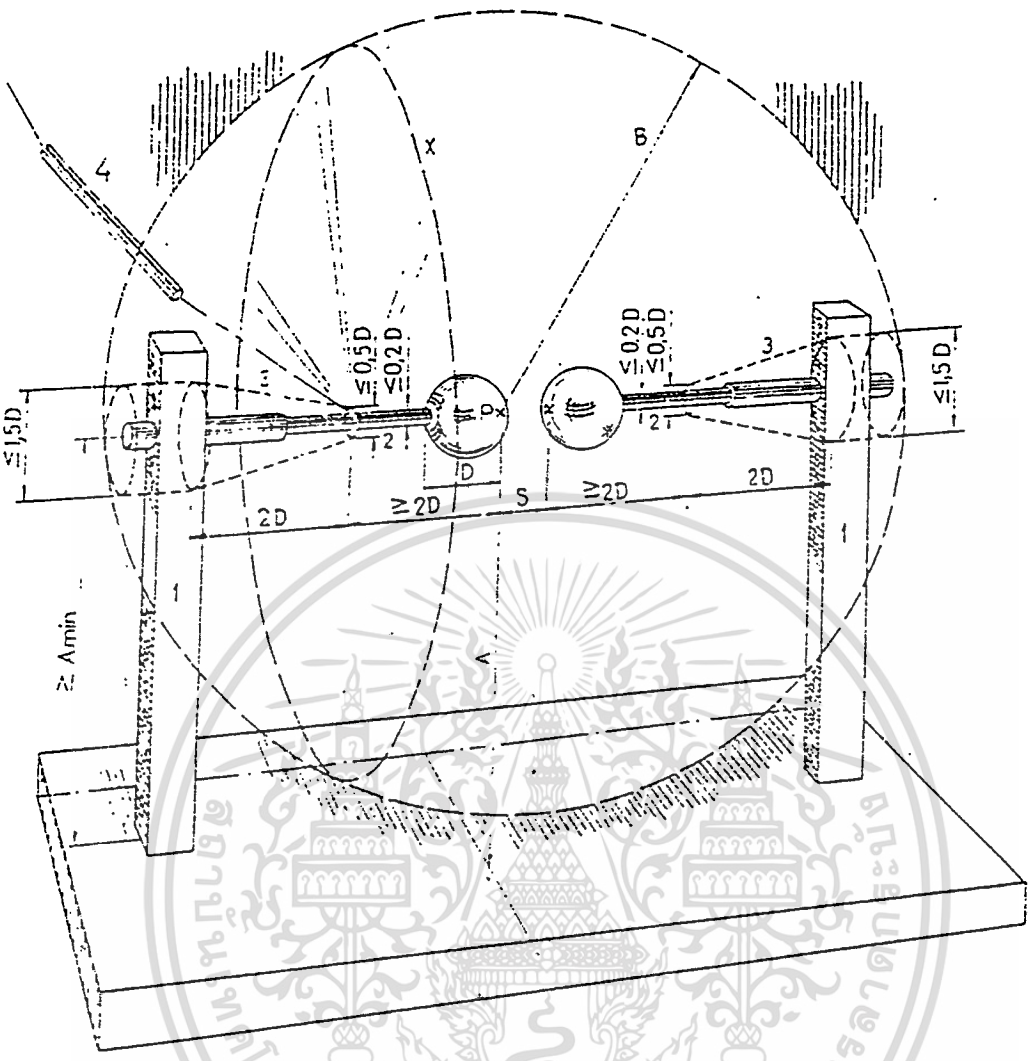
P. Sparking point of high-voltage sphere.
A. Height of *P* above earth plane.
B. Radius of space free from external structures.

X. Item 4 not to pass through this plane within a distance *B* from *P*.

Note. The figure is drawn to scale for a 100 cm sphere-gap at radius spacing.

Fig. 1. Eclateur à sphères vertical.
Vertical sphere-gap.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



1. Support isolant.
2. Tige support de la sphère.
3. Mécanisme de manœuvre avec dimensions maximales.
4. Connexion à haute tension avec résistance en série.

P. Point d'étincelle de la sphère haute tension.
A. Hauteur de *P* au-dessus du plan de terre.
B. Rayon de l'espace qui doit être dégagé de tout objet étranger.
X. Plan que les organes du repère 4 ne doivent pas traverser à moins d'une distance *B* de *P*.

Note: La figure est dessinée à l'échelle pour un éclateur à sphères de 25 cm et un écartement égal au rayon.

1. Insulating support.
2. Sphere shank.
3. Operating gear, showing maximum dimensions.
4. High-voltage connection with series resistor.

P. Sparking point of high-voltage sphere.
A. Height of *P* above earth plane.
B. Radius of space free from external structures.

X. Item 4 not to pass through this plane within a distance *B* from *P*.

Note: The figure is drawn to scale for a 25 cm sphere gap at radius spacing.

Fig. 2. Eclateur à sphères horizontal.
Horizontal sphere-gap.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายณรงค์ชัย สุ่มงาม
วัน/เดือน/ปีเกิด	วันที่ 10 มีนาคม พ.ศ. 2512
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	คณะวิศวกรรมศาสตร์สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง
สถานที่สำเร็จการศึกษา	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ปีที่สำเร็จการศึกษา	ปีการศึกษา 2532
ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์	1 ระบบสูญญากาศและการทดสอบการปั๊มอากาศออกจากแชมเบอร์(Chamber)เสมือน 2 การศึกษาคุณสมบัติของก๊าซในการเป็นฉนวนไฟฟ้า
รางวัลหรือทุนที่เคยได้รับ	1 ทุนงบประมาณแผ่นดิน 2 ทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์
ประสบการณ์การทำงาน	พนักงาน บริษัทแสงสุวรรณ จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้