



247087



คุณลักษณะการเปิดเบรกดาวนของงานวิจัยชนิดต่างๆ

นายวิชพงษ์ เทียนกระโทก

วิทยานิพนธ์นี้เขียนขึ้นเป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

พ.ศ. 2554



247087



คุณลักษณะการเกิดเบรกดาวนซ์ของฉนวนก๊าซชนิดต่างๆ

นายวิหพงษ์ เทียมกระโทก

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

พ.ศ. 2554

คุณลักษณะการเกิดเบรกดาว์ของฉนวนก๊าซชนิดต่างๆ

นายวิพงษ์ เทียมกระโทก วศ.บ. (วิศวกรรมไฟฟ้า)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2554

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....
(ผศ.ดร. มงคล กงศ์หิรัญ)

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....
(ผศ.ดร. สุภกิตต์ โชติโก)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

.....
(ผศ.ดร. สมพร สิริสำราญกุล)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	คุณลักษณะการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนก๊าซชนิดต่างๆ
หน่วยกิต	12
ผู้เขียน	นายวิษพงษ์ เทียมกระโทก
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.สุภกิตต์ โชติโก
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
พ.ศ.	2554

บทคัดย่อ

247087

ปัจจุบันอุปกรณ์ในระบบ Gas Insulated Substation (GIS) เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์, สวิตช์กราวด์, บัสบาร์ และหม้อแปลงแรงดัน เป็นต้น ใช้ก๊าซ SF₆ เป็นฉนวนเพราะก๊าซ SF₆ มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าดี และสามารถดับอาร์กได้ดี อย่างไรก็ตามก๊าซ SF₆ ทำให้เกิดสถานะเรือนกระจกเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และมีราคาแพง ดังนั้นในงานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซ Ar, He, O₂, CO₂, Air, N₂ และสัดส่วนของก๊าซ SF₆ ที่ 75%, 50% และ 25% ในก๊าซผสม SF₆-N₂ เพื่อเปรียบเทียบกับก๊าซ SF₆ วิธีการศึกษาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนก๊าซจะทดสอบภายใต้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ความถี่ 50 Hz โดยใช้ Chamber ที่ออกแบบตามมาตรฐาน American Society for Testing and Materials (ASTM) D 2477-96 ทดสอบด้วยอิเล็กโตรดแบบปลายแหลม-ระนาบ ทรงกลม-ระนาบ และระนาบ-ระนาบ ซึ่งทำมาจากวัสดุสแตนเลส ระยะแก๊ปที่ใช้ในการทดสอบคือ 5, 10, 15 และ 20 มิลลิเมตร ที่ความดันก๊าซ 1, 2 และ 3 บาร์ จากผลการทดสอบพบว่าค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของ Air กับ N₂ มีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าใกล้เคียงกันที่ระยะแก๊ปและความดันเดียวกัน และก๊าซที่มีความหนาแน่นสูงจะมีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าก๊าซที่มีความหนาแน่นต่ำ

คำสำคัญ : ก๊าซ / ฉนวน / แรงดันเบรกดาวน์ / ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า

Thesis Title	Breakdown Characteristics of Insulated Gases
Thesis Credits	12
Candidate	Mr. Witchapong Tiamkatok
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Supakit Chotigo
Program	Master of Engineering
Field of Study	Electrical Engineering
Department	Electrical Engineering
Faculty	Engineering
B.E.	2554

Abstract

247087

At present, equipment used in Gas Insulated Substation (GIS) such as circuit breakers, ground switches, busbars and transformers use SF₆ as their insulation because of its better electrical withstand and arc quenching. However, SF₆ has high cost. Furthermore, it causes green house effect and poisonous environment. In this research, the withstand voltage of Ar, He, O₂, CO₂, Air, N₂ and the mixtures of SF₆-N₂ containing 75%, 50% and 25% of SF₆ was studied and compared with that of pure SF₆. The withstand voltage of each gas under 50 Hz AC voltage was studied using a chamber designed according to American Society for Testing and Materials (ASTM) D 2477-96 which consists of rod-plane, sphere-plane and plane-plane gap made of stainless steel. Gap distances in this experiment were 5, 10, 15 and 20 mm. while the gas pressures were controlled at 1, 2 and 3 bars. The results showed that Air and N₂ had similar withstand voltage at the same gap distance and pressure. Furthermore, gas with a higher density had a higher electrical withstand voltage than that of the gas with lower density.

Keywords : Gases / Insulated / Breakdown Voltage / Dielectric Strengths

กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประสบผลสำเร็จไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับคำปรึกษา ความช่วยเหลือ และคำชี้แนะที่มีคุณค่าอย่างยิ่งต่องานวิจัยนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ศุภกิตต์ โชติโก อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้แนวทางศึกษาวิจัย วิธีการแก้ไขปัญหางานวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่ให้ความอนุเคราะห์ก๊าซใน ไตรเจน ออกซิเจน อีเลียม อาร์กอน สำหรับนำมาใช้ในการทดสอบ ขอขอบคุณ คุณเพ็ญพิมล เต็กชื่น และคุณนลินรัตน์ ลิมพานิชที่ให้ความช่วยเหลือในการอัดก๊าซ และให้ข้อแนะนำอันเป็นประโยชน์แก่งานวิจัย

ขอขอบคุณ คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาจุลชีววิทยา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่ให้ความอนุเคราะห์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ สำหรับนำมาใช้ในการทดสอบ ขอขอบคุณอาจารย์อองอาจ วัฒนชัยยิ่งยง ที่ให้ความช่วยเหลือในการอัดก๊าซ

ขอขอบคุณ กองฝ่ายบำรุงรักษาไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตบางกรวย ที่ให้ความอนุเคราะห์ก๊าซ SF_6 สำหรับนำมาใช้ในการทดสอบ

ขอขอบคุณคณาจารย์ เจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ เจ้าหน้าที่สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีทุกท่านที่ให้ความสะดวกในการทำงานวิจัย ทั้งทางด้านเบิกจ่ายงบประมาณ เครื่องมือ-อุปกรณ์การทดสอบ และค้นคว้าหาข้อมูล ขอขอบคุณสำหรับการช่วยเหลือ และการสนับสนุนต่างๆ ในระหว่างการวิจัยจากนิสิต เพื่อนๆ พี่น้องในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีทุกท่าน

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่สนับสนุน ให้โอกาส และความปรารถนาดี แก่ข้าพเจ้าเสมอมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	จ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	ฉ
รายการตาราง	ช
รายการรูปประกอบ	ฌ
รายการสัญลักษณ์	ด
ประมวลศัพท์และคำย่อ	ท

บทที่

1. บทนำ	1
1.1 ที่มาและปัญหาของงานวิจัย	1
1.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	8
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	8
1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย	9
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	9
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	10
2.1 ลักษณะสมบัติธรรมชาติของก๊าซ	10
2.2 การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนก๊าซ	12
2.3 ไอออนไนเซชันและการปล่อยอิเล็กตรอน	12
2.4 กลไกเบรกดาวน์ในก๊าซ (Mechanisms breakdown)	17
2.5 ลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้า (Electric field configuration)	23

2.6	ความน่าจะเป็นในการเบรกควาน์	28
2.7	วิธีการทดสอบจ่ายแรงดันต่อเนื่อง (Successive discharge test)	28
2.8	กฎความดันย่อยของคอลลัตัน	29
2.9	ก๊าซผสม SF ₆ -N ₂	30
2.10	การวัดแรงดันสูงด้วยโวลเตจดีไวเซอร์	31
2.11	มาตรฐาน American Society for Testing and Materials (ASTM) D 2477-96	33
3.	ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	35
3.1	ฉนวนก๊าซที่ใช้ในการทดสอบ	35
3.2	ชุดทดสอบ	36
3.3	วงจรที่ใช้ในการทดสอบ	38
3.4	เงื่อนไขในการทดสอบ	39
3.5	ขั้นตอนในการทดสอบ	40
4.	ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล	43
4.1	รูปคลื่นแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ	43
4.2	ผลการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนก๊าซชนิดต่างๆ	44
4.3	ผลการเปรียบเทียบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนก๊าซชนิดต่างๆ	59
4.4	ผลการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากรณีสัดส่วนของก๊าซ SF ₆ ในก๊าซผสม SF ₆ -N ₂	67
4.5	ผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนก๊าซอิเล็กทรอนิกส์แบบปลายแหลม-ระนาบ ทรงกลม-ระนาบ และระนาบ-ระนาบ ที่ความดัน 1, 2 และ 3 บาร์ ระยะแก๊ป 5, 10, 15 และ 20 มิลลิเมตร	73
4.6	การเปรียบเทียบรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเมื่อเกิดเบรกควาน์ในฉนวนก๊าซชนิดต่างๆ	94
5.	สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ	105
5.1	สรุปผลการทดสอบ	105

5.2	ข้อเสนอแนะ	106
	เอกสารอ้างอิง	107
	ภาคผนวก	111
ก	การเผยแพร่ผลงานวิจัย	111
ข	ค่าแรงดันเบรกคาวน์ และข้อมูลทางสถิติของค่าแรงดันเบรกคาวน์ของฉนวนก๊าซ อิเล็กทรอนิกส์แบบปลายแหลม-ระนาบ	120
ค	ค่าแรงดันเบรกคาวน์ และข้อมูลทางสถิติของค่าแรงดันเบรกคาวน์ของฉนวนก๊าซ อิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลม-ระนาบ	137
ง	ค่าแรงดันเบรกคาวน์ และข้อมูลทางสถิติของค่าแรงดันเบรกคาวน์ของฉนวนก๊าซ อิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบ-ระนาบ	154
จ	แบบชุดทดสอบเบรกคาวน์	171
ฉ	แบบอิเล็กทรอนิกส์แรงสูง และอิเล็กทรอนิกส์กราวด์	173
	ประวัติผู้วิจัย	175

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 คุณสมบัติของก๊าซ	4
2.1 คุณสมบัติของก๊าซชนิดต่างๆที่ใช้ในการทดสอบ	10
2.2 ค่าคงตัว A และ B ของก๊าซชนิดต่างๆ	14
2.3 ค่าเวิร์กฟังก์ชันการทำงานของธาตุบางชนิด	16
3.1 ชนิดของก๊าซ ค่าความดัน ระยะแกป และอิเล็กโตรดต่างๆที่ใช้ในการทดสอบ	39
3.2 สัดส่วนของก๊าซ SF ₆ และ N ₂ ในก๊าซผสม SF ₆ -N ₂ ที่ความดัน 3 บาร์ ระยะแกป และอิเล็กโตรดต่างๆที่ใช้ในการทดสอบ	39
4.1 แสดงราคาของก๊าซชนิดต่างๆ	72
ข.1 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซ He อิเล็กโตรดแบบปลายแหลม-ระนาบ	121
ข.2 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซ Ar อิเล็กโตรดแบบปลายแหลม-ระนาบ	122
ข.3 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซ CO ₂ อิเล็กโตรดแบบปลายแหลม-ระนาบ	123
ข.4 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซ O ₂ อิเล็กโตรดแบบปลายแหลม-ระนาบ	124
ข.5 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซ N ₂ อิเล็กโตรดแบบปลายแหลม-ระนาบ	125
ข.6 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ของ Air อิเล็กโตรดแบบปลายแหลม-ระนาบ	126
ข.7 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซ SF ₆ อิเล็กโตรดแบบปลายแหลม-ระนาบ	127
ข.8 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ของสัดส่วนก๊าซ SF ₆ ที่ 25%, 50% และ 75% ที่ความดัน 3 บาร์ ในก๊าซผสม SF ₆ -N ₂ อิเล็กโตรดแบบปลายแหลม-ระนาบ	128
ข.9 ข้อมูลทางสถิติค่าแรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซ He อิเล็กโตรดแบบปลายแหลม-ระนาบ	129
ข.10 ข้อมูลทางสถิติค่าแรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซ Ar อิเล็กโตรดแบบปลายแหลม-ระนาบ	130
ข.11 ข้อมูลทางสถิติค่าแรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซ CO ₂ อิเล็กโตรดแบบปลายแหลม-ระนาบ	131
ข.12 ข้อมูลทางสถิติค่าแรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซ O ₂ อิเล็กโตรดแบบปลายแหลม-ระนาบ	132
ข.13 ข้อมูลทางสถิติค่าแรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซ N ₂ อิเล็กโตรดแบบปลายแหลม-ระนาบ	133
ข.14 ข้อมูลทางสถิติค่าแรงดันเบรกดาวน์ของ Air อิเล็กโตรดแบบปลายแหลม-ระนาบ	134
ข.15 ข้อมูลทางสถิติค่าแรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซ SF ₆ อิเล็กโตรดแบบปลายแหลม-ระนาบ	135

	ในก๊าซผสม SF ₆ -N ₂ อิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ	
ง.9	ข้อมูลทางสถิติค่าแรงดันเบรกดาวนซ์ของก๊าซ He อิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ	163
ง.10	ข้อมูลทางสถิติค่าแรงดันเบรกดาวนซ์ของก๊าซ Ar อิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ	164
ง.11	ข้อมูลทางสถิติค่าแรงดันเบรกดาวนซ์ของก๊าซ CO ₂ อิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ	165
ง.12	ข้อมูลทางสถิติค่าแรงดันเบรกดาวนซ์ของก๊าซ O ₂ อิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ	166
ง.13	ข้อมูลทางสถิติค่าแรงดันเบรกดาวนซ์ของก๊าซ N ₂ อิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ	167
ง.14	ข้อมูลทางสถิติค่าแรงดันเบรกดาวนซ์ของ Air อิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ	168
ง.15	ข้อมูลทางสถิติค่าแรงดันเบรกดาวนซ์ของก๊าซ SF ₆ อิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ	169
ง.16	ข้อมูลทางสถิติค่าแรงดันเบรกดาวนซ์ของสัดส่วนก๊าซ SF ₆ ที่ 25%, 50% และ 75% ที่ ความดัน 3 บาร์ในก๊าซผสม SF ₆ -N ₂ อิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ	170

รายการรูปประกอบ

รูป	หน้า
1.1	แสดงค่าแรงดันเบรกดาวน์เปรียบเทียบกับความดัน ระยะแกป 5 มิลลิเมตร
1.2	ชุดทดสอบ วงจรและอุปกรณ์ในการทดสอบ
1.3	เกจวัดความดัน
1.4	ถังเหล็กกล้าปิดหมด
1.5	อิเล็กโตรดที่ใช้ในการทดสอบ
1.6	ค่าความคงทนต่อสนามไฟฟ้าเปรียบเทียบกับความดันก๊าซ
1.7	ค่าแรงดันเบรกดาวน์เปรียบเทียบกับอัตราส่วนของก๊าซผสม ที่ความดัน 0.1 MPa
1.8	แผนภาพชุดการทดลอง
1.9	GIS 25.8 kV และ โครงสร้างอิเล็กโตรด
1.10	ค่าแรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซ SF ₆ -CF ₄ ที่ความดัน 0.1 ถึง 0.4 MPa ที่ระยะแกป 1 mm. ภายใต้อำนาจไฟฟ้ากระแสสลับ
2.1	กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง α /p และ E/p ของก๊าซ N ₂ และ H ₂
2.2	รูปการเกิดอะวาลานซ์ของอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ
2.3	แสดงการเกิดเบรกดาวน์ของก๊าซ
2.4	กราฟความสัมพันธ์ของ Townsend (αd=k) และฟังก์ชัน α /p = f(E/p)
2.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรกดาวน์กับค่า pd หรือเรียกว่า Paschen’s curve
2.6	การเกิดโฟโตไอออไนเซชัน
2.7	การเกิดสตรีมเมอร์
2.8	อิเล็กโตรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ
2.9	แสดงเส้นศักย์เท่าและเส้นสนามไฟฟ้า
2.10	เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดลักษณะต่างๆ
2.11	ระบบวัดแรงดันสูงไฟฟ้ากระแสสลับ
2.12	ระบบวัดแรงดันสูงด้วยโวลเตจดิไวเดอร์
2.13	ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงแบบใช้ตัวเก็บประจุย่อยต่ออันดับ

2.14	ชุดทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 2477-96	34
3.1	ปั๊มลมสำหรับใช้อัดอากาศ	35
3.2	ท่อก๊าซสำหรับนำก๊าซมาทดสอบ	36
3.3	ชุดทดสอบ (Chamber)	36
3.4	อิเล็กโตรด 1. ปลายแหลม 2.ทรงกลม และ 3.ระนาบ	37
3.5	ไมโครมิเตอร์	37
3.6	วงจรสมมูลที่ใช้ในการทดสอบ	38
3.7	ภาพถ่ายวงจรที่ใช้ในการทดสอบจริง	38
3.8	ปั๊มสุญญากาศ	40
3.9	เร็กกูเลเตอร์	41
3.10	เกจวัดความดันแบบดิจิตอล	41
4.1	รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้ทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนก๊าซ	43
4.2	รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเมื่อเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนก๊าซ	44
4.3	ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซ He อิเล็กโตรดแบบปลายแหลม-ระนาบ	44
4.4	ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซ Ar อิเล็กโตรดแบบปลายแหลม-ระนาบ	45
4.5	ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซ CO ₂ อิเล็กโตรดแบบปลายแหลม-ระนาบ	46
4.6	ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซ O ₂ อิเล็กโตรดแบบปลายแหลม-ระนาบ	46
4.7	ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซ N ₂ อิเล็กโตรดแบบปลายแหลม-ระนาบ	47
4.8	ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของ Air อิเล็กโตรดแบบปลายแหลม-ระนาบ	47
4.9	ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซ SF ₆ อิเล็กโตรดแบบปลายแหลม-ระนาบ	48
4.10	ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซ He อิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ระนาบ	49
4.11	ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซ Ar อิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ระนาบ	50
4.12	ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซ CO ₂ อิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ระนาบ	50
4.13	ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซ O ₂ อิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ระนาบ	51
4.14	ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซ N ₂ อิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ระนาบ	52
4.15	ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของ Air อิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ระนาบ	52
4.16	ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซ SF ₆ อิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ระนาบ	53

ที่ระยะแก๊ป 15 มิลลิเมตร อิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ	
4.35 ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซ He, Ar, CO ₂ , O ₂ , N ₂ , Air และ SF ₆	66
ที่ระยะแก๊ป 20 มิลลิเมตร อิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ	
4.36 ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซ SF ₆ ที่สัดส่วน 0%, 25%, 50%, 75% และ 100%	67
ที่ความดัน 3 บาร์ ในก๊าซผสม SF ₆ -N ₂ อิเล็กโตรดแบบปลายแหลม-ระนาบ	
4.37 ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซ SF ₆ ที่สัดส่วน 25%, 50% และ 75% ที่ความดัน	67
3 บาร์ ในก๊าซผสม SF ₆ -N ₂ อิเล็กโตรดแบบปลายแหลม-ระนาบ	
4.38 ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซ SF ₆ ที่สัดส่วน 0%, 25%, 50%, 75% และ 100%	68
ที่ความดัน 3 บาร์ ในก๊าซผสม SF ₆ -N ₂ อิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ระนาบ	
4.39 ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซ SF ₆ ที่สัดส่วน 25%, 50% และ 75% ที่ความดัน	69
3 บาร์ ในก๊าซผสม SF ₆ -N ₂ อิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ระนาบ	
4.40 ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซ SF ₆ ที่สัดส่วน 0%, 25%, 50%, 75% และ 100%	70
ที่ความดัน 3 บาร์ ในก๊าซผสม SF ₆ -N ₂ อิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ	
4.41 ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซ SF ₆ ที่สัดส่วน 25%, 50% และ 75% ที่ความดัน	70
3 บาร์ ในก๊าซผสม SF ₆ -N ₂ อิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ	
4.42 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซ SF ₆ , N ₂ และสัดส่วนของก๊าซ SF ₆ ที่ 20%, 10% และ 1%	72
ที่ความดัน 3 บาร์ ในก๊าซผสม SF ₆ +N ₂	
4.43 ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซ He อิเล็กโตรดแบบต่างๆที่ความดัน 1 บาร์	73
4.44 ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซ He อิเล็กโตรดแบบต่างๆที่ความดัน 2 บาร์	74
4.45 ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซ He อิเล็กโตรดแบบต่างๆที่ความดัน 3 บาร์	75
4.46 ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซ Ar อิเล็กโตรดแบบต่างๆที่ความดัน 1 บาร์	76
4.47 ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซ Ar อิเล็กโตรดแบบต่างๆที่ความดัน 2 บาร์	77
4.48 ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซ Ar อิเล็กโตรดแบบต่างๆที่ความดัน 3 บาร์	78
4.49 ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซ CO ₂ อิเล็กโตรดแบบต่างๆที่ความดัน 1 บาร์	79
4.50 ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซ CO ₂ อิเล็กโตรดแบบต่างๆที่ความดัน 2 บาร์	80
4.51 ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซ CO ₂ อิเล็กโตรดแบบต่างๆที่ความดัน 3 บาร์	81
4.52 ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซ O ₂ อิเล็กโตรดแบบต่างๆที่ความดัน 1 บาร์	82
4.53 ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซ O ₂ อิเล็กโตรดแบบต่างๆที่ความดัน 2 บาร์	83

4.87	รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเมื่อเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนก๊าซ SF ₆ -N ₂ อิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ	103
จ.1	แบบชุดทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย	172
ฉ.1	อิเล็กโตรดแรงสูง (1, 2 และ 4) และอิเล็กโตรดกราวด์ (3) ทำมาจากวัสดุแสดงนเลส	174

รายการสัญลักษณ์

A	=	พื้นที่หน้าตัด
C	=	ตัวเก็บประจุ
d	=	ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด (cm)
E	=	ความเครียดสนามไฟฟ้า ณ จุดใด ๆ ระหว่างอิเล็กโตรด (V/cm)
E _{av}	=	ความเครียดสนามไฟฟ้าเฉลี่ย
E _b	=	ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์
E _i	=	ความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มเกิด (V/cm)
E _{max}	=	ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด
h	=	ค่าคงตัวของ Plank (6.6257×10^{-34} J · s)
K	=	Boltzman's gas constant เท่ากับ $R / N_0 = 1.3804 \times 10^{-23}$ J/K
M	=	มวลโมเลกุล
N	=	จำนวนโมเลกุลใน 1 cm ³ เท่ากับ N_0 / V_0
n	=	จำนวนมวลของก๊าซ หน่วยเป็น (g/mole)
N ₀	=	จำนวนโมเลกุลในหนึ่งกรัมโมล
p	=	ความดันก๊าซ
PA	=	ความดันย่อยของก๊าซ A (bar)
PB	=	ความดันย่อยของก๊าซ B (bar)
Pt	=	ความดันรวมของก๊าซ (bar)
R	=	ค่าคงตัวของก๊าซทั่วไป เท่ากับ 8.3143 J/K mole
T	=	อุณหภูมิสมบูรณ์ (K)
T _b	=	จุดหลอมเหลว (K)
U	=	แรงดันที่ป้อนระหว่างอิเล็กโตรด (V)
U _b	=	แรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ด้วยสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (V)
U _i	=	แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนขณะเริ่มเกิดโคโรนา (Corona Inception Voltage) (V)
U _{50%}	=	แรงดันเบรกดาวน์ 50%
V	=	ปริมาตรของก๊าซ
V ₀	=	ปริมาตรกรัมโมลของก๊าซ
W _i	=	ค่าพลังงานไอออไนเซชัน
Z _{hv}	=	อิมพีแดนซ์ภาคแรงสูง
Z _{lv}	=	อิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำ

α	=	สัมประสิทธิ์การชนแตกตัวด้วยอิเล็กตรอนชนกับ โมเลกุล
β	=	สัมประสิทธิ์การชนของไอออน
η^*	=	แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (Field Utilization Factor)
μ	=	สภาพการเคลื่อนที่ (Mobility) ของอนุภาค
λ	=	ระยะอิสระเฉลี่ย

ประมวลศัพท์และคำย่อ

Ag	=	Silver
Air	=	อากาศ
Al	=	Aluminium
Ar	=	Argon
ASTM	=	American Society for Testing and Materials
CF ₄	=	Carbon Tetrafluoride or Tetrafluoromethane
cm	=	Centimeter
CO ₂	=	Carbon Dioxide
Cu	=	Copper
eV	=	Electronvolts
Fe	=	Iron
FS	=	Full Scale
GIS	=	Gas Insulated Switchgear
GWP	=	Global Warming Potential
g/m ³	=	Gram Per Cubic meter
He	=	Helium
HP grade	=	High Purity grade
Hz	=	Hertz
IEC	=	International Electrotechnical Commission
kpa	=	Kilopascal
kV	=	Kilovolts
kVrms	=	Kilovolts root mean square
mm	=	Millimeter
MPa	=	Megapascal
N ₂	=	Nitrogen
N ₂ O	=	Nitrous Oxide
O ₂	=	Oxygen
pF	=	Picrofarad
SF ₆	=	Sulphurhexafluoride
V/cm	=	Volt Per Centimeter

W	=	Tungsten
°C	=	Degree Celsius
Ω	=	Ohm