

คุณลักษณะแรงดัน-เวลาของก๊าซ SF₆ - N₂ ภายใต้แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน
ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ



นายปิ่นศักดิ์ เณศ ลำเลิศประเสริฐ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-2549-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

VOLTAGE-TIME CHARACTERISTICS OF SF₆ – N₂ GAS UNDER STANDARD LIGHTNING
IMPULSE VOLTAGE IN NONUNIFORM FIELD



Mr.Pinkanate Lumlertprasert

สถาบันวิทยบริการ

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineer

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-2549-3

ปิ่นศักดิ์ เกษต์ ล้ำเลิศประเสริฐ : คุณลักษณะแรงดัน-เวลาของก๊าซ SF₆ - N₂ ภายใต้แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (VOLTAGE-TIME CHARACTERISTICS OF SF₆ - N₂ GAS UNDER STANDARD LIGHTNING IMPULSE VOLTAGE IN NONUNIFORM FIELD) อ. ที่ปรึกษา : ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์, 75 หน้า. ISBN 974-17-2549-3.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอผลการศึกษาคูณลักษณะของแรงดัน-เวลาของฉนวนก๊าซผสม SF₆ - N₂ ที่เปลี่ยนแปลงไปตามสัดส่วนผสมของก๊าซทั้งสองชนิด โดยศึกษาการเกิดเบรกดาวนซ์ของแก๊ปเนื่องจากแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าระหว่างอิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ระนาบ ที่มีระยะแก๊ป 10 และ 20 ม.ม. ความดันก๊าซ 2 บาร์ และ 3 บาร์ ทั้งช่วงแรงดันบวกและลบ จากผลการศึกษสามารถสรุปได้ว่า คุณลักษณะแรงดัน-เวลาของก๊าซผสม SF₆ - N₂ จะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของก๊าซ SF₆ ในก๊าซผสม SF₆ - N₂ ในทุกกรณีการศึกษา โดยพบว่าในช่วงอิมพัลส์บวกขนาดแรงดันเบรกดาวนซ์สูงกว่าช่วงลบ ในทุกสัดส่วนของก๊าซผสม SF₆ - N₂ และ เมื่อระยะแก๊ปเพิ่มขึ้นเส้นคุณลักษณะแรงดัน-เวลาก็คงยับสูงขึ้นเช่นเดียวกันกับในกรณีที่มีความดันเพิ่มขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อ.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2545.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4370388421 : ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORDS : VOLTAGE-TIME CHARACTERISTICS / SF₆-N₂ / GASES MIXTURE /
LIGHTNING IMPULSE BREAKDOWN VOLTAGE

PINKANATE LUMLERTPRASERT: VOLTAGE-TIME CHARACTERISTICS OF
SF₆ - N₂ GAS UNDER STANDARD LIGHTNING IMPULSE VOLTAGE IN
NONUNIFORM FIELD. THESIS ADVISOR : KOMSON PETCHARAKS,
Dr.Sc.Techn. 75 pp. ISBN 974-17-2549-3.

This thesis presents the study of voltage-time characteristics of SF₆ - N₂ gas mixture under standard lightning impulse voltage in nonuniform field by the variation of gas content in the range between 0 to 100 %; the gap spacing of 10 mm and 20 mm; gas pressure of 2 bar and 3 bar; positive and negative polarities. The results show that the voltage-time characteristics of SF₆ - N₂ gas mixture are increased with the amount of SF₆ gas in all cases. The voltage-time characteristics are also increased with both gap spacing and gas pressure. The positive breakdown voltage is always higher than the negative one for all ratio of the SF₆ - N₂ gas mixture.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Electrical Engineering

Field of study Electrical Engineering

Academic year 2002

Student's signature

Advisor's signature

Co-advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจาก อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรวิเศษ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้แนวทางศึกษาวิจัย วิธีการแก้ไข ปัญหาจนวนิพนธ์เสร็จสมบูรณ์ ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สุชุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร และ อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมมงคล ที่ช่วยตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณกองสวัสดิศกษเกียร ฝายบำรุงรักษาระบบส่ง การไฟฟ้าฝายผลิตแห่งประเทศไทยที่ อนุเคราะห์มอบก๊าซ SF₆ เพื่อใช้ในการทดลอง ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่มอบก๊าซไนโตรเจนเพื่อใช้ในการทดลอง ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ มอบทุนอุดหนุนโครงการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณอาจารย์ ดร.วีรพันธ์ รังสีวิจิตรประภา คุณถาวร เอื้อดี คุณเกรียงไกร โขษฐิธนู คุณอรรรณพ ลิ้มสีมารัตน์ คุณพีรวุฒิ ยุทธโกวิท และคุณนรณัฐ ตปนียพันธ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ในการใช้อุปกรณ์วัดและอุปกรณ์ทดสอบในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง รวมทั้งให้คำแนะนำในการ ทดลองมาโดยตลอด ขอขอบคุณเพื่อนพี่น้องในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงท่านอื่นที่ไม่ได้กล่าวถึง ที่ช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และแลกเปลี่ยนความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่สนับสนุน ให้โอกาส และความ ปรารถนาดีแก่ข้าพเจ้าเสมอมา

ปิ่นทศณศ ล้ำเลิศประเสริฐ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อวิทยานิพนธ์.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 บทนำทั่วไป.....	1
1.2 ที่มาของปัญหา.....	1
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	2
1.6 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	2
2. ฉนวนก๊าซ.....	3
2.1 ก๊าซ SF ₆ (Sulphur Hexafluoride).....	3
2.1.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของก๊าซ SF ₆	3
2.1.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของก๊าซ SF ₆	3
2.1.3 ก๊าซ SF ₆ ในระบบไฟฟ้า.....	5
2.2 ก๊าซผสม SF ₆ - N ₂	5
2.3 การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนก๊าซ.....	6
2.3.1 ไอออไนเซชัน (Ionization).....	6
2.3.1.1 ไอออไนเซชันโดยการชน (Collision Ionization).....	6
2.3.1.2 โฟโตไอออไนเซชัน(Photo Ionization).....	6
2.3.1.3 เทอร์มัลไอออไนเซชัน(Thermal Ionization).....	7
2.3.2 กลไกการเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซ.....	7
2.3.2.1 กลไกเบรกดาวน์ของทาว์นเซนด์.....	7

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
2.3.2.2 กลไกเบรกดาวาร์แบบสตริมเมอร์	8
2.3.3 การเกิดเบรกดาวาร์ของแรงดันอิมพัลส์.....	9
2.3.3.1 เวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวาร์.....	9
2.3.3.2 เส้นคุณลักษณะแรงดัน-เวลา.....	10
2.3.3.3 ความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวาร์	11
3. การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีทางสถิติ.....	13
3.1 สถิติพื้นฐาน.....	13
3.1.1 ตัวแปรสุ่ม	13
3.1.2 การวัดแนวโน้มสู่ส่วนกลาง (Central Tendency)	13
3.2 ฟังก์ชันความน่าจะเป็น.....	14
3.2.1 การกระจายแบบปกติ.....	15
3.2.2 การกระจายแบบล็อกปกติ	15
3.3 วิธีกราฟความน่าจะเป็น.....	17
3.3.1 การหาความน่าจะเป็นสะสม.....	17
3.3.2 การสร้างกราฟความน่าจะเป็นและการหาค่าพารามิเตอร์	19
3.3.2.1 การกระจายแบบปกติ	19
3.3.2.2 การกระจายแบบล็อกปกติ.....	20
4. การทดลอง	22
4.1 ชุดทดลอง	22
4.2 วงจรทดลอง	23
4.3 เงื่อนไขทดลอง	24
4.4 ขั้นตอนการทดลอง.....	25
4.4.1 การเตรียมชุดทดลอง.....	25
4.4.2 การบรรจุและควบคุมความดันก๊าซในชุดทดลอง	25
4.4.3 การปรับระยะแกป	26
4.4.4 การป้อนแรงดันและการเก็บข้อมูล	26
5. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	28
5.1 ผลของสัดส่วนของก๊าซ SF ₆ ในก๊าซผสม SF ₆ - N ₂ ต่อคุณลักษณะแรงดัน-เวลา	32

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
5.2 ผลของระยะแกปและชั่วแรงแง่งตันต่อคุณลักษณะแ่งตัน-เวลา	36
5.3 ผลของความดันและชั่วแรงแง่งตันต่อคุณลักษณะแ่งตัน-เวลา	40
5.4 ค่า $V_{50\%}$	43
6. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	45
6.1 สรุปผลการทดลอง	45
6.2 ข้อเสนอแนะ	45
รายการอ้างอิง	46
ภาคผนวก ก. Least Square Estimation	50
ก.1 Regression ตามแนวแกน y	50
ก.2 Regression ตามแนวแกน x	51
ก.3 Correlation Coefficient	51
ภาคผนวก ข. ข้อมูลแ่งตันและเวลาเบรกดาวนั	52
ข.1 ข้อมูลเบรกดาวนัที่ P = 2 บาร์, g = 10 ม.ม.	53
ข.2 ข้อมูลเบรกดาวนัที่ P = 2 บาร์, g = 20 ม.ม.	57
ข.3 ข้อมูลเบรกดาวนัที่ P = 3 บาร์, g = 10 ม.ม.	61
ภาคผนวก ค. ข้อมูลแ่งตันจากวิธีปรับระดับแ่งตันขึ้นลง	65
ค.1 ข้อมูลจากวิธีปรับระดับแ่งตันขึ้นลง ที่ P = 2 บาร์, g = 10 ม.ม.	65
ค.2 ข้อมูลจากวิธีปรับระดับแ่งตันขึ้นลง ที่ P = 2 บาร์, g = 20 ม.ม.	68
ค.3 ข้อมูลจากวิธีปรับระดับแ่งตันขึ้นลง ที่ P = 3 บาร์, g = 10 ม.ม.	71
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนั	75

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Y และ $F(Y)$ ในกรณีที่ข้อมูล T มีการกระจายแบบปกติ.....	20
4.1 ตารางเงื่อนไขการทดลองเมื่อกำหนดความดันคงที่เท่ากับ 2 บาร์.....	24
4.2 ตารางเงื่อนไขการทดลองเมื่อกำหนดระยะแถบคงที่เท่ากับ 10 ม.ม.....	24
5.1 ค่า $V_{50\%}$ ในเงื่อนไขการทดลองที่ ความดัน 2 บาร์ ระยะแถบ 10 ม.ม.....	43
5.2 ค่า $V_{50\%}$ ในเงื่อนไขการทดลองที่ ความดัน 2 บาร์ ระยะแถบ 20 ม.ม.....	44
5.3 ค่า $V_{50\%}$ ในเงื่อนไขการทดลองที่ ความดัน 3 บาร์ ระยะแถบ 10 ม.ม.....	44
ข.1 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $P = 2$ บาร์, $g = 10$ ม.ม., $F = 0\%$ ชั้วบวก.....	53
ข.2 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $P = 2$ บาร์, $g = 10$ ม.ม., $F = 0\%$ ชั้วลบ.....	53
ข.3 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $P = 2$ บาร์, $g = 10$ ม.ม., $F = 25\%$ ชั้วบวก.....	54
ข.4 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $P = 2$ บาร์, $g = 10$ ม.ม., $F = 25\%$ ชั้วลบ.....	54
ข.5 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $P = 2$ บาร์, $g = 10$ ม.ม., $F = 50\%$ ชั้วบวก.....	55
ข.6 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $P = 2$ บาร์, $g = 10$ ม.ม., $F = 50\%$ ชั้วลบ.....	55
ข.7 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $P = 2$ บาร์, $g = 10$ ม.ม., $F = 100\%$ ชั้วบวก.....	56
ข.8 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $P = 2$ บาร์, $g = 10$ ม.ม., $F = 100\%$ ชั้วลบ.....	56
ข.9 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $P = 2$ บาร์, $g = 20$ ม.ม., $F = 0\%$ ชั้วบวก.....	57
ข.10 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $P = 2$ บาร์, $g = 20$ ม.ม., $F = 0\%$ ชั้วลบ.....	57
ข.11 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $P = 2$ บาร์, $g = 20$ ม.ม., $F = 25\%$ ชั้วบวก.....	58
ข.12 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $P = 2$ บาร์, $g = 20$ ม.ม., $F = 25\%$ ชั้วลบ.....	58
ข.13 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $P = 2$ บาร์, $g = 20$ ม.ม., $F = 50\%$ ชั้วบวก.....	59
ข.14 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $P = 2$ บาร์, $g = 20$ ม.ม., $F = 50\%$ ชั้วลบ.....	59
ข.15 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $P = 2$ บาร์, $g = 20$ ม.ม., $F = 100\%$ ชั้วบวก.....	60
ข.16 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $P = 2$ บาร์, $g = 20$ ม.ม., $F = 100\%$ ชั้วลบ.....	60
ข.17 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $P = 3$ บาร์, $g = 10$ ม.ม., $F = 0\%$ ชั้วบวก.....	61
ข.18 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $P = 3$ บาร์, $g = 10$ ม.ม., $F = 0\%$ ชั้วลบ.....	61
ข.19 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $P = 3$ บาร์, $g = 10$ ม.ม., $F = 25\%$ ชั้วบวก.....	62
ข.20 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $P = 3$ บาร์, $g = 10$ ม.ม., $F = 25\%$ ชั้วลบ.....	62
ข.21 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $P = 3$ บาร์, $g = 10$ ม.ม., $F = 50\%$ ชั้วบวก.....	63

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 สัมประสิทธิ์ไอออไนเซชันประสิทธิผล ($\alpha-\eta$)/P ของอากาศและก๊าซ SF ₆	4
2.2 เวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวน์.....	9
2.3 คุณลักษณะแรงดัน-เวลา	10
2.4 ความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวน์.....	11
3.1 กราฟความน่าจะเป็นของการกระจายแบบปกติ.....	20
4.1 ชุดทดลอง.....	22
4.2 วงจรทดลอง.....	23
5.1 ตัวอย่างข้อมูลคุณลักษณะแรงดัน-เวลาของอิมพัลส์ 1.2/50 μ s ที่ได้จากการทดลอง.....	28
5.2 ตัวอย่างรูปแบบที่ใช้เข้ารูปคุณลักษณะแรงดัน-เวลา	29
5.3 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของก๊าซผสม ที่ระยะแกป 10 ม.ม. ความดัน 2 บาร์ ชั่วบวก.....	30
5.4 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของก๊าซผสม ที่ระยะแกป 10 ม.ม. ความดัน 2 บาร์ ชั่วลบ.....	30
5.5 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของก๊าซผสม ที่ระยะแกป 20 ม.ม. ความดัน 2 บาร์ ชั่วบวก.....	30
5.6 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของก๊าซผสม ที่ระยะแกป 20 ม.ม. ความดัน 2 บาร์ ชั่วลบ.....	31
5.7 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของก๊าซผสม ที่ระยะแกป 10 ม.ม. ความดัน 3 บาร์ ชั่วบวก.....	31
5.8 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของก๊าซผสม ที่ระยะแกป 10 ม.ม. ความดัน 3 บาร์ ชั่วลบ.....	31
5.9 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาของก๊าซผสมที่ ระยะแกป 10 ม.ม. ความดัน 2 บาร์ ชั่วบวก	33
5.10 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาของก๊าซผสมที่ ระยะแกป 10 ม.ม. ความดัน 2 บาร์ ชั่วลบ	33
5.11 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาของก๊าซผสมที่ ระยะแกป 20 ม.ม. ความดัน 2 บาร์ ชั่วบวก.....	34
5.12 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาของก๊าซผสมที่ ระยะแกป 20 ม.ม. ความดัน 2 บาร์ ชั่วลบ.....	34
5.13 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาของก๊าซผสมที่ ระยะแกป 10 ม.ม. ความดัน 3 บาร์ ชั่วบวก.....	35
5.14 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาของก๊าซผสมที่ ระยะแกป 10 ม.ม. ความดัน 3 บาร์ ชั่วลบ.....	35
5.15 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาของระยะแกป 10 และ 20 ม.ม. ของอิมพัลส์ชั่วบวกและชั่วลบ.....	
ที่ความดัน 2 บาร์ สัดส่วนของก๊าซ SF ₆ ในก๊าซผสม SF ₆ - N ₂ 0%.....	37
5.16 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาของระยะแกป 10 และ 20 ม.ม. ของอิมพัลส์ชั่วบวกและชั่วลบ.....	
ที่ความดัน 2 บาร์ สัดส่วนของก๊าซ SF ₆ ในก๊าซผสม SF ₆ - N ₂ 25%.....	37
5.17 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาของระยะแกป 10 และ 20 ม.ม. ของอิมพัลส์ชั่วบวกและชั่วลบ ..	
ที่ความดัน 2 บาร์ สัดส่วนของก๊าซ SF ₆ ในก๊าซผสม SF ₆ - N ₂ 50%.....	38

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.18 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาของระยะแกป 10 และ 20 ม.ม. ของอิมพัลส์ข้าวบวกและข้าวลบ.....	
ที่ความดัน 2 บาร์ สัดส่วนของก๊าซ SF ₆ ในก๊าซผสม SF ₆ - N ₂ 100%	38
5.19 ลักษณะแรงดัน-เวลา ภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอ	39
5.20 ผลของระยะแกปต่อคุณลักษณะแรงดัน-เวลาของก๊าซ SF ₆	40
5.21 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาของความดัน 2 และ 3 บาร์ ของอิมพัลส์ข้าวบวกและข้าวลบ.....	
ที่ระยะแกป 10 ม.ม. สัดส่วนของก๊าซ SF ₆ ในก๊าซผสม SF ₆ - N ₂ 0%.....	41
5.22 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาของความดัน 2 และ 3 บาร์ ของอิมพัลส์ข้าวบวกและข้าวลบ.....	
ที่ระยะแกป 10 ม.ม. สัดส่วนของก๊าซ SF ₆ ในก๊าซผสม SF ₆ - N ₂ 25%.....	41
5.23 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาของความดัน 2 และ 3 บาร์ ของอิมพัลส์ข้าวบวกและข้าวลบ.....	
ที่ระยะแกป 10 ม.ม. สัดส่วนของก๊าซ SF ₆ ในก๊าซผสม SF ₆ - N ₂ 50%.....	42
5.24 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาของความดัน 2 และ 3 บาร์ ของอิมพัลส์ข้าวบวกและข้าวลบ.....	
ที่ระยะแกป 10 ม.ม. สัดส่วนของก๊าซ SF ₆ ในก๊าซผสม SF ₆ - N ₂ 100%	42
n.1 Least Square ตามแนวแกน y และ x.....	50

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำทั่วไป

ตามมาตรฐานการป้องกันในระบบไฟฟ้าแรงสูง อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงต้องมีการประสานสัมพันธ์กัน (Insulation Coordination) ข้อมูลสำคัญที่ใช้สำหรับการประสานสัมพันธ์กันคือคุณลักษณะแรงดัน-เวลาของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ายอดแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์และเวลาเบรกดาวน์ รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ป้อนให้กับอุปกรณ์สามารถมีได้หลายรูปคลื่น เช่น รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าหรือ รูปคลื่นแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์ เมื่อนำเส้นคุณลักษณะแรงดัน-เวลาของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ได้จากการป้อนแรงดันอิมพัลส์มาเปรียบเทียบกันก็จะทราบว่าอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ามีการประสานสัมพันธ์กันดีพอหรือไม่

นอกจากนี้คุณลักษณะแรงดัน-เวลาของอุปกรณ์ไฟฟ้าแสดงถึงความคงทนต่อแรงดันเกินของอุปกรณ์ด้วย โดยทั่วไปอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบแรงสูงมีลักษณะสนามไฟฟ้าภายในแบบไม่สม่ำเสมอซึ่งจะส่งผลต่อความคงทนต่อแรงดันเกินของอุปกรณ์ ถ้าสนามไม่สม่ำเสมอมากแรงดันเบรกดาวน์จะลดลงที่เวลาช่วงท้ายของคุณลักษณะแรงดัน-เวลา นอกจากนี้ความคงทนต่อแรงดันเกินของอุปกรณ์ยังขึ้นกับชนิดของฉนวน ซึ่งฉนวนที่ใช้ในระบบไฟฟ้าแรงสูงมีทั้งฉนวนแข็ง ฉนวนเหลว และฉนวนก๊าซ

ข้อได้เปรียบของฉนวนก๊าซที่เหนือกว่าฉนวนแข็ง และฉนวนเหลว คือความสามารถคืนสภาพความเป็นฉนวนได้หลังจากที่เกิดความบกพร่องขึ้นในระบบ (Self restoring) ทำให้ก๊าซฉนวนนิยมใช้เป็นฉนวนในอุปกรณ์มาตั้งแต่ในอดีต ก๊าซฉนวนที่นิยมใช้ เช่น อากาศ ก๊าซไนโตรเจน แต่ปัจจุบันก๊าซที่นิยมใช้กับอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าคือ ก๊าซ SF₆ (Sulphur Hexafluoride) ก๊าซ SF₆ เป็นฉนวนก๊าซที่มีคุณสมบัติการฉนวนทางไฟฟ้าที่ดีกว่าก๊าซชนิดอื่นเนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การจับอิเล็กตรอนสูง แต่ก๊าซ SF₆ เป็นก๊าซเรือนกระจก [1] จึงมีความพยายามที่จะใช้ก๊าซตัวนี้ให้น้อยลงโดยการใช้อนุพันธ์อื่น หรือ การหาก๊าซอื่นมาผสม และก๊าซที่นิยมมาใช้ผสมคือ ก๊าซไนโตรเจน (N₂) เนื่องจากเป็นก๊าซที่มีราคาถูกและไม่เป็นพิษ

1.2 ที่มาของปัญหา

ก๊าซ SF₆ ถูกใช้แพร่หลายในอุปกรณ์ไฟฟ้า แต่ก๊าซ SF₆ มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงมีความพยายามลดการใช้ก๊าซ SF₆ โดยหาก๊าซอื่น เช่น ไนโตรเจนมาผสม ที่ผ่านมามีงานวิจัยเกี่ยวกับการเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซ SF₆ ก๊าซ N₂ และก๊าซผสม SF₆ - N₂ ทั้งในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

และไม่สม่ำเสมอ เพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์ของสัดส่วนของก๊าซผสม $SF_6 - N_2$ บางงานวิจัยศึกษาคุณลักษณะแรงดัน-เวลาของก๊าซ SF_6 จึงเกิดแนวคิดที่ว่าถ้าทำวิจัยเรื่องคุณลักษณะแรงดัน-เวลาของก๊าซ $SF_6 - N_2$ โดยการเปลี่ยนสัดส่วนของก๊าซผสม และตัวแปรที่มีผลต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าอื่นๆ เช่น ความดัน ระยะเวลา รั้วแรงดันอิมพัลส์ โดยกำหนดรายละเอียดในวัตถุประสงค์ของการวิจัยและขอบเขตการวิจัย

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนของก๊าซผสม $SF_6 - N_2$, ความดันก๊าซ, ระยะเวลา, และรั้วแรงดันที่มีต่อคุณลักษณะแรงดัน-เวลาของก๊าซผสม $SF_6 - N_2$ ภายใต้แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน (1.2/50 μs) ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ เพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบการประสานสัมพันธ์ฉนวน

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

ทดลองหาคุณลักษณะแรงดัน-เวลาของฉนวนก๊าซ $SF_6 - N_2$ ภายใต้แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานทั้งแรงดันรั้วบวกและแรงดันรั้วลบในอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลม-ระนาบ ในเงื่อนไขการทดลองต่างๆ ได้แก่ การปรับเปลี่ยนสัดส่วนของก๊าซ SF_6 ในก๊าซผสม $SF_6 - N_2$ จาก 0 ถึง 100% ระยะเวลา 10 ม.ม. และ 20 ม.ม. ความดันสัมบูรณ์ 2 บาร์ และ 3 บาร์ ที่สภาวะมาตรฐาน ศึกษาผลของเงื่อนไขการทดลองที่มีผลต่อคุณลักษณะแรงดัน-เวลาของฉนวนก๊าซผสม $SF_6 - N_2$

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

ทำให้ทราบแนวโน้มของความสัมพันธ์ของคุณลักษณะแรงดัน-เวลาของก๊าซ $SF_6 - N_2$ ในระบบต่อปัจจัยอื่นและสามารถนำผลการทดลองไปออกแบบการฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้า

1.6 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการของกระบวนการเกิดเบรกดาวนซ์ของก๊าซ ทฤษฎีของก๊าซ ศึกษาคุณลักษณะแรงดัน-เวลาและคุณสมบัติของฉนวนก๊าซ $SF_6 - N_2$ โดยค้นคว้าจากเอกสาร หนังสือ และงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์
2. ออกแบบและประกอบสร้างชุดทดลอง
3. ทดลองหาคุณลักษณะการเกิดเบรกดาวนซ์ของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานของก๊าซผสม $SF_6 - N_2$ ตามขอบเขตการวิจัย
4. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลองพร้อมทั้งเขียนรายงานวิทยานิพนธ์เสนอต่อคณะกรรมการ

บทที่ 2

ฉนวนก๊าซ

2.1 ก๊าซ SF₆ (Sulphur Hexafluoride)

ฉนวนก๊าซที่ใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้ามีการพัฒนาปรับปรุงเพื่อให้ประสิทธิภาพของการฉนวนดีขึ้นมาโดยตลอด ก๊าซ SF₆ ก็เป็นฉนวนหนึ่งที่ถูกพัฒนาขึ้น ประกอบด้วยโมเลกุลก้ำมะถันกับฟลูออรีน เป็นก๊าซที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีกับสารอื่น คุณสมบัติทางฟิสิกส์ เคมี และไฟฟ้าแสดงในหัวข้อ 2.1.1 และ 2.1.2

2.1.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของก๊าซ SF₆

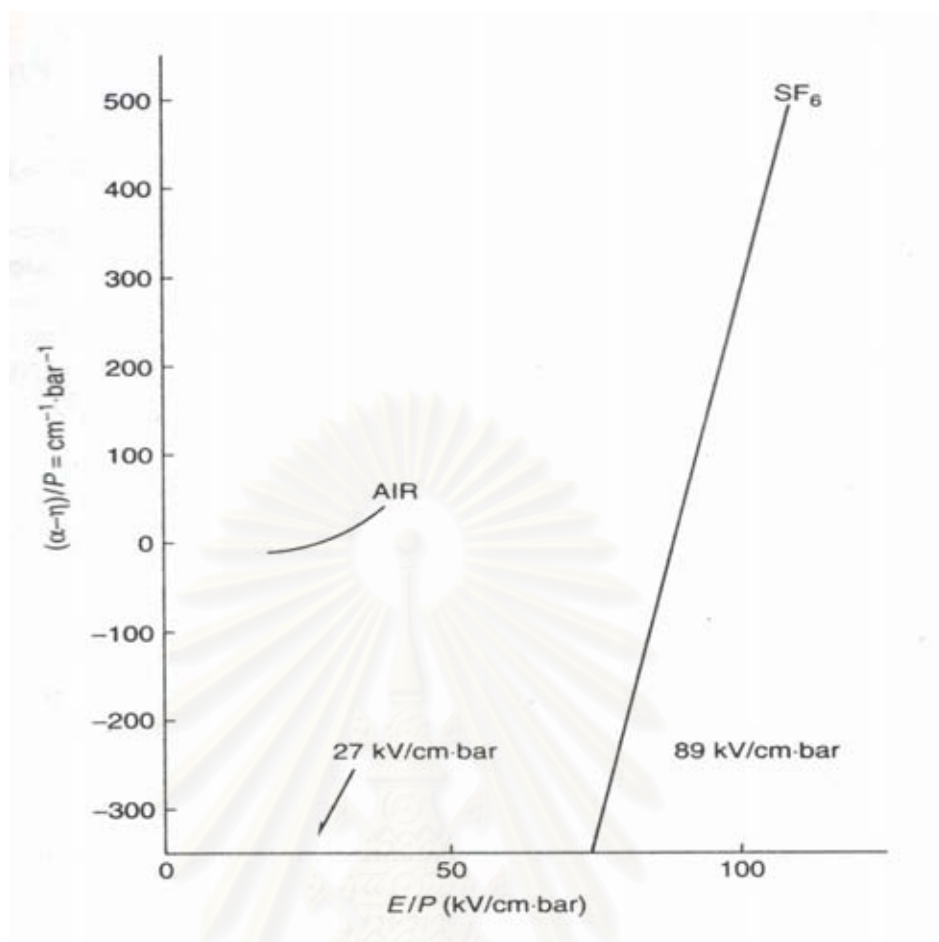
ก๊าซ SF₆ มีเสถียรภาพต่อความร้อนและปฏิกิริยาเคมี เป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่ติดไฟ ไม่เป็นพิษ ไม่ช่วยให้ไฟติด มีคุณสมบัติทั่วไปดังนี้ [1]-[3]

น้ำหนักโมเลกุล	146.06
จุดหลอม	-50.8 °c
จุดหลุมวิฤติ	45.6 °c
ความดันวิฤติ	36.75 atm
ความหนาแน่นวิฤติ	0.73 kg/Liter
ความหนาแน่นไอ	6.16 kg/Liter
ความดันไอที่ 20 °c	20.74 atm

2.1.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของก๊าซ SF₆

ก๊าซ SF₆ มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าฉนวนก๊าซอื่น เช่นมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าอากาศ 2.5 เท่า ที่ความดันบรรยากาศ เพราะก๊าซ SF₆ มีสัมประสิทธิ์ไอออไนเซชันประสิทธิผล ($\alpha-\eta$) ต่ำกว่าอากาศมากเมื่อเทียบในสนามไฟฟ้าเดียวกัน [4] โดยอากาศและก๊าซ SF₆ มีสนามไฟฟ้าวิฤติที่ 27 และ 89 kV/cm bar ตามลำดับ ดังในรูปที่ 2.1 นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าอื่นๆ ดังนี้

ความคงทนไดอิเล็กตริก	2.3 ถึง 2.5 (เทียบกับของไนโตรเจนซึ่งเท่ากับ 1)
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ 25 °c	1.002
แทนเจนต์ความสูญเสีย	2×10^{-7} ถึง 4×10^{-7} ขึ้นกับความดัน



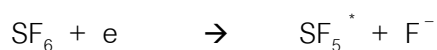
รูปที่ 2.1 สัมประสิทธิ์ไอออไนเซชันประสิทธิผล ($\alpha-\eta$)/P ของอากาศและก๊าซ SF₆

ก๊าซ SF₆ มีคุณสมบัติจับอิเล็กตรอนได้ดี (Electronegative Gases) [3] เมื่ออิเล็กตรอนอิสระที่เกิดจากการไอออไนเซชันไปเกาะโมเลกุลก๊าซที่เป็นกลาง กลายเป็นไอออนลบ ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลพอๆ กับไอออนบวกที่เคลื่อนที่ช้า พลังงานจากการเคลื่อนที่ของไอออนลบในสนามไฟฟ้าไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดไอออไนเซชันได้ ระยะเวลาที่อิเล็กตรอนจึงเกิดยากขึ้นและช้าลง ทำให้ SF₆ มีค่าแรงดันเบรกดาวน์สูง กระบวนการที่อิเล็กตรอน (e) ไปเกาะบนโมเลกุลก๊าซเกิดไอออนลบสามารถเขียนเหตุการณ์ต่างๆ ได้ดังนี้

1) อิเล็กตรอนอิสระเกาะบนโมเลกุลที่อยู่ในสถานะพื้นตัวโดยตรง เกิดเป็นไอออนลบที่เสถียร



2) โมเลกุลก๊าซจับอิเล็กตรอนอิสระทำให้เกิดการแยกตัว (* สภาวะตื่นเต้นกระตุ้น excitation)



3) อิเล็กตรอนอิสระวิ่งชนโมเลกุลทำให้ได้พลังงานเพิ่มเกิดไอออนบวก ไอออนลบ และอิเล็กตรอน



แต่ถ้าอิเล็กตรอนอิสระมีพลังงานมากพอที่จะทำให้เกิดไอออนในเซชัน หลังจากอิเล็กตรอนอิสระวิ่งชนโมเลกุลแล้วจะไม่เกิดไอออนลบแต่จะทำให้อิเล็กตรอนอิสระหลุดออกมาจากโมเลกุล



2.1.3 ก๊าซ SF₆ ในระบบไฟฟ้า

อุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า เช่นในระบบส่งพลังงานไฟฟ้า และระบบจำหน่ายพลังงานไฟฟ้า เช่น สถานีไฟฟ้าย่อยที่ใช้ก๊าซเป็นฉนวน(Gas-Insulated Substation_GIS) [5] อุปกรณ์ทุกตัวในระบบ GIS เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ อุปกรณ์ตัดตอน สวิตช์กราวด์ บัสบาร์ และหม้อแปลงแรงดัน เป็นต้น จะถูกฉนวนไว้ด้วยก๊าซ SF₆ เพราะนอกจากจะมีความคงทนไฟฟ้าที่ดีกว่าแล้วยังใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อยกว่าด้วย นอกจากนี้ในเซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดที่ใช้ก๊าซ SF₆ เป็นฉนวนยังมีประสิทธิภาพเหนือกว่าเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบน้ำมันหรือแบบอากาศทั่วไป คือสามารถดับอาร์กได้ดี (Arc Quenching) ด้วยเหตุนี้จึงมีการใช้ก๊าซ SF₆ อย่างแพร่หลาย

2.2 ก๊าซผสม SF₆ - N₂

แม้ว่าก๊าซ SF₆ จะมีคุณสมบัติที่ดีดังที่กล่าวมาแล้ว แต่ก๊าซ SF₆ เป็นก๊าซก่อสภาวะเรือนกระจกที่ดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้ดีซึ่งมีความสามารถทำให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้นมากกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ประมาณ 25,000 เท่า และก๊าซ SF₆ สูญสลายในสิ่งแวดล้อมยาก จึงมีปริมาณก๊าซ SF₆ สะสมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ [6] นอกจากนี้ยังมีราคาแพง และก๊าซผลพลอยได้ (byproduct) ที่ได้จากการเบรกตัวของก๊าซ SF₆ ซึ่งเป็นสารประกอบของกำมะถัน (ซัลเฟอร์) นั้นเป็นพิษต่อร่างกายและสิ่งแวดล้อม เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์(SO₂) ซัลเฟอร์เททระฟลูออไรด์(SF₄) กรดไฮโดรฟลูออริก(HF) เป็นต้น [7] ดังนั้นจึงมีความพยายามลดปริมาณการใช้ก๊าซ SF₆ โดยวิธีต่างๆ เช่นการหาก๊าซชนิดอื่นที่ดีกว่า การนำก๊าซ SF₆ กลับมาใช้ใหม่ การหาก๊าซอื่นมาผสมเพื่อลดปริมาณการใช้ ก๊าซที่นิยมมาใช้ผสมคือ ก๊าซไนโตรเจน(N₂) เนื่องจากเป็นก๊าซที่มีราคาถูก หาได้ง่าย และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ก๊าซไนโตรเจนยังเป็นก๊าซที่มีคุณสมบัติลดพลังงานอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นจากสนามไฟฟ้าให้ต่ำลงหรือช้าลง เพื่อให้ก๊าซ SF₆ จับอิเล็กตรอนได้อย่างมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น [8],[9] และไนโตรเจนมีความไวต่อการเกิดเบรกตัว

ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ(เช่น ผิวนิโคโรนที่ขรุขระมีปลายแหลม หรืออนุภาคฝุ่นผงในก๊าซ) น้อยกว่าก๊าซ Electronegative Gases อื่น [10]

2.3 การเกิดเบรกดาวนในฉนวนก๊าซ

เบรกดาวนจะเกิดได้ต้องมีอะวาลานซ์ของอิเล็กตรอน ซึ่งเกิดจากสององค์ประกอบคือการมีอิเล็กตรอนอิสระเริ่มต้น และ สนามไฟฟ้าที่ป้อนมีค่าสูงเพียงพอที่ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่และมีพลังงานเพียงพอที่เกิดไอออไนเซชันสร้างอิเล็กตรอนอะวาลานซ์ ก๊าซจะเสียสภาพความเป็นฉนวนไปเมื่อเกิดเบรกดาวนด้วยกระบวนการไอออไนเซชันและกลไกการเกิดเบรกดาวนในก๊าซ อย่างไรก็ตามสภาพการฉนวนจะกลับคืนสู่สภาพเดิมได้เมื่อแรงดันที่ทำให้เกิดดีสชาร์จหมดไป เช่น แรงดันเสริจหรืออิมพัลส์ [2],[4],[11]

2.3.1 ไอออไนเซชัน (Ionization)

ไอออไนเซชัน คือกระบวนการที่อิเล็กตรอนแยกออกจากโมเลกุลเกิดอิเล็กตรอน และ ไอออนบวกโดยถูกกระตุ้น เช่น อนุภาคประจุอิสระ(อิเล็กตรอน ไอออน และโฟตอน) เคลื่อนที่ไปชนโมเลกุลอื่นเกิดการแตกตัวของอิเล็กตรอนออกจากโมเลกุลของก๊าซ หรือ การได้รับพลังงานความร้อน รังสี หรือ ไอออนวิ่งมากระทบผิวนิโคโรน นำไปสู่เกิดกระบวนการเพิ่มขึ้นทวีคูณของอิเล็กตรอนและไอออนในแก๊ส

2.3.1.1 ไอออไนเซชันโดยการชน (Collision Ionization)

อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าเกิดการเคลื่อนที่เป็นพลังงานจลน์ อิเล็กตรอนวิ่งเข้าชนอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซ ถ้าพลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับจากสนามไฟฟ้านี้มีค่ามากกว่าพลังงานไอออไนเซชัน(Ionization Energy) W_i ของโมเลกุลของก๊าซ ก็จะเกิดไอออไนเซชันขึ้น ตามความสัมพันธ์ในสมการ (2.1)

$$\frac{1}{2}mv^2 \geq W_i \quad (2.1)$$

เมื่อเกิดไอออไนเซชันแล้วอิเล็กตรอนจะหลุดออกมาจากโมเลกุลเป็นไอออนบวก และ อิเล็กตรอนที่หลุดออกมานี้เคลื่อนที่ไปชนโมเลกุลก๊าซตัวอื่นแล้วให้อิเล็กตรอนตัวใหม่อีกเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เรียกว่า อะวาลานซ์ของอิเล็กตรอน (Electron Avalanche)

2.3.1.2 โฟโตไอออไนเซชัน(Photo Ionization)

เมื่อป้อนพลังงานให้แก่อะตอมหรือโมเลกุลก๊าซที่เป็นกลาง อิเล็กตรอนในอะตอมหรือโมเลกุลจะอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น (Excitation) แล้วอยู่ในสภาวะนั้นเป็นช่วงเวลาสั้นๆ ประมาณ 10^{-8} ถึง 10^{-7} วินาที อิเล็กตรอนจะปล่อยพลังงานที่รับมาในรูปของโฟตอน(Photon) แล้วกลับลงสู่

สภาวะปกติ(Ground State) ถ้าโฟตอนวิ่งเข้าไปกระทบกับอะตอมหรือโมเลกุลที่เป็นกลางตัวอื่น ก็อาจทำให้เกิดการไอออไนเซชัน การเกิดไอออไนเซชันเนื่องจากโมเลกุลรับพลังงานจากโฟตอน เรียกว่า โฟโตไอออไนเซชัน พลังงานโฟตอนที่ทำให้โมเลกุลของก๊าซเกิดไอออไนเซชันได้ต้องมีค่ามากกว่าพลังงานไอออไนเซชัน(Ionization Energy) W_i ของโมเลกุลของก๊าซ คือ

$$h\nu \geq W_i \quad (2.2)$$

โดยที่ h เป็นค่าคงตัวของพลังค์ มีค่า 6.6257×10^{-34} จูล-วินาที

ν เป็นความถี่ของโฟตอน

2.3.1.3 เทอร์มัลไอออไนเซชัน(Thermal Ionization)

เทอร์มัลไอออไนเซชันคือปรากฏการณ์ที่อะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซได้รับพลังงานความร้อนจนเกิดการไอออไนเซชัน เทอร์มัลไอออไนเซชันเกิดได้หลายสาเหตุ เช่น จากการชนกันเองของโมเลกุลหรืออะตอมที่มีความเร็วสูงหรือพลังงานจลน์สูงเนื่องจากอุณหภูมิสูง หรือจากก๊าซได้รับความร้อนทำให้อะตอมหรือโมเลกุลก๊าซปล่อยโฟตอนออกมาเกิดโฟตอนไอออไนเซชัน

2.3.2 กลไกการเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซ

ทฤษฎีอธิบายการเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซมี 2 ทฤษฎี คือ กลไกเบรกดาวน์ของทาวน์เซนต์ (Townsend Theory) และกลไกเบรกดาวน์แบบสตรีมเมอร์ (Streamer Theory) ทั้งสองทฤษฎีนี้ใช้พื้นฐานของการเกิดอะวาลานช์วิกฤติ (Critical Avalanche) เป็นจุดเปลี่ยนจากอะวาลานช์ไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ตามกลไกเบรกดาวน์ของทาวน์เซนต์ และจากอะวาลานช์ไปสู่สตรีมเมอร์ตามกลไกเบรกดาวน์แบบสตรีมเมอร์

2.3.2.1 กลไกเบรกดาวน์ของทาวน์เซนต์

กลไกเบรกดาวน์ของทาวน์เซนต์อธิบายการเกิดเบรกดาวน์ว่า เบรกดาวน์เกิดขึ้นจากจำนวนอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้นทวีคูณอย่างต่อเนื่องในแก๊ป และการเพิ่มขึ้นของอิเล็กตรอนสืบเนื่องมาจากไอออไนเซชันกระบวนการขั้นต้น (Primary process) หรือ (α - process) คืออิเล็กตรอนอิสระเริ่มต้นที่ได้รับพลังงานจากการเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้าวิ่งไปชนโมเลกุลทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากโมเลกุลเป็นอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มขึ้นทวีคูณเป็นอะวาลานช์ และ ไอ อ อ ไ น เซ ชั น กระบวนการขั้นสอง (Secondary process) ซึ่งประกอบด้วย ไอออไนเซชันจากไอออนบวกที่วิ่งชนโมเลกุลของก๊าซ (β - process) และกระบวนการเพิ่มทวีคูณของอิเล็กตรอนที่หลุดจากแคโทด (γ -process) ซึ่งเกิดจากไอออนบวกที่มีพลังงานมากพอวิ่งชนแคโทดทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากแคโทด

ในระหว่างที่อนุภาคประจุเคลื่อนที่ไประหว่างอิเล็กโตรดอาจชนและเกิดไอออนเซชันได้หลายครั้งก่อนที่จะถึง อิเล็กโตรด ทาวน์เซนต์ชี้ให้เห็นว่าจำนวนการเกิดไอออนเซชันต่อหนึ่งหน่วยระยะที่อนุภาคประจุเคลื่อนที่ไปกำหนดด้วยค่าสัมประสิทธิ์การเกิดไอออนเซชันของทาวน์เซนต์ (Townsend Ionization Coefficient) คือ α , β และ γ โดย α เป็นค่าเฉลี่ยของการชนไอออนเซชันของอิเล็กตรอน 1 ตัวที่เคลื่อนที่ไปในแก๊สระยะ 1 ซม. ส่วน β และ γ เป็นจำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดจากไอออนหนึ่งตัวชนอะตอมของก๊าซต่อหน่วยระยะทางตามแนวสนามไฟฟ้า แต่เนื่องจากไอออนบวกมีมวลมาก เคลื่อนที่ช้าจึงเกิดกระบวนการ β ได้ยาก ดังนั้นกระบวนการ γ จึงเป็นกระบวนการที่สำคัญการเกิดไอออนเซชันขั้นที่สอง ซึ่งอิเล็กตรอนที่เกิดจากกระบวนการ γ นี้มาจากสามสาเหตุคือ ไอออนบวกที่ชนแคโทด (γ_i), โฟตอนที่ชนแคโทด (γ_e) ทำให้โฟโตอิเล็กตรอน (Photo Electron) หลุดออกมา และ จากโฟตอนไอออนเซชัน (γ_p) ดังนั้น $\gamma = \gamma_i + \gamma_e + \gamma_p$ กระบวนการขั้นที่สองเหล่านี้อาจเกิดขึ้นในเวลาเดียวกันได้ อิเล็กตรอนที่เกิดจากกระบวนการขั้นที่สองนี้จะทำให้เกิดอะวาลานซ์เพิ่มขึ้น เกิดขึ้นซ้ำๆ จนเบรกดาวน

เงื่อนไขการเกิดเบรกดาวนซ์ของทาวน์เซนต์แสดงในสมการ (2.3)

$$\Gamma(e^{\alpha d} - 1) \geq 1 \quad (2.3)$$

โดย d คือระยะแก๊ส และ Γ มีค่าเป็น $\beta/\alpha + \gamma$

2.3.2.2 กลไกเบรกดาวนซ์แบบสตรีมเมอร์

การเกิดเบรกดาวนซ์ในก๊าซนั้น บางกรณีไม่สามารถอธิบายได้ด้วยกลไกเบรกดาวนซ์ตามทฤษฎีของทาวน์เซนต์ เช่น ในกรณีที่แก๊สมีลักษณะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง และในกรณีที่ช่องแก๊สห่างมากๆ กลไกเบรกดาวนซ์แบบสตรีมเมอร์อธิบายการเกิดเบรกดาวนซ์ในสนามไฟฟ้าที่กระจายแบบไม่สม่ำเสมอ

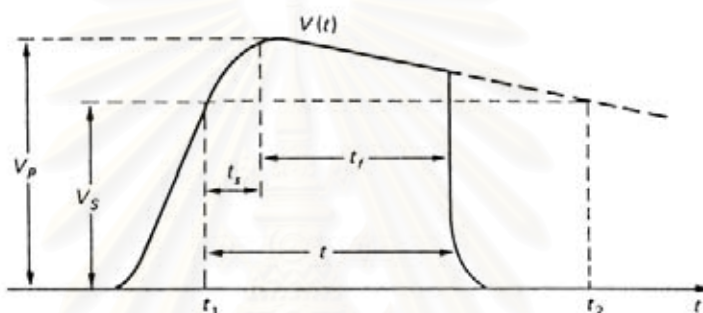
กลไกเบรกดาวนซ์แบบสตรีมเมอร์อธิบายการเกิดสปาร์กดีสชาร์จจากอะวาลานซ์เดี่ยวที่เป็นผลสืบเนื่องจากการว่องชนไอออนเซชันของทาวน์เซนต์ ประจุค้างที่เกิดจากอะวาลานซ์จะเปลี่ยนอะวาลานซ์ไปเป็นลำไอออนเซชันที่มีความเข้มสูงหรือสตรีมเมอร์ โดยเกิดโฟโตไอออนเซชันของก๊าซโมเลกุลที่บริเวณปลายหัวสตรีมเมอร์ ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ทำให้สภาพนำไฟฟ้าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและเกิดเบรกดาวนซ์ เรียกว่าสตรีมเมอร์เบรกดาวนซ์

เงื่อนไขการเกิดสตรีมเมอร์เบรกดาวนซ์ กำหนดด้วยสนามไฟฟ้าจากประจุค้าง โดยสตรีมเมอร์จะเกิดขึ้นเมื่ออะวาลานซ์มีจำนวนประจุเท่ากับอะวาลานซ์วิกฤตคือประมาณ 10^8 ตัว โดยไม่ขึ้นกับชนิดและความดันของก๊าซ หรือระดับความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้า

2.3.3 การเกิดเบรกดาวนของแรงดันอิมพัลส์

การป้อนแรงดันอิมพัลส์ให้อุปกรณ์ แรงดันจะคงอยู่ในช่วงเวลานั้นๆ เป็นไมโครวินาที ทำให้สนามไฟฟ้าจะคงอยู่ในช่วงเวลานั้นด้วย ดังนั้นถึงแม้ขนาดของแรงดันอิมพัลส์จะเท่ากับแรงดันสถานะอยู่ตัววิฤติ(Steady State Voltage, V_s) ก็ตามการเกิดเบรกดาวนในแก๊สจะไม่เกิดขึ้นทันที แต่จะต้องใช้ระยะเวลาช่วงหนึ่งจึงเกิดเบรกดาวน ช่วงเวลาดังแต่ขนาดแรงดันอิมพัลส์เท่ากับแรงดันสถานะอยู่ตัวไปจนถึงเวลาเบรกดาวนคือ เวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวน (Time Lag, t) [4]

2.3.3.1 เวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวน



รูปที่ 2.2 เวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวน

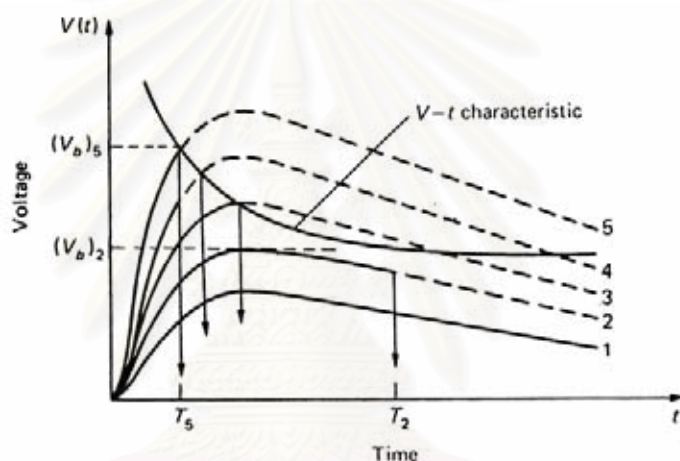
เวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวน ประกอบด้วยเวลาล่าช้าสถิติ (Statistic Time Lag, t_s) และเวลาล่าช้าก่อตัว (Formative Time Lag, t_f) $t = t_s + t_f$ ดังในรูปที่ 2.2 เวลาล่าช้าสถิติคือ เวลาช่วงหนึ่งที่มีอิเล็กตรอนอิสระซึ่งมีพลังงานเริ่มต้นมากพอที่จะทำให้เกิดอะวาลานซ์ได้กระจายในปริมาตรแก๊สเวลาที่ใช้หาอิเล็กตรอนเริ่มต้นมีค่าอยู่ในช่วงไมโครวินาทีถึงมิลลิวินาที [12] โอกาสที่จะพบอิเล็กตรอนระหว่างที่ป้อนแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งสนามไฟฟ้าจะคงตัวอยู่ในช่วงเวลานั้น ขึ้นกับธรรมชาติของแก๊สและปริมาตรแก๊สที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงพอ เวลาที่ใช้สร้างอิเล็กตรอนเริ่มต้นนี้จึงเป็นค่าทางสถิติ ส่วนเวลาล่าช้าก่อตัวคือเวลาในการไอออไนเซชันสร้างอิเล็กตรอนอะวาลานซ์และนำไปสู่การเบรกดาวนตามเงื่อนไขของทฤษฎีสตรีมเมอร์มีค่าอยู่ในช่วงไมโครวินาทีถึงนาโนวินาที

ถ้าเพิ่มระดับแรงดันที่ป้อนให้อิเล็กโตรดทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วย โอกาสที่อิเล็กตรอนจะสามารถทำหน้าที่เป็นอิเล็กตรอนเริ่มต้นเพื่อเกิดอะวาลานซ์ต่อไปก็จะมีมากขึ้น เวลาล่าช้าทางสถิติจึงลดลง เช่นเดียวกันเวลาล่าช้าก่อตัวจะมีค่าลดลงเพราะสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทำให้อิเล็กตรอนมีความเร็วมากขึ้น อิเล็กตรอนอิสระมีพลังงานเพียงพอที่จะก่อให้เกิดอะวาลานซ์และสตรีมเมอร์เร็วขึ้น ขนาดของแรงดันและช่วงเวลาคงอยู่ของแรงดันอิมพัลส์มีผลอย่างมากต่อเวลาล่าช้า เมื่อเพิ่มขนาดของแรงดันขึ้นเวลาล่าช้าจะลดลง จึงสามารถแสดงความคงทนของฉนวน

เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ที่มีรูปคลื่นเหมือนเดิมแต่เปลี่ยนแค่ขนาดค่ายอดแรงดันได้ด้วยเส้น
คุณลักษณะแรงดัน-เวลา (Voltage-Time Characteristics)

2.3.3.2 เส้นคุณลักษณะแรงดัน-เวลา

คุณลักษณะแรงดัน-เวลาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวนกับเวลา
เบรกดาวน สามารถหาคุณลักษณะแรงดัน-เวลาได้โดยการป้อนแรงดันอิมพัลส์ที่มีความชันต่าง ๆ
กันแล้ววัดค่าแรงดันเบรกดาวนและเวลาเบรกดาวนนำมาเขียนกราฟลักษณะแรงดัน-เวลา กรณีที่
เกิดการเบรกดาวนที่หน้าคลื่นค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวนคือแรงดัน ณ เวลาที่เกิดเบรกดาวน เช่น
จุดที่ (V_{B5}, T_5) แต่ถ้าเบรกดาวนที่หลังคลื่นค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวนคือค่ายอดแรงดันอิมพัลส์
กับเวลาเบรกดาวน (V_{B2}, T_2) ดังในรูปที่ 2.3

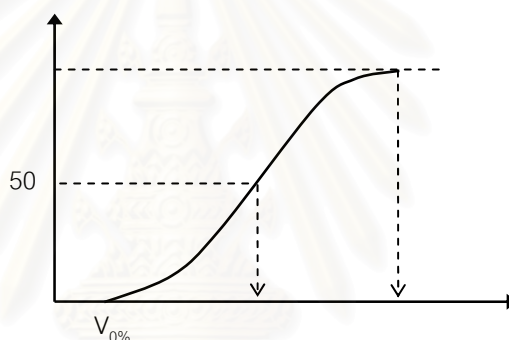


รูปที่ 2.3 คุณลักษณะแรงดัน-เวลา

การทดลองในวิทยานิพนธ์นี้สร้างคุณลักษณะแรงดัน-เวลาโดยใช้วิธีระดับแรงดันคงที่
(Constant Level Voltage) [4],[13],[14] โดยป้อนแรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่น
ตามที่ต้องการ ณ ค่ายอดคงที่ค่าหนึ่งเข้าอิเล็กทรอนิกส์ เมื่อเกิดเบรกดาวนก็บันทึกค่ายอดแรงดันเบรก
ดาวนและเวลาเบรกดาวนจนได้จำนวนข้อมูลการเบรกดาวนตามที่ต้องการ แล้วก็เปลี่ยนระดับค่า
ยอดแรงดันอิมพัลส์ที่ป้อนแล้วบันทึกแรงดันเบรกดาวนและเวลาเบรกดาวนเหมือนเดิม จนได้ข้อมูล
การเบรกดาวนครบทุกระดับแรงดันแล้ว นำข้อมูลเวลาเบรกดาวนในแต่ละระดับแรงดันไปทำการ
กระจายทางสถิติและหาค่ากลางทางสถิติของข้อมูลเวลาเบรกดาวน จากนั้นพล็อตกราฟระหว่าง
ค่ายอดแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวนเฉลี่ยกับค่ากลางของข้อมูลเวลาเบรกดาวนในแต่ละระดับแรงดัน
แล้วก็ลากเส้นเชื่อมจุดเหล่านี้เข้าด้วยกันก็จะได้เส้นคุณลักษณะแรงดัน-เวลา

2.3.3.3 ความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวน์

การป้อนแรงดันให้กับอุปกรณ์ทดสอบที่ระดับแรงดันหนึ่งมีโอกาสที่จะเกิดการเบรกดาวน์หรือไม่เบรกดาวน์ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระดับแรงดันป้อน โดยระดับแรงดันอิมพัลส์สูงสุดที่ไม่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ได้เลย ไม่ว่าจะป้อนแรงดันระดับนี้สักกี่ครั้ง เรียกว่า ระดับคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ (Impulse Withstand Level) หรือ $V_{0\%}$ เป็นค่ากำหนดการทดสอบการฉนวนที่ต้องทนต่อแรงดันอิมพัลส์ได้ (Basic Impulse Insulation Level_BIL) ส่วนที่ระดับแรงดันอิมพัลส์ต่ำสุดที่เกิดเบรกดาวน์ทุกครั้ง ไม่ว่าจะป้อนแรงดันกี่ครั้ง เรียกว่าระดับแรงดันป้องกัน (Protective Level) หรือ $V_{100\%}$ ถ้าเพิ่มแรงดันสูงกว่าระดับแรงดัน $V_{100\%}$ จะเกิดเบรกดาวน์ทุกครั้ง ส่วน $V_{50\%}$ คือ ค่ายอดแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์เป็นจำนวนครึ่งครึ่งหนึ่งของจำนวนครั้งที่ป้อนทั้งหมด แสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 2.4 [4],[15],[16]



รูปที่ 2.4 ความน่าจะเป็นในการเกิดเบรกดาวน์

โดยทั่วไปฟังก์ชันกระจายของแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์มีลักษณะประมาณเป็นฟังก์ชันการกระจายแบบปกติ (Normal Distribution) จึงสามารถหาค่า $V_{0\%}$ และ $V_{100\%}$ ได้โดยแทนการกระจายของข้อมูลใดๆ ด้วยฟังก์ชันการกระจายแบบปกติ

$$V_{0\%} = V_{50\%} - 3\sigma \quad (2.4)$$

$$V_{100\%} = V_{50\%} + 3\sigma \quad (2.5)$$

σ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

วิธีการหาค่า $V_{50\%}$ ที่นิยมใช้มี 2 วิธีได้แก่

1) วิธีเส้นกราฟแรงดันหลายระดับ (Multiple Level Voltage Method) หาค่า $V_{50\%}$ ด้วยเส้นกราฟความสัมพันธ์ของความน่าจะเป็นที่จะเกิดเบรกดาวน์กับค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ที่ป้อน เริ่มโดยป้อนแรงดันอย่างน้อย 20 ครั้งในแต่ละระดับแรงดัน ความแตกต่างของระดับแรงดันที่ป้อน ΔV ประมาณ 3% ของ $V_{50\%}$ ที่คาดหมาย โดยเลือกระดับแรงดันที่มีโอกาสเกิดเบรกดาวน์ทั้งค่าที่สูง

กว่าและค่าที่ต่ำกว่า 50% ความน่าจะเป็นของการเบรกดาวนในแต่ระดับแรงดันหาได้จากจำนวนครั้งที่เกิดเบรกดาวนต่อจำนวนครั้งที่ป้อนในแต่ละระดับแรงดัน

2) วิธีปรับขึ้นลง(Up and Down Method) หาค่า $V_{50\%}$ โดยเลือกระดับแรงดันค่าหนึ่งที่คาดว่าจะป้อนเข้าวัดทดสอบ ทุกครั้งที่ป้อนแรงดัน ถ้าหากไม่เกิดเบรกดาวนให้เพิ่มแรงดันขึ้น ΔV ถ้าหากเกิดเบรกดาวนให้ลดแรงดันลง ΔV โดย ΔV มีค่าประมาณ 3% ของค่า $V_{50\%}$ ที่คาดหมายเริ่มต้น ดังนั้นค่าแรงดันที่ป้อนต่อไปขึ้นกับผลจากป้อนแรงดันที่ผ่านมา จำนวนครั้งที่ป้อนแรงดันทั้งหมดควรมีค่าอย่างน้อย 20 ครั้งเป็น หาค่า $V_{50\%}$ ได้จากสมการ 2.6

$$V_{50\%} = \frac{\sum k_i V_i}{\sum k_i} \quad (2.6)$$

k_i คือจำนวนครั้งที่ป้อนแรงดันค่า V_i

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีทางสถิติ

เนื่องจากเวลาเบรกดาวนเป็นค่าทางสถิติมีค่าไม่แน่นอน การหาเวลาเบรกดาวนเพื่อใช้สร้างคุณลักษณะแรงดัน-เวลาต้องทราบรูปแบบการกระจายทางสถิติและค่าพารามิเตอร์ในฟังก์ชันการกระจายทางสถิติ ดังนั้นบทนี้จะกล่าวถึงพื้นฐานทางสถิติและลักษณะการกระจายของข้อมูล เพื่อใช้วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง [17],[18]

3.1 สถิติพื้นฐาน

3.1.1 ตัวแปรสุ่ม

ในการทดลองที่เหตุการณ์แต่ละเหตุการณ์จากการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกัน เรียกผลของเหตุการณ์ว่าตัวแปรสุ่ม ในที่นี้คือเวลาเบรกดาวน t ซึ่งเป็นตัวแปรสุ่มชนิดต่อเนื่อง และกำหนดให้ ฟังก์ชันการกระจายหรือฟังก์ชันความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่ม (Probability Density Function: pdf) คือ $f(t)$ และฟังก์ชันความน่าจะเป็นสะสม(Cumulative Density Function: cdf) คือ $F(t)$ ในที่นี้คือความน่าจะเป็นที่จะเกิดเบรกดาวน ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ (3.1)

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_{-\infty, \gamma}^t f(s) ds \quad (3.1)$$

3.1.2 การวัดแนวโน้มสู่ส่วนกลาง (Central Tendency)

การวัดแนวโน้มสู่ส่วนกลางเป็นการคำนวณค่ากลางของข้อมูลว่าอยู่ที่ใด ซึ่งค่ากลางที่บอกแนวโน้มสู่ส่วนกลางมี 3 ชนิด คือ

- 1) ค่าเฉลี่ย (Mean) คือผลรวมของข้อมูลต่อจำนวนข้อมูลทั้งหมด ค่าเฉลี่ยที่นิยมใช้คือค่าเฉลี่ยเลขคณิต
- 2) มัธยฐาน (Median) คือค่าของข้อมูลที่มีตำแหน่งอยู่ตรงกลางของชุดข้อมูล เมื่อนำข้อมูลมาเรียงลำดับจากค่าน้อยไปหามาก
- 3) ฐานนิยม (Mode) คือค่าของข้อมูลที่มีความถี่มากที่สุดในชุดข้อมูล

การพิจารณาเลือกค่าที่ใช้วัดค่ากลางว่าจะใช้ ค่าเฉลี่ย มัธยฐาน หรือฐานนิยม จะพิจารณาจากลักษณะการแจกแจงของข้อมูลว่าสมมาตรหรือไม่ ถ้าข้อมูลมีลักษณะค่อนข้างสมมาตร สามารถเลือกใช้ค่าเฉลี่ย มัธยฐาน หรือฐานนิยม ค่าใดค่าหนึ่งเป็นค่ากลางก็ได้ เพราะมี

ค่าใกล้เคียงกัน แต่ถ้าข้อมูลมีลักษณะไม่สมมาตร คือเบ้ซ้าย หรือเบ้ขวา นิยมใช้ มัชฌิมเป็นค่ากลาง

3.2 ฟังก์ชันความน่าจะเป็น

ฟังก์ชันความน่าจะเป็นที่ใช้วิเคราะห์อายุการใช้งานของอุปกรณ์มีพารามิเตอร์ 3 ตัว ได้แก่

1) scale parameter เป็นตัวบอกว่าฟังก์ชันความน่าจะเป็นนั้นมีการกระจายมากน้อยเพียงใด ในกรณีของฟังก์ชันการกระจายแบบปกติ scale parameter คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ฟังก์ชันความน่าจะเป็นทุกชนิดจะมีพารามิเตอร์ตัวนี้ ในกรณีที่ฟังก์ชันความน่าจะเป็นมีพารามิเตอร์เพียงตัวเดียว พารามิเตอร์นั้นก็จะเป็น scale parameter

2) shape parameter เป็นตัวกำหนดรูปร่างของฟังก์ชันความน่าจะเป็น pdf แต่ฟังก์ชันความน่าจะเป็นบางฟังก์ชันไม่มี shape parameter เพราะว่ามีรูปร่างที่แน่นอน เช่น ฟังก์ชันการกระจายแบบปกติ และฟังก์ชันการกระจายแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล

3) location parameter หรือ θ เป็นค่าที่ทำให้ฟังก์ชันความน่าจะเป็นเลื่อนไปทางด้านข้าง โดเมนของฟังก์ชันความน่าจะเป็นจึงเปลี่ยนจาก $[0, \infty]$ เป็น $[\theta, \infty]$ ในเรื่องการวิเคราะห์อายุการใช้งานของอุปกรณ์นั้นค่า θ จะมีค่าเป็นบวกเพราะอายุการใช้งานของอุปกรณ์ซึ่งเป็นค่าทางเวลาจะมีค่าเป็นลบไม่ได้

พารามิเตอร์ในฟังก์ชันความน่าจะเป็นเหล่านี้สามารถหาค่าจากข้อมูลได้หลายวิธี วิธีที่นิยมใช้หาค่าพารามิเตอร์[10] คือ

1) วิธีการพลาความน่าจะเป็น(Probability Plotting) เป็นการหาชนิดของฟังก์ชันความน่าจะเป็นและพารามิเตอร์ของชุดข้อมูล โดยสร้างกราฟระหว่างข้อมูลกับความน่าจะเป็นของข้อมูลแต่ละตัวบนกราฟความน่าจะเป็น กราฟความน่าจะเป็นนี้จะมีลักษณะของแกน y ที่แตกต่างกัน ขึ้นกับว่าเป็นกราฟความน่าจะเป็นของฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบใด เช่น แบบปกติ แบบเอ็กซ์โปเนนเชียล ถ้าจุดต่างๆบนกราฟเรียงตัวเป็นเส้นตรง แสดงว่า ข้อมูลชุดนั้นมีฟังก์ชันความน่าจะเป็นตามกราฟความน่าจะเป็นที่เลือก จากนั้นทำ Regression แบบ Least Square เพื่อให้ได้กราฟเส้นตรงผ่านจุดข้อมูลต่างๆ และหาพารามิเตอร์ของฟังก์ชันความน่าจะเป็นได้จากความชันและจุดตัดแกนของกราฟเส้นตรง

2) Maximum Likelihood Method (MLH) เป็นวิธีที่ใช้ในการหาพารามิเตอร์ของฟังก์ชันความน่าจะเป็นจากชุดข้อมูลใดๆ ซึ่งจะหาค่าพารามิเตอร์โดยไม่ขึ้นกับชนิดการกระจายของข้อมูล จำนวนข้อมูลที่ใช้คำนวณหาพารามิเตอร์มีผลต่อความคลาดเคลื่อนของการประมาณพารามิเตอร์ ถ้ามีจำนวนข้อมูลน้อยพารามิเตอร์ที่คำนวณจะมีความคลาดเคลื่อนสูง ความถูกต้องของพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากวิธีนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อข้อมูลมีจำนวนมากขึ้น ในกรณีที่ข้อมูลมีจำนวน

มาก ๆ จากทฤษฎี Central Theory Limit [17],[18] จะประมาณว่าการกระจายของชุดข้อมูลเป็นแบบปกติ และสามารถใช่วิธี MLH หาพารามิเตอร์ได้เลย วิธีนี้ควรทราบว่าข้อมูลมีการกระจายทางสถิติแบบใดจึงสามารถนำพารามิเตอร์ที่คำนวณได้มาใช้ประโยชน์ต่อไปได้ เพราะเป็นการยากที่จะตรวจสอบได้ว่าข้อมูลมีการกระจายทางสถิติแบบนั้นจริง ซึ่งต่างกับวิธีกราฟความน่าจะเป็นที่สามารถตรวจสอบได้ทันทีจากกราฟว่าข้อมูลมีการกระจายทางสถิติตามที่เลือกไว้หรือไม่ ดังนั้นในกรณีที่ไม่วางว่าข้อมูลมีการกระจายแบบใดก็ควรใช้วิธีกราฟความน่าจะเป็นในการหาค่าพารามิเตอร์

3.2.1 การกระจายแบบปกติ

ฟังก์ชันการกระจายแบบปกติหรือที่เรียกว่าฟังก์ชันการกระจายแบบเกาส์(Gaussian Distribution) เป็นการกระจายที่มีพารามิเตอร์ 2 ตัว ได้แก่

- μ หรือ \bar{T} เป็น location parameter คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลเวลา
 - σ เป็น scale parameter คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลเวลา
- และมี pdf และ cdf ดังสมการ (3.2) และ (3.3) ตามลำดับ

$$f(T) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{T-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (3.2)$$

$$F(T) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^T e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} dt \quad (3.3)$$

การกระจายแบบปกติมีความสมมาตรรอบค่า μ สามารถแปลงการกระจายแบบปกติให้อยู่ในรูปฟังก์ชันการกระจายแบบปกติมาตรฐาน ซึ่งเป็นการกระจายที่มีค่าเฉลี่ยของข้อมูลเป็นศูนย์ มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็นหนึ่ง มี pdf และ cdf เป็น $n(Z)$ และ $N(Z)$ ตามลำดับ ดังสมการ

$$(3.4) \text{ และ } (3.5) \text{ โดย } Z = \frac{T - \mu}{\sigma}$$

$$n(Z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}(Z)^2} \quad (3.4)$$

$$N(Z) = \int_{-\infty}^Z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}(z)^2} dz \quad (3.5)$$

3.2.2 การกระจายแบบล็อกปกติ

ให้ T' มีการกระจายแบบปกติ ซึ่ง $T' = \ln(T - \theta)$ โดย T คือข้อมูลเวลาเบรกดาวนจ์ ดังนั้น T' จึงมี pdf และ cdf ดังสมการ(3.6) และ (3.7)

$$f(T') = \frac{1}{\sigma' \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{T' - \mu'}{\sigma'} \right)^2} \quad (3.6)$$

$$F(T') = \int_{-\infty}^{T'} \frac{1}{\sigma' \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t' - \mu'}{\sigma'} \right)^2} dt' \quad (3.7)$$

แทนค่า T' จะได้ว่า

$$F(T) = \int_{-\infty}^{\ln(T-\theta)} \frac{1}{\sigma' \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t' - \mu'}{\sigma'} \right)^2} dt' \quad (3.8)$$

จาก $dt' = \frac{dt}{t - \theta}$ จะได้ pdf และ cdf ของ T ดังสมการ(3.9) และ (3.10) ตามลำดับ

$$f(T) = \frac{f(T')}{T - \theta} = \frac{1}{(T - \theta) \cdot \sigma' \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(T-\theta) - \mu'}{\sigma'} \right)^2} \quad (3.9)$$

$$F(T) = \int_{\theta}^T \frac{1}{(t - \theta) \cdot \sigma' \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(t-\theta) - \mu'}{\sigma'} \right)^2} dt \quad (3.10)$$

จะได้ว่า T มีการกระจายแบบล็อกปกติชนิด 3 พารามิเตอร์ ซึ่งมีพารามิเตอร์ได้แก่

- θ เป็น location parameter
- μ' เป็น scale parameter คือ ค่าเฉลี่ยของค่าล็อกการิทึมฐาน e ของ $T - \theta$
- σ' เป็น shape parameter คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าล็อกการิทึมฐาน e ของ $T - \theta$

ข้อสังเกต : พื้นที่ส่วนย่อยใต้กราฟ pdf ที่เพิ่มขึ้นของการกระจายแบบปกติและล็อกปกติ จะมีค่าเท่ากันเนื่องจากมีลักษณะสมการเหมือนกัน ดังนั้น $f(T)dT = f(T')dT'$

ค่าเฉลี่ยเลขคณิต :

$$\mu = e^{\bar{T}' + \frac{1}{2}\sigma'^2} + \theta \quad (3.11)$$

$$\bar{T}' = \mu' = \frac{\sum_{i=1}^n [\ln(T_i - \theta)]}{n} = \ln(\bar{T} - \theta) - \frac{1}{2} \ln\left(\frac{\sigma^2}{(\bar{T} - \theta)^2} + 1\right) \quad (3.12)$$

มัธยฐาน :

$$\tilde{T} = e^{\mu'} + \theta \quad (3.13)$$

ฐานนิยม :

$$\tilde{T} = e^{\mu' - \sigma'^2} + \theta \quad (3.14)$$

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน :

$$\sigma = \sqrt{\left(e^{2\mu'+\sigma^2}\right)\left(e^{\sigma^2-1}\right)} \quad (3.15)$$

$$\sigma' = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\ln(T_i - \theta) - \mu']^2}{n}} = \sqrt{\ln\left(\frac{\sigma^2}{(\bar{T} - \theta)^2} + 1\right)} \quad (3.16)$$

3.3 วิธีกราฟความน่าจะเป็น

นำข้อมูลเวลาที่ได้มาสร้างกราฟการกระจายของข้อมูล เพื่อหาลักษณะการกระจายของข้อมูลว่ามีการกระจายตามทฤษฎีแบบใด และมีค่าพารามิเตอร์เท่าใด แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ การหาความน่าจะเป็นสะสม การสร้างกราฟความน่าจะเป็น และการหาพารามิเตอร์

3.3.1 การหาความน่าจะเป็นสะสม

นำข้อมูลที่ได้มาเรียงลำดับจากค่าน้อยไปมากเพื่อหาความน่าจะเป็นสะสม $F(i, n)$ หรือที่เรียกว่า Rank Function โดย i คือความถี่สะสมของข้อมูลตัวที่ i n คือจำนวนข้อมูลทั้งหมด สามารถหา Rank Function ได้หลายแบบ ได้แก่ Mean Rank Median Rank และ Non-parametric Rank

1) Mean Rank ใช้เมื่อต้องการเลือกตัวแทนของข้อมูลชุดนั้นเป็นค่าเฉลี่ยเลขคณิตของข้อมูลชุดนั้นหรือ \bar{T} อันที่จริงแล้วสามารถหา \bar{T} ได้โดยตรงจากสมการของ White [19] โดยไม่สนใจว่าข้อมูลที่ศึกษาจะมีฟังก์ชันการกระจายแบบใด ดังสมการ(3.17)

$$E[F(i, n)] = E(i, n) = (-1)^{i-1} \binom{n}{i-1} \sum_{j=0}^{i-1} \binom{i-1}{j} (-1)^{i-j-1} \{-\lambda - \ln(n - i + j + 1)\} + E(i-1, n) \quad (3.17)$$

โดย $i \geq 2$ และ j คือลำดับก่อนหน้าลำดับที่ i และ $E(1, n) = -\lambda - \ln(n)$ λ คือ ค่าคงที่ของออยเลอร์ (Euler Constant)

เนื่องจากการหาค่าโดยตรงนั้นทำได้ยาก และไม่สามารถคำนวณหาพารามิเตอร์ตัวอื่นในฟังก์ชันการกระจายข้อมูลได้ จึงใช้วิธีสร้างกราฟความน่าจะเป็นสะสม Mean Rank ขึ้นเพื่อหาค่า \bar{T} และพารามิเตอร์ตัวอื่นต่อไป โดยมีผู้นำเสนอสมการความน่าจะเป็นสะสม Mean Rank อยู่หลายสมการ ได้แก่ Weibull Estimator Hazen Estimator และ Blom Estimator ตามสมการ (3.18) ถึง (3.20) ตามลำดับ

$$F(i, n) = \frac{i}{n+1} \quad (3.18)$$

$$F(i, n) = \frac{i - 0.5}{n} \quad (3.19)$$

$$F(i, n) = \frac{i - 0.5}{n + 0.25} \quad (3.20)$$

2) Median Rank ใช้เมื่อต้องการเลือกค่ากลางข้อมูลชุดนั้นเป็นค่ามัธยฐาน \tilde{T} หรือควอนไทล์ที่ 50% ค่าควอนไทล์ที่ 50% สามารถคำนวณได้โดยตรงจาก เบต้าฟังก์ชันแบบไม่สมบูรณ์ (Incomplete Beta Function) [20] ดังสมการ (3.21)

$$B(a, b) = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \int_0^y t^{a-1} (1-t)^{b-1} dt \quad (3.21)$$

$$a > 0 \quad b > 0 \quad 0 \leq y \leq 1$$

โดย $a=i$ และ $b=n+1-i$ การหา Median Rank ทำได้โดยการกำหนดให้ $B(a,b)=0.5$ เมื่อแก้สมการจะได้ค่า y เป็นค่าควอนไทล์ที่ 50% นั้นเอง สามารถใช้วิธี Newton-Raphson แก้สมการหาค่าควอนไทล์ที่ 50% ได้ เพราะว่าพารามิเตอร์ในแกมมาฟังก์ชันเป็นเลขจำนวนเต็ม จึงสามารถแทนค่าแกมมาฟังก์ชันได้โดย $\Gamma(j) = (j-1)!$ และใช้ได้เมื่อ n มีค่าตั้งแต่ 3 ถึง 100

เนื่องจากการคำนวณค่า Median Rank จากเบต้าฟังก์ชันนั้นทำได้ยาก จึงมีผู้นำเสนอสมการเพื่อหาความน่าจะเป็นสะสม Median Rank ในรูปแบบที่ง่ายขึ้นอยู่หลายสมการ ได้แก่ Filliben Estimator ตามสมการ(3.22) และ Bernard กับ Bos-Levenbach ได้นำเสนอในรูปแบบที่ง่ายขึ้น ตามสมการ(3.23)

$$F(i, n) = \frac{i - 0.3175}{n + 0.365}, \quad i \leq n - 1 \quad (3.22)$$

$$= \sqrt[3]{0.5}, \quad i = n$$

$$F(i, n) = \frac{i - 0.3}{n + 0.4} \quad (3.23)$$

3) Non-parametric Rank ใช้เมื่อไม่สนใจว่าข้อมูลจะมีฟังก์ชันการกระจายทางสถิติแบบใดและจะใช้พารามิเตอร์ทางสถิติใดเป็นตัวแทนข้อมูลอาจเป็น \bar{T} , \tilde{T} หรือ \tilde{T} ก็ได้ มีผู้เสนอหลายสมการ ได้แก่ Kaplan-Meyer Estimator และ Nelson Estimator ตามสมการ (3.24) และ(3.25) ตามลำดับ

$$F(i, n) = \frac{i}{n} \quad (3.24)$$

$$F(i, n) = 1 - \exp \left[- \sum_{j=1}^i \left(\frac{1}{n - j + 1} \right) \right] \quad (3.25)$$

โดยทั่วไปแล้วในการวิเคราะห์เรื่องอายุการใช้งานของอุปกรณ์นิยมใช้ค่ามัธยฐาน \tilde{T} เป็นตัวแทนของกลุ่มข้อมูล ดังนั้นจึงใช้ Median Rank แทนค่าความน่าจะเป็นสะสมของข้อมูล[12-16]

และสมการของ Median Rank ที่คำนวณได้ง่ายและให้ความแม่นยำสูงก็คือ Bernard Estimator ดังสมการที่ (3.23)

3.3.2 การสร้างกราฟความน่าจะเป็นและการหาค่าพารามิเตอร์

เป็นการสร้างกราฟระหว่างความน่าจะเป็นจะสอดคล้องกับข้อมูลซึ่งในที่นี้คือเวลาเบรกดาวนโดย เปลี่ยนสเกลของความน่าจะเป็นจะสอดคล้องให้มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับข้อมูล เริ่มสร้างโดยให้ แกน x เป็นข้อมูลเวลาเบรกดาวน T และแกน y เป็นตัวแปร Y ที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับข้อมูล T และมีความน่าจะเป็นของตัวแปร Y และข้อมูล T เท่ากัน ($F(Y)=F(T)$) โดยต้องสามารถคำนวณค่า shape และ scale พารามิเตอร์ของตัวแปร Y จากข้อมูลเวลาเบรกดาวน T ได้โดยตรง จากนั้น เปลี่ยนค่า Y ในแกน y ให้เป็นค่าความน่าจะเป็นจะสอดคล้อง $F(Y)$

เมื่อได้สเกลในแกน x และแกน y ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลและความน่าจะเป็นจะสอดคล้องที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้นแล้ว พล็อตค่าของตัวแปร Y และ T ลงบนกราฟ โดยค่า Y ของข้อมูลแต่ละตัวหาได้จากการคำนวณอินเวอร์สฟังก์ชันของ cdf ของ Y จากค่า Rank Function ที่ได้ ซึ่งก็คือ $Y=F^{-1}(\text{Rank Function})$ ถ้าตัวแปร T มีการกระจายตามที่คาดไว้จะได้จุดต่างๆบนกราฟเรียงตัวเป็นเส้นตรง จากนั้นสร้างกราฟเส้นตรงโดยใช้วิธี Linear Regression โดยใช้หลักการ Least Square(วิธีคำนวณแสดงในภาคผนวก ข.) ในกรณีที่ข้อมูลมีฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบ 3 พารามิเตอร์ เช่นฟังก์ชันการกระจายแบบล็อกปกติ จะต้องคำนวณหาค่า location parameter เริ่มต้น ที่ทำให้ correlation coefficient ของตัวแปร Y และ T มีค่าเข้าใกล้หนึ่งที่สุดก่อนเพื่อจะได้ location parameter ที่ถูกต้องที่สุดที่จะทำให้ได้ความสัมพันธ์ของ Y และ T เป็นกราฟเส้นตรง จากกราฟเส้นตรงที่ได้จะได้จุดตัดแกน y และความชันเพื่อคำนวณหา location parameter และ scale parameter ตามลำดับต่อไป

3.3.2.1 การกระจายแบบปกติ

$$\text{ให้ } Y = Z = \frac{T - \mu}{\sigma}$$

$$\text{จากสมการที่(3.3) } F(T) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^T e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} dt$$

จะได้ว่า

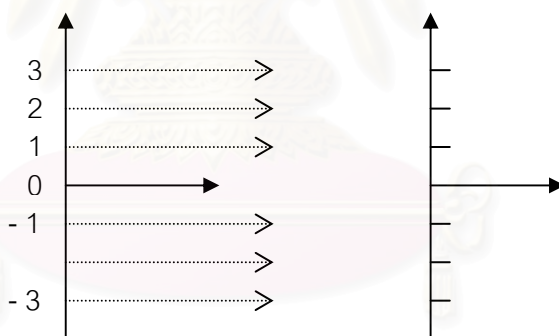
$$F(Y) = F(Z) = \int_{-\infty}^Z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}z^2} dz \quad (3.26)$$

ดังนั้น $Y = F^{-1}(\text{rank value}, \mu_y = 0, \sigma_y = 1)$ จากกราฟความน่าจะเป็นจะได้จุดตัดแกน y เป็นค่า $-\mu / \sigma$ และความชันเป็นค่า $1 / \sigma$

ตัวอย่างการสร้างกราฟความน่าจะเป็นกรณีข้อมูลที่ T มีการกระจายแบบปกติ ซึ่งใช้ตัวแปร $Y = Z = \frac{T - \mu}{\sigma}$ ซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร Y กับความน่าจะเป็น $F(Y)$ ดังค่าในตารางที่ 3.1 และแสดงกราฟในรูปที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Y และ $F(Y)$ ในกรณีที่ข้อมูล T มีการกระจายแบบปกติ

Y	F(Y)
-3	0.001
-2	0.023
-1	0.159
0	0.500
1	0.841
2	0.977
3	0.999



รูปที่ 3.1 กราฟความน่าจะเป็นของการกระจายแบบปกติ

3.3.2.2 การกระจายแบบล็อกปกติ

ให้ $Y = \frac{T - \theta}{e^{\mu'}}$ จะได้ว่า

$$\ln(T - \theta) - \mu' = \ln Y \quad (3.27)$$

$$dT = e^{\mu'} dY \quad (3.28)$$

จาก

$$F(T) = \int_{\theta}^T \frac{1}{(t - \theta) \cdot \sigma' \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(t - \theta) - \mu'}{\sigma'} \right)^2} dt \quad (3.29)$$

ดังนั้น

$$F(Y) = \int_0^Y \frac{1}{Y\sigma' \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln y}{\sigma'}\right)^2} dy \quad (3.30)$$

จะได้ Y มีการกระจายแบบล็อกปกติ ซึ่งมีค่า $\theta_y = 0$ $\mu_y = 0$ และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น $\sigma_y = \sigma'$ ดังนั้น $Y = F^{-1}(\text{rank value}, \mu_y = 0, \sigma_y = \sigma')$ โดย σ' คำนวณได้ดังสมการ (3.31) เมื่อ θ_{est} เป็นค่า location parameter คาดเดาเริ่มต้น

$$\sigma' = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\ln(T_i - \theta_{\text{est}})]^2}{n} - \left(\frac{\sum_{i=1}^n [\ln(T_i - \theta_{\text{est}})]}{n}\right)^2} \quad (3.31)$$

เนื่องจากค่า Y ที่คำนวณได้จะขึ้นกับ θ_{est} ซึ่งเป็นค่าคาดเดาเริ่มต้น จึงต้องคำนวณหาค่า θ_{est} ที่ทำให้ correlation coefficient ของตัวแปร Y และ T มีค่าเข้าใกล้หนึ่งที่สุดก่อน เพื่อจะได้ความสัมพันธ์ที่ระหว่าง Y กับ T ที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้นมากที่สุด จากกราฟจะได้จุดตัดแกน y เป็นค่า $-\theta/e^{\mu'}$ และความชันเป็นค่า $1/e^{\mu'}$

บทที่ 4

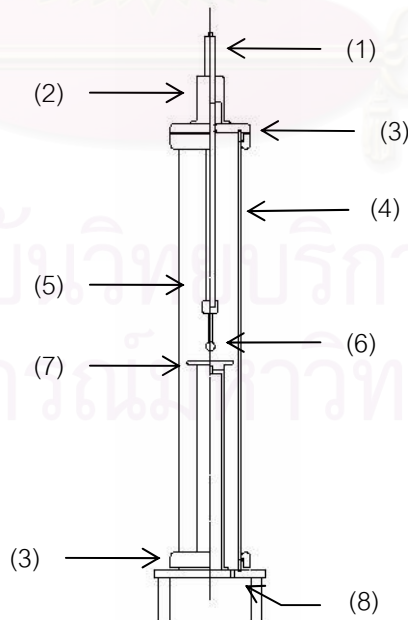
การทดลอง

การหาข้อมูลแรงดันและเวลาเบรกดาวน์ของก๊าซผสม $\text{SF}_6 - \text{N}_2$ เพื่อสร้างเส้นคุณลักษณะแรงดัน-เวลาจะทดลองในระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลม-ระนาบ โดยป้อนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่น $1.2/50 \mu\text{s}$ ทั้งชั่ววอกและชั่วลบให้แก่ชุดทดลอง ในเงื่อนไขการทดลองที่มีแพกเตอร์ต่างๆ อันได้แก่ ระยะเวลาแกป ความดันก๊าซ และสัดส่วนของก๊าซ SF_6 ในก๊าซผสม $\text{SF}_6 - \text{N}_2$ เพื่อศึกษาผลกระทบของแพกเตอร์ ที่มีต่อคุณลักษณะแรงดัน-เวลาของก๊าซผสม $\text{SF}_6 - \text{N}_2$

นอกจากนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการทดลอง ซึ่งประกอบด้วย การเตรียมชุดทดลอง การบรรจุและควบคุมความดันก๊าซ ในชุดทดลอง การปรับระยะเวลาแกป การป้อนแรงดัน และการเก็บข้อมูลการทดลอง

4.1 ชุดทดลอง

ชุดทดลองที่ใช้หาคุณลักษณะแรงดัน-เวลาของก๊าซผสม $\text{SF}_6 - \text{N}_2$ ถูกออกแบบให้มีพิกัดแรงดันอิมพัลส์ 300 kV แสดงในรูปที่ 4.1 ประกอบด้วย

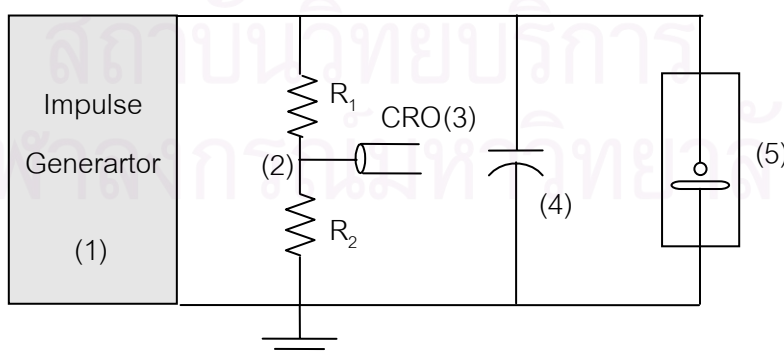


รูปที่ 4.1 ชุดทดลอง

- 1) แท่งตัวนำแรงสูง ตัวนำไฟฟ้าทำจากทองเหลือง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 ม.ม. ยาว 615 ม.ม.
- 2) ตัวปรับระยะแกป ทำจากทองเหลืองสามารถปรับแกปในช่วง 0 ถึง 50 ม.ม. ปรับระยะด้วยเกลียว มีความคลาดเคลื่อน ± 0.1 ม.ม.
- 3) ฝาปิดครอบท่อพีวีซี ทำจากอลูมิเนียมปิดครอบด้านบนและล่างโดยมียางกันก๊าซรั่ว
- 4) ท่อพีวีซี ชนิดทนความดันสูงสุด 8.5 kg/cm^2 สามารถดูอากาศภายในจนเหลือความดัน 0.003 bar ความดันสูงสุด 8 บาร์ ยาว 1 ม. ซึ่งมีความยาวเพียงพอที่ทำให้ไม่เกิดวาบไฟตามผิวท่อพีวีซี คือ 600 kV/m ในกรณีของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว และ 1000 kV/m ในกรณีของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว [21]
- 5) ฉนวนก๊าซ ก๊าซผสม $\text{SF}_6 - \text{N}_2$ ที่มีสัดส่วนของก๊าซ SF_6 ในก๊าซผสม จาก 0 ถึง 100%
- 6) อิเล็กโตรดแรงสูง ประกอบด้วยหัวอิเล็กโตรด และก้านยึดต่อกับแท่งตัวนำแรงสูง หัวอิเล็กโตรดทำจากลูกปืนเหล็ก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 ม.ม ความคลาดเคลื่อน ± 0.01 ม.ม.สามารถถอดเปลี่ยนได้ ติดกับก้านทองเหลืองยาว 6.5 ม.ม.
- 7) อิเล็กโตรดกราวนด์ ระนาบแผ่นวงกลมทำจากสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 ม.ม.
- 8) ท่อก๊าซมีวาล์วปิด ท่อสำหรับใช้ดูดก๊าซ (evacuate) และบรรจุก๊าซ มีวาล์วควบคุม

4.2 วงจรทดลอง

วงจรทดลองแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นมาตรฐาน ซึ่งออกแบบ สร้างและประกอบโดยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แสดงในรูปที่ 4.1 ประกอบด้วย



รูปที่ 4.2 วงจรทดลอง

นอกจากนี้ในแต่ละเงื่อนไขการทดลองจะหาค่า $V_{50\%}$ เพื่อนำค่า $V_{50\%}$ มาเปรียบเทียบกับว่ามีความสัมพันธ์อย่างไรกับแฟกเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง

4.4 ขั้นตอนการทดลอง

4.4.1 การเตรียมชุดทดลอง

เนื่องจากการเบรกดาวนแต่ละครั้งทำความเสียหายให้แก่ชุดอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งความเสียหายของอิเล็กทรอนิกส์มีผลต่อสนามไฟฟ้า อาจจะทำให้ข้อมูลมีความผิดพลาด ดังนั้นในการทดลองจึงเปลี่ยนอิเล็กทรอนิกส์ใหม่ทุกครั้ง เมื่อเปลี่ยนเงื่อนไขการทดลอง ส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่นำมาจากสแตนด์บายที่มีความแข็งแรงของพื้นผิวสูงจะขัดด้วยกระดาษทรายความละเอียดสูง เบอร์ 400 ขัดผิวหลังเสร็จสิ้นหนึ่งเงื่อนไขการทดลอง ก่อนที่จะประกอบชุดทดลองจะล้างทำความสะอาดอุปกรณ์ต่างๆ ในชุดทดลอง ซึ่งประกอบด้วย แท่งตัวนำแรงสูง อิเล็กทรอนิกส์แรงสูง อิเล็กทรอนิกส์กราวด์ ฝาปิดอลูมิเนียม และผิวภายในท่อพีวีซี ด้วยผงซักฟอก และเช็ดด้วยแอลกอฮอล์เพื่อกำจัดฝุ่นและไม่ให้เกิดคราบน้ำซึ่งจะมีผลต่อสนามไฟฟ้าภายในชุดทดลองได้ แล้วจึงประกอบชุดทดลอง

หลังจากประกอบชุดทดลองแล้ว ก่อนการบรรจุก๊าซเพื่อทดลองทุกครั้ง ต้องตรวจสอบชุดทดสอบว่าฝาอลูมิเนียมปิดสนิทหรือยังมีก๊าซรั่วไหลหรือไม่ โดยการอัดอากาศเข้าสู่ชุดทดลองประมาณ 2 บาร์ทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง แล้วมาตรวจสอบความดัน ถ้าความดันไม่เปลี่ยนแปลงจึงดูอากาศภายในชุดทดลองจนใกล้เคียงสูญญากาศเหลือความดันประมาณ 20 มิลลิบาร์ เพื่อดูเอาฝุ่นผงที่อาจจะอยู่ภายในชุดทดลอง และอากาศออกจากชุดทดลอง หลังจากนั้นอัดก๊าซไนโตรเจนเข้าไป 1 บาร์ ปล่อยทิ้งไว้ประมาณ 20 ถึง 30 นาทีแล้วจึงดูก๊าซภายในชุดทดลองซ้ำอีกครั้งจนเหลือความดัน 20 มิลลิบาร์ เพื่อกำจัดก๊าซอื่นที่ไม่ใช่ก๊าซที่ใช้ทดลอง หรือถ้ามีก็มีปริมาณน้อยๆ จากนั้นจึงบรรจุก๊าซที่ต้องการทดลองเข้าสู่ชุดทดลองตามความดันที่ต้องการ

4.4.2 การบรรจุและควบคุมความดันก๊าซในชุดทดลอง

ก่อนการบรรจุจนวนก๊าซเข้าสู่ชุดทดลองจะบันทึกค่าอุณหภูมิ และความดันบรรยากาศในขณะที่กำลังจะบรรจุก๊าซ แล้วแปลงสภาพอุณหภูมิ และความดันไปที่สภาพมาตรฐาน คือ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศเพื่อควบคุมตัวแปรให้สามารถเปรียบเทียบผลการทดลองได้โดยใช้แฟกเตอร์ปรับแก้ [3] ทั้งนี้ความดันที่ใช้อ้างอิงเป็นความดันสัมบูรณ์ (Absolute Pressure) การบรรจุจนวนก๊าซให้ได้ความดันที่ต้องการจะทำผ่านเซนเซอร์วัดความดันก๊าซ โดยต่อเข้ากับท่อก๊าซทางด้านล่างของชุดทดลองในรูปแบบที่ 4.1

กรณีที่ทดลองในก๊าซผสมจะบรรจุก๊าซที่ละชนิดโดยบรรจุก๊าซไนโตรเจนก่อน แล้วจึงบรรจุก๊าซ SF₆ การกำหนดสัดส่วนของก๊าซผสมจะใช้กฎความดันย่อยของดาลตัน (The Dalton's Partial Pressure Law) คำนวณว่าต้องบรรจุก๊าซไนโตรเจนเท่าไร บรรจุก๊าซ SF₆ เท่าไร

ขั้นตอนการบรรจุก๊าซจะบรรจุก๊าซชนิดแรกตามสัดส่วนของก๊าซผสมให้ได้ความดันย่อยที่ต้องการแล้วบรรจุก๊าซอีกชนิดที่เหลือจนได้ความดันก๊าซผสมที่ต้องการ ปล่อยให้ทิ้งไว้อย่างน้อย 2 ถึง 5 ชั่วโมงก่อนการป้อนแรงดันเพื่อทดสอบ [22],[23]

ปัจจุบันมีเครื่องตรวจสอบส่วนผสมในก๊าซ (Gas Chromatic) ที่สามารถตรวจสอบสัดส่วนผสมของก๊าซตัวอย่างว่าประกอบด้วยก๊าซอะไรบ้างและมีอยู่ในก๊าซตัวอย่างเป็นส่วนใดส่วนหนึ่ง ซึ่งสามารถนำมาใช้ตรวจสอบก๊าซผสมว่ามีสัดส่วนอย่างที่ต้องการหรือไม่ แต่เนื่องจากที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงไม่มีเครื่องมือนี้ และเครื่องมือนี้มีราคาสูงจึงใช้วิธีเพิ่มความละเอียดของเครื่องมือวัดความดันโดยใช้เซนเซอร์ความดัน (Pressure Sensor) ชนิดแสดงผลเป็นตัวเลขดิจิทัล ยี่ห้อ ชัน-เอ็กซ์ ที่มีความละเอียด 0.01 บาร์ ความแม่นยำ 0.2% ของพิกัด มาเพิ่มความละเอียดในการบรรจุแทนเกจวัดความดันทั่วไป และยอมรับความคลาดเคลื่อนของส่วนผสมในก๊าซ

4.4.3 การปรับระยะแกป

การปรับระยะแกประหว่างอิเล็กโตรดแรงสูงและอิเล็กโตรดกราวนด์ จะทำภายนอกชุดทดลองโดยหมุนแท่งตัวนำแรงสูงผ่านตัวปรับระยะแกปเพื่อตั้งระยะศูนย์ โดยใช้โหมมิเตอร์วัดความต้านทานที่ปลายแท่งตัวนำแรงสูงกับฝาครอบอลูมิเนียมด้านกราวนด์ ถ้าวัดความต้านทานเป็นศูนย์แสดงว่าอิเล็กโตรดแรงสูงสัมผัสกับอิเล็กโตรดด้านกราวนด์พอดีระยะแกปนี้เป็นศูนย์ จากนั้นติดตั้งตัวชี้บอกระยะแบบเข็ม (Dial Indicator) บนปลายแท่งตัวนำแรงสูง แล้วหมุนแท่งตัวนำแรงสูงผ่านเกลียวยึดที่ตัวปรับระยะแกปขึ้นตามระยะแกปที่ต้องการโดยสังเกตที่ตัวชี้แบบเข็ม เมื่อได้ระยะแกปที่ต้องการแล้วถอดตัวชี้บอกระยะแบบเข็มออก สำหรับตัวชี้บอกระยะแบบเข็มที่ใช้ยี่ห้อมิตูโตโย มีความละเอียด 0.01 ม.ม. ความแม่นยำ (Accuracy) 0.012 ม.ม.

4.4.4 การป้อนแรงดันและการเก็บข้อมูล

หลังจากทำตามขั้นตอนการทดลองตั้งแต่ข้อ 4.4.1 ถึง 4.4.3 แล้ว นำชุดทดลองมาต่อเข้ากับวงจรทดลองในรูปที่ 4.2 ทำการตรวจสอบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากวงจรโดยป้อนแรงดันที่ระดับต่ำที่ไม่เกิดเบรกดาวน์ วัดค่าเวลาหน้าคลื่น และหลังคลื่นจากออสซิลโลสโคปเพื่อเปรียบเทียบกับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน 1.2/50 μ s [24]

เมื่อได้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ต้องการแล้ว การทดลองหาแรงดันเบรกดาวน์และเวลาเบรกดาวน์ ซึ่งใช้เป็นข้อมูลในการสร้างเส้นคุณลักษณะแรงดัน-เวลาจะใช้วิธีระดับแรงดันคงที่ใน

มาตรฐาน IEC No. 60-1 [25] เลือกระดับค่ายอดแรงดันอิมพัลส์มา 5 ระดับแรงดัน โดยที่แต่ละระดับแรงดันจะป้อนแรงดันอิมพัลส์ให้เกิดเบรกดาวนเป็นจำนวน 20 ครั้ง โดยรอเวลาประมาณ 3 นาที [26] ในแต่ละครั้งที่ป้อนแรงดันแล้วเกิดเบรกดาวน ก่อนที่จะป้อนแรงดันครั้งต่อไปเพื่อรอให้ก๊าซฉนวนภายในชุดทดลองคืนตัวก่อนเพื่อความเป็นอิสระต่อกันของข้อมูลเวลาเบรกดาวน หลังจากนั้นบันทึกค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ที่เกิดเบรกดาวนและเวลาเบรกดาวน ดังนั้นจะได้ข้อมูลการเบรกดาวน 100 ค่า ในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง นำข้อมูลของแรงดันเบรกดาวนและเวลาเบรกดาวนมาแสดงในกราฟแรงดันเวลา ซึ่งจะแสดงในบทที่ 5 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล โดยข้อมูลของแรงดันเบรกดาวนและเวลาเบรกดาวนที่ได้ทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ข.

ในแต่ละเงื่อนไขการทดลองจะหาค่า $V_{50\%}$ ด้วยวิธีปรับขึ้นและลง โดยมีจำนวนครั้งที่ป้อนแรงดันขึ้นลงเป็น 30 ครั้ง แล้วบันทึกลักษณะการปรับขึ้นลงของค่าแรงดันในแต่ละระดับ ซึ่งข้อมูลแรงดันและลักษณะการปรับขึ้นลงแสดงในภาคผนวก ค.



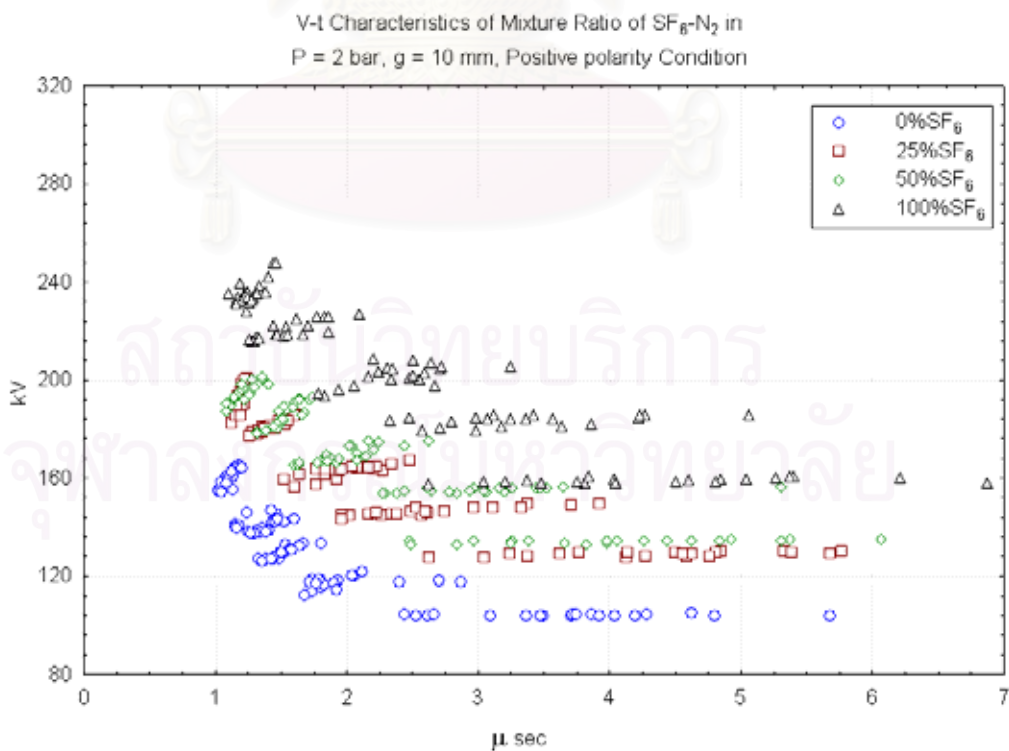
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

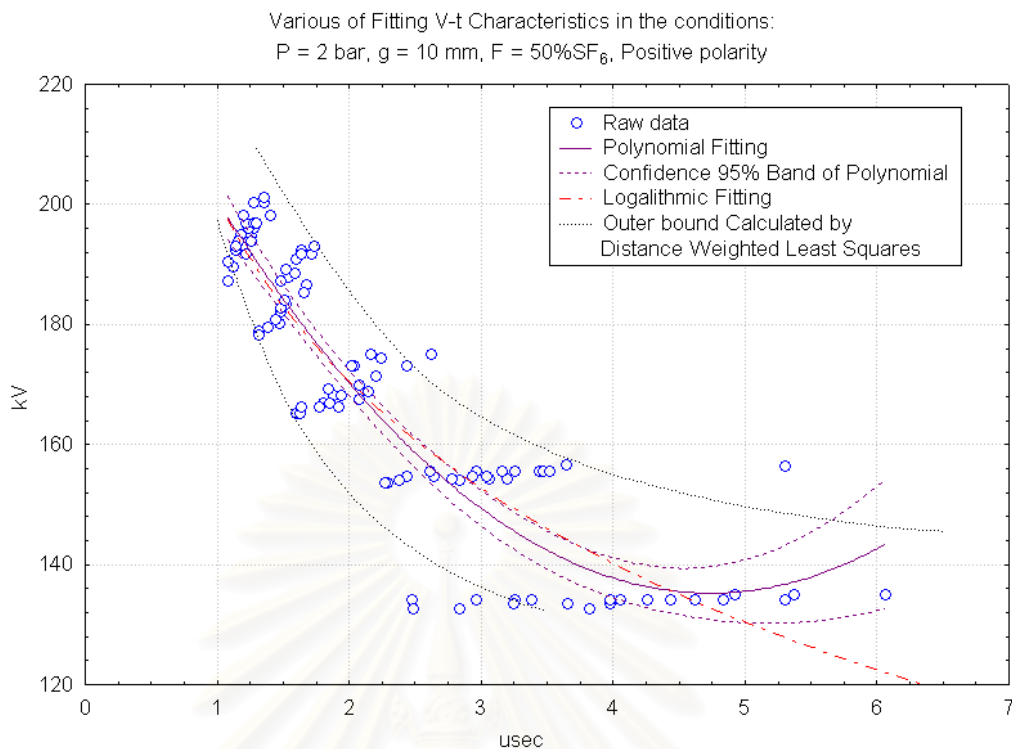
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

ผลการทดลองแสดงข้อมูลคุณลักษณะแรงดัน-เวลาของก๊าซผสม $\text{SF}_6 - \text{N}_2$ ที่เปลี่ยนแปลงสัดส่วนของก๊าซ SF_6 ในก๊าซผสม $\text{SF}_6 - \text{N}_2$ ในกรณีต่างๆ ที่กำหนดไว้ในข้อ 4.3 และแสดงผลของเงื่อนไขการทดลอง คือ ความดัน ระยะแกป และชั่วแรงแดันอิมพัลส์ ต่อคุณลักษณะแรงดัน-เวลาที่สัดส่วนของก๊าซ SF_6 ในก๊าซผสม $\text{SF}_6 - \text{N}_2$ ต่างๆ ซึ่งข้อมูลจากการทดลองอยู่ในภาคผนวก ข.

ตัวอย่างของข้อมูลคุณลักษณะแรงดัน-เวลาที่ได้จากการทดลองแสดงในรูปที่ 5.1 พบว่าการอ่านข้อมูลทำได้ยากเพราะข้อมูลมีจำนวนมากและมีการซ้อนทับกัน ดังนั้นเพื่อให้การวิเคราะห์ข้อมูลง่ายขึ้นจึงแทนข้อมูลด้วยการเข้ารูป (fitting) เป็นเส้นกราฟหรือช่วงข้อมูลด้วยวิธีต่างๆ เช่น การเข้ารูปด้วยสมการพหุนาม (Polynomial Fitting), การเข้ารูปด้วยสมการลอการิทึม (Logarithmic Fitting) แต่พบว่าไม่เข้ารูปกับข้อมูลเท่าที่ควรจึงเลือกเข้ารูปแบบช่วงข้อมูล โดยเลือกข้อมูลบริเวณขอบ ของแต่ละระดับแรงดันป้อนมาคำนวณด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square) ซึ่งวิธีการหาแสดงในภาคผนวก ก. ตัวอย่างรูปแบบที่ใช้เข้ารูปแสดงในรูปที่ 5.2



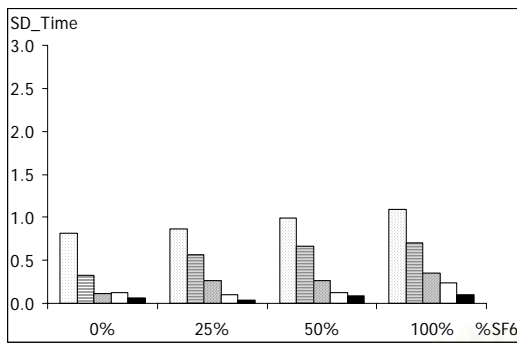
รูปที่ 5.1 ตัวอย่างข้อมูลคุณลักษณะแรงดัน-เวลาของอิมพัลส์ 1.2/50 μs ที่ได้จากการทดลอง



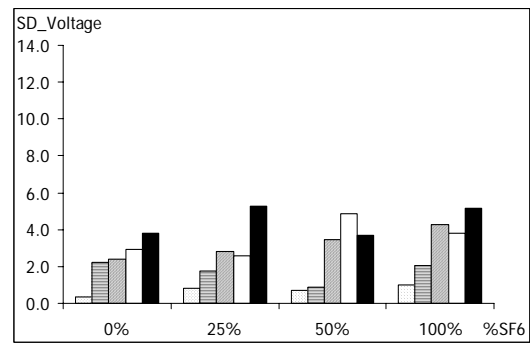
รูปที่ 5.2 ตัวอย่างรูปแบบที่ใช้ใส่รูปคุณลักษณะแรงดัน-เวลา

จากรูปที่ 5.2 ตัวอย่างข้อมูลที่มีความดัน 2 บาร์ ระยะแกป 10 มม. ที่สัดส่วนของก๊าซ SF₆ ในก๊าซผสม SF₆ - N₂ 50% ชั่วแรงดันบวก ข้อมูลมีกลุ่มกระจายเป็น 5 กลุ่มย่อยตามระดับแรงดันอิมพัลส์ป้อนคงที่ พบว่าเส้นไขว้ปลาที่คำนวณด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดขนาดข้อมูลดิบได้ดี โดยมีลักษณะของช่วงแคบที่บริเวณเวลาเบรกดาวนต่ำๆ และมีช่วงกว้างออกไปที่เวลาเบรกดาวนเพิ่มขึ้นซึ่งสามารถอธิบายด้วยการกระจายของข้อมูลที่แต่ละระดับแรงดันป้อนคงที่ 5 ระดับแรงดันในที่ระดับที่ 1 ซึ่งมีระดับต่ำที่สุดการเบรกดาวนเกิดขึ้นที่บริเวณหางคลื่นของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ซึ่งข้อมูลแรงดันที่นำมาใช้สร้างเส้นคุณลักษณะแรงดัน-เวลาเป็นค่ายอดแรงดันดังที่แสดงในรูปที่ 2.2 ดังนั้นที่ระดับนี้จะมีการกระจายของแรงดันต่ำ ในขณะที่การกระจายของเวลาจะมีค่าสูงเนื่องจากผลของเวลาล่าช้านั่นเอง ส่วนในระดับที่ 5 เบรกดาวนเกิดหน้าคลื่นแรงดัน เวลาที่คลื่นตัดประมาณ 1 μ s ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงพอที่จะทำให้เกิดเบรกดาวน ดังนั้นเวลาล่าช้าจึงสั้นการกระจายของเวลาเบรกดาวนจึงน้อย ซึ่งการกระจายของข้อมูลสามารถอธิบายได้จากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) การกระจายของแรงดันและเวลาเบรกดาวนในแต่ละเงื่อนไขทดลองแสดงด้วยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ในรูปที่ 5.3 ถึง 5.8 โดยรูป ก. แสดง SD ของเวลารูป ข. แสดง SD ของแรงดันและใช้สัญลักษณ์แทนแต่ละระดับแรงดันดังนี้

□ level1 ■ level2 ■ level3 □ level4 ■ level5

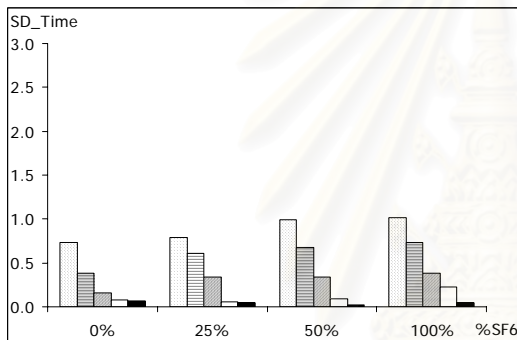


ก) SD ของเวลา

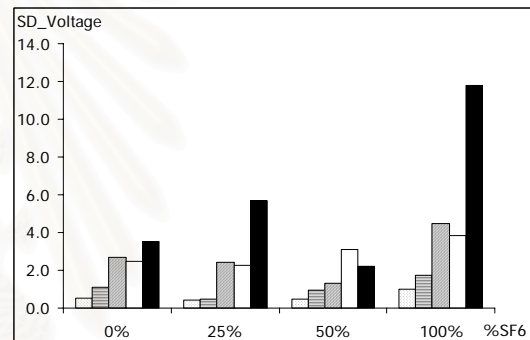


ข) SD ของแรงดัน

รูปที่ 5.3 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของก๊าซผสม ที่ระยะแก๊ป 10 ม.ม. ความดัน 2 บาร์ รั้วบวก

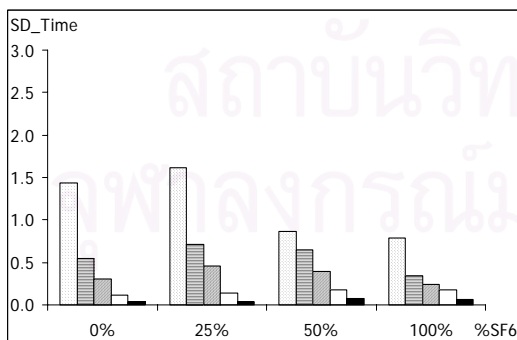


ก) SD ของเวลา

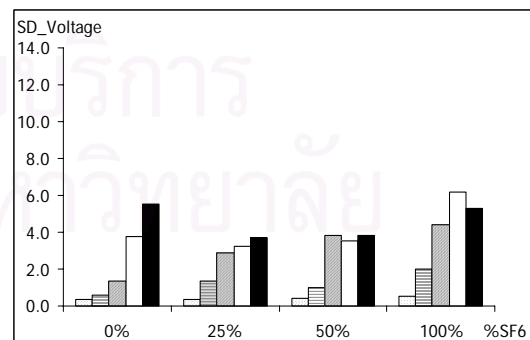


ข) SD ของแรงดัน

รูปที่ 5.4 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของก๊าซผสม ที่ระยะแก๊ป 10 ม.ม. ความดัน 2 บาร์ รั้วลบ

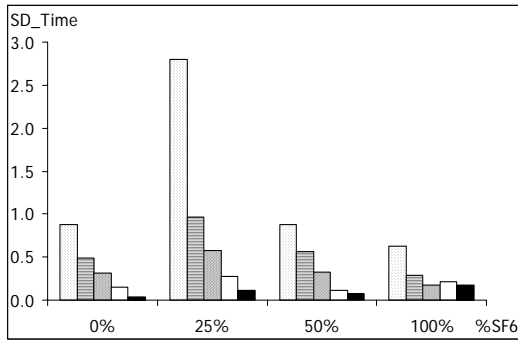


ก) SD ของเวลา

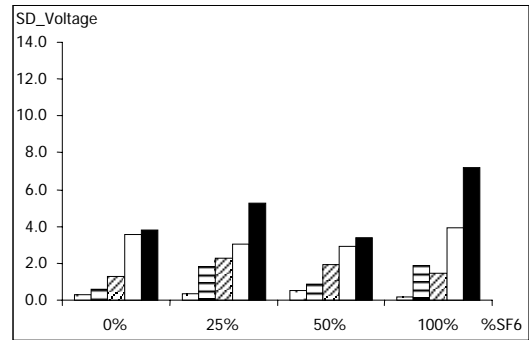


ข) SD ของแรงดัน

รูปที่ 5.5 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของก๊าซผสม ที่ระยะแก๊ป 20 ม.ม. ความดัน 2 บาร์ รั้วบวก

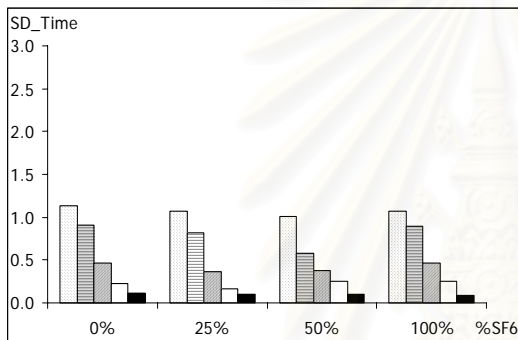


ก) SD ของเวลา

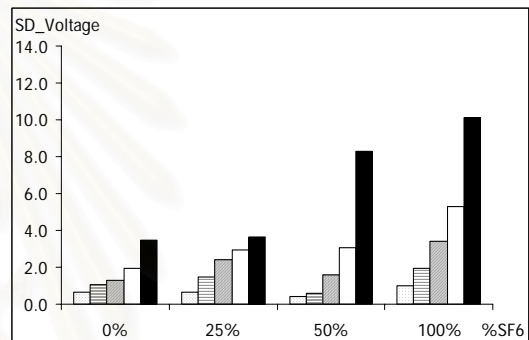


ข) SD ของแรงดัน

รูปที่ 5.6 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของก๊าซผสม ที่ระยะแก๊ป 20 ม.ม. ความดัน 2 บาร์ ขั้วลบ

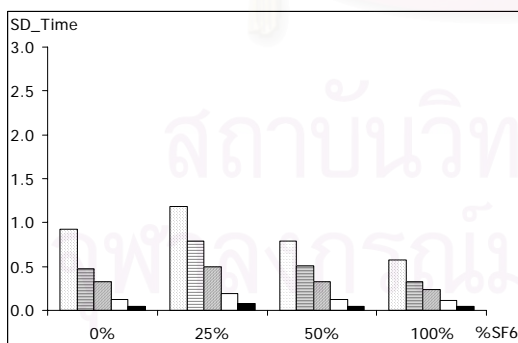


ก) SD ของเวลา

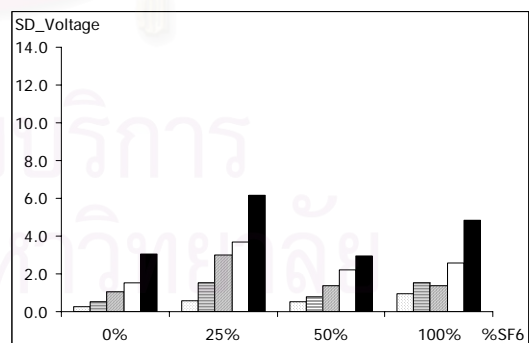


ข) SD ของแรงดัน

รูปที่ 5.7 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของก๊าซผสม ที่ระยะแก๊ป 10 ม.ม. ความดัน 3 บาร์ ขั้วบวก



ก) SD ของเวลา



ข) SD ของแรงดัน

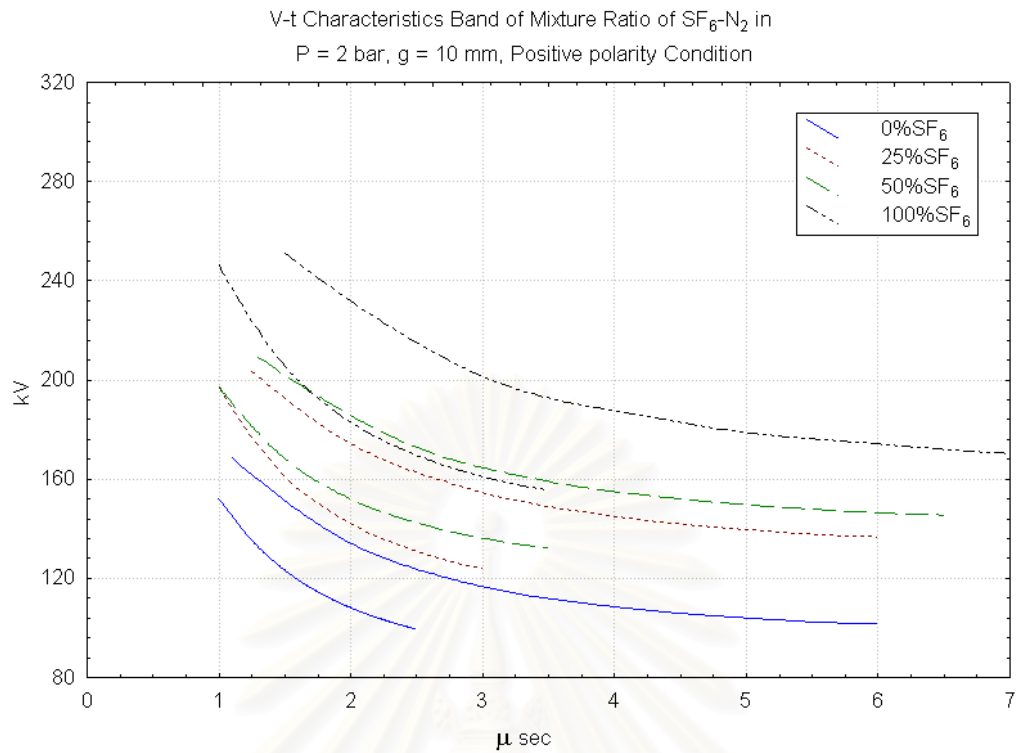
รูปที่ 5.8 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของก๊าซผสม ที่ระยะแก๊ป 10 ม.ม. ความดัน 3 บาร์ ขั้วลบ

จากรูปที่ 5.3 ก. ถึงรูปที่ 5.8 ก. พบว่าส่วนเบี่ยงเบนของเวลาเบรกดาวนีย์อยู่ในช่วง $0.05 \mu\text{s}$ ที่แรงดันป้อนระดับที่ 5 ถึง $1.15 \mu\text{s}$ ที่แรงดันป้อนระดับที่ 1 ยกเว้นค่าส่วนเบี่ยงเบนของเวลาเบรกดาวนีย์ที่ระดับแรงดันป้อนที่ 1 ระยะแกป 20 ม.ม. ความดัน 2 บาร์ ขั้วลบ สัดส่วนของก๊าซ SF_6 ในก๊าซผสม $\text{SF}_6 - \text{N}_2$ 25% มี SD ของเวลาสูงถึง $2.8 \mu\text{s}$ เพราะเวลาเบรกดาวนีย์ที่หลังคลื่นมีการกระจายมากโดยมีเวลาเบรกดาวนีย์ที่มากกว่า $9 \mu\text{s}$ ถึง 4 ค่า (ดูในตารางที่ ค.12 ในภาคผนวก ค.) ถ้าคิดค่าส่วนเบี่ยงเบนของเวลาเบรกดาวนีย์ใหม่โดยไม่คิดค่าเวลาเบรกดาวนีย์ที่มากกว่า $9 \mu\text{s}$ จะมีค่าเท่ากับ $1.16 \mu\text{s}$ เช่นเดียวกับที่ระดับแรงดันป้อนที่ 1 ระยะแกป 20 ม.ม. ความดัน 2 บาร์ ขั้วบวก สัดส่วนของก๊าซ SF_6 ในก๊าซผสม $\text{SF}_6 - \text{N}_2$ 25% และระดับแรงดันป้อนที่ 1 ระยะแกป 20 ม.ม. ความดัน 2 บาร์ ขั้วบวก สัดส่วนของก๊าซ SF_6 ในก๊าซผสม $\text{SF}_6 - \text{N}_2$ 0% ถ้าคิดค่าส่วนเบี่ยงเบนของเวลาเบรกดาวนีย์ใหม่โดยตัดค่าที่มากกว่า $9 \mu\text{s}$ ที่มีค่าเดียวออกไปก็จะมีค่า SD เท่ากับ $1.12 \mu\text{s}$ และ $0.99 \mu\text{s}$ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าส่วนเบี่ยงเบนของเวลาเบรกดาวนีย์มีแนวโน้มลดลงเมื่อระดับแรงดันป้อนเพิ่มขึ้นในทุกสัดส่วนผสมของก๊าซผสม ทุกเงื่อนไขการทดลอง

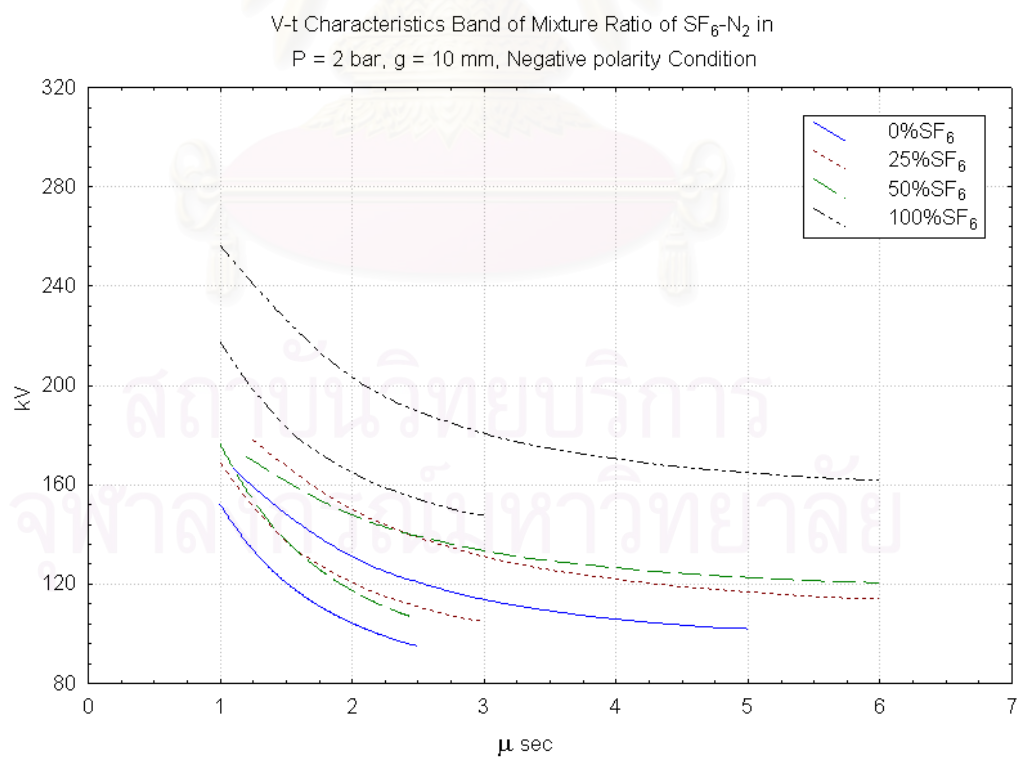
ในขณะที่ส่วนเบี่ยงเบนของแรงดันเบรกดาวนีย์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระดับแรงดันป้อนเพิ่มสูงขึ้นในทุกสัดส่วนผสมของก๊าซผสม ทุกเงื่อนไขการทดลองในรูปที่ 5.3 ข. ถึงรูปที่ 5.8 ข. ลักษณะการกระจายของข้อมูลนี้สามารถอธิบายได้ว่าที่แรงดันป้อนระดับที่ 1 ซึ่งมีระดับต่ำที่สุดการเบรกดาวนีย์เกิดขึ้นที่บริเวณหางคลื่นของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งค่าแรงดันที่นำมาใช้สร้างคุณลักษณะแรงดัน-เวลาจะเป็นค่ายอดแรงดันจึงมีส่วนเบี่ยงเบนของแรงดันเบรกดาวนีย์ต่ำ และเมื่อป้อนระดับแรงดันเพิ่มขึ้นจนเกิดการเบรกดาวนีย์ที่หน้าคลื่นแรงดันซึ่งมีความชันของหน้าคลื่นมากทำให้การกระจายของแรงดันเบรกดาวนีย์มีค่ามากดังนั้นส่วนเบี่ยงเบนของแรงดันเบรกดาวนีย์จึงเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงของการกระจายของแรงดันเบรกดาวนีย์ในแต่ละระดับแรงดันป้อนมีความสัมพันธ์กับรูปร่างของคุณลักษณะแรงดัน-เวลา ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงของส่วนเบี่ยงเบนของแรงดันเบรกดาวนีย์มาก ความชันของคุณลักษณะแรงดัน-เวลาจะชันมากเช่นในกรณีระยะแกป 10 ม.ม. ความดัน 2 บาร์ ขั้วลบ สัดส่วนของก๊าซ SF_6 ในก๊าซผสม $\text{SF}_6 - \text{N}_2$ 100% รูปที่ 5.4 ข. และรูปที่ 5.10 ในหัวข้อถัดไป

5.1 ผลของสัดส่วนของก๊าซ SF_6 ในก๊าซผสม $\text{SF}_6 - \text{N}_2$ ต่อคุณลักษณะแรงดัน-เวลา

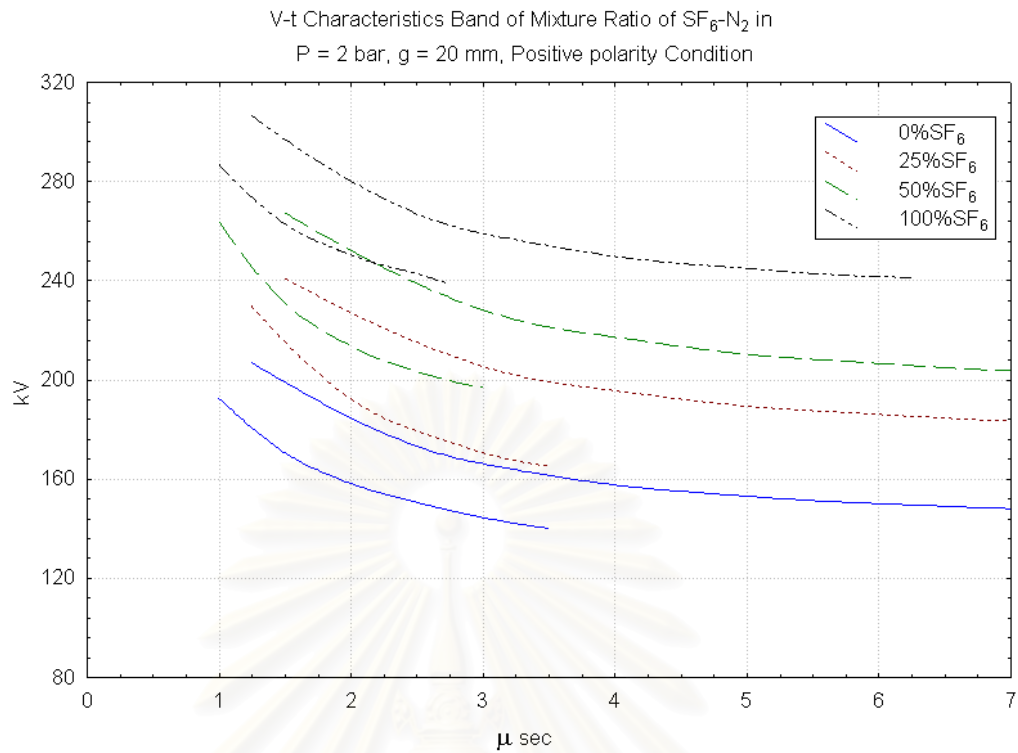
รูปที่ 5.9 ถึง 5.14 แสดงผลการทดลอง โดยแยกพิจารณาเฉพาะผลของสัดส่วนของก๊าซ SF_6 ในก๊าซผสม $\text{SF}_6 - \text{N}_2$ ต่อคุณลักษณะแรงดัน-เวลาในเงื่อนไข ระยะแกป 10 ม.ม. ความดัน 2 บาร์ แสดงในรูปที่ 5.9 และ 5.10 ในกรณีขั้วบวกและขั้วลบตามลำดับ ส่วนรูปที่ 5.11 และ 5.12 แสดงเงื่อนไขที่ ระยะแกป 20 ม.ม. ความดัน 2 บาร์ ในกรณีขั้วบวกและขั้วลบตามลำดับ และเงื่อนไข ระยะแกป 10 ม.ม. ความดัน 3 บาร์ ขั้วบวกในรูปที่ 5.13 และขั้วลบในรูปที่ 5.14



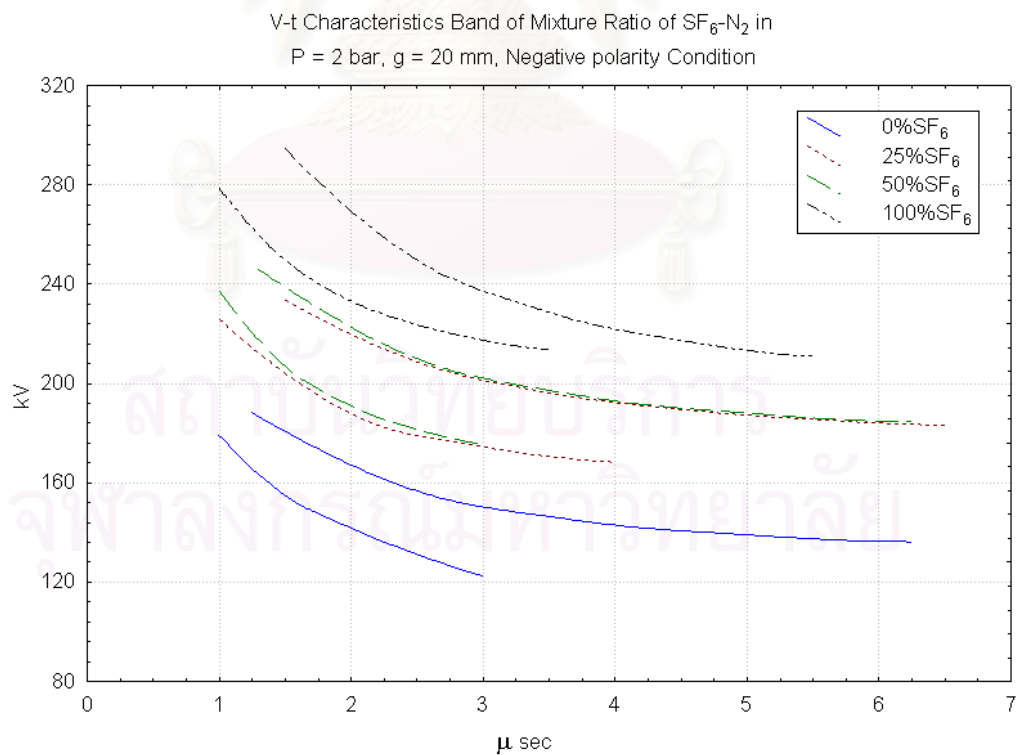
รูปที่ 5.9 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาของก๊าซผสมที่ ระยะแก๊ป 10 ม.ม. ความดัน 2 บาร์ ขั้วบวก



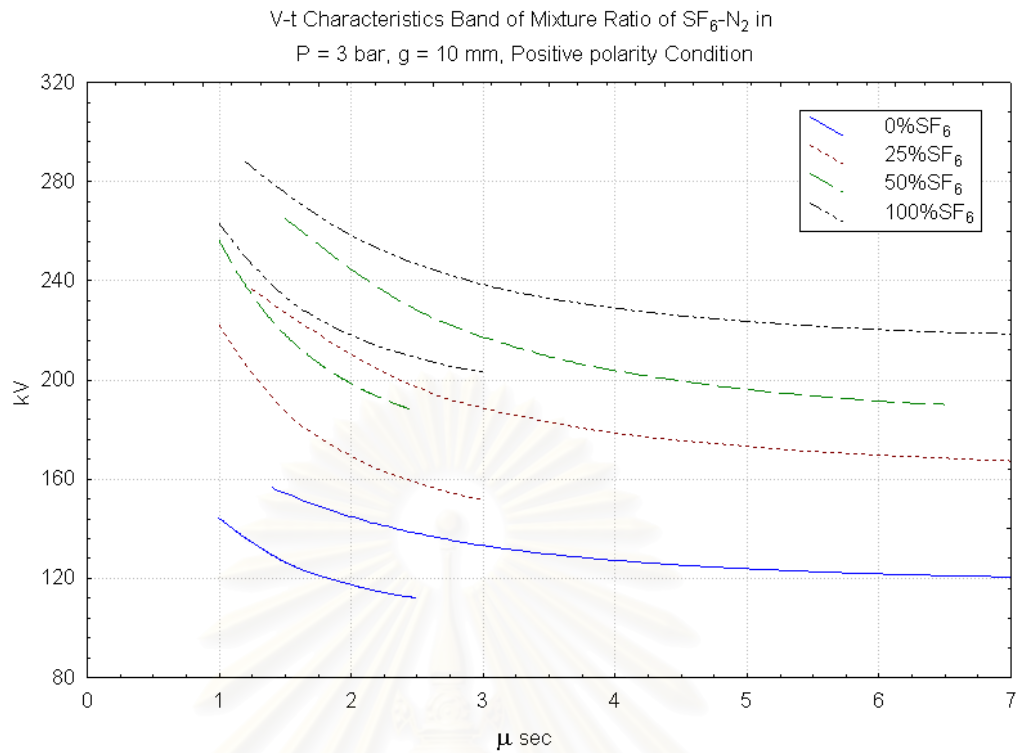
รูปที่ 5.10 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาของก๊าซผสมที่ ระยะแก๊ป 10 ม.ม. ความดัน 2 บาร์ ขั้วลบ



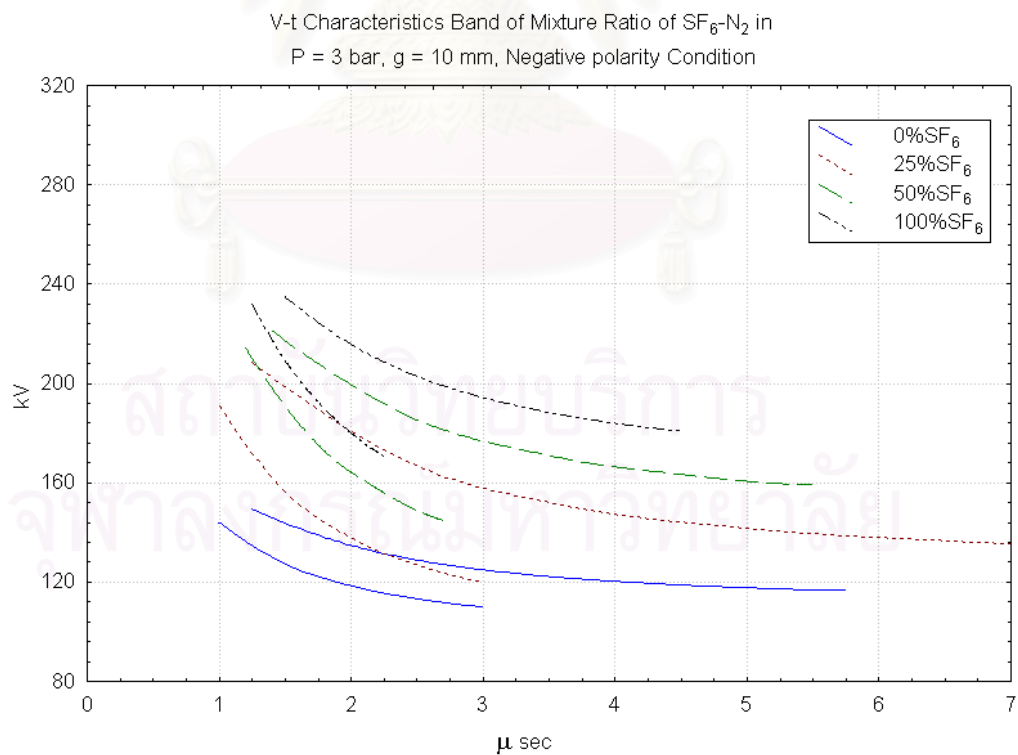
รูปที่ 5.11 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาของก๊าซผสมที่ ระยะแก๊ป 20 ม.ม. ความดัน 2 บาร์ ขั้วบวก



รูปที่ 5.12 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาของก๊าซผสมที่ ระยะแก๊ป 20 ม.ม. ความดัน 2 บาร์ ขั้วลบ



รูปที่ 5.13 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาของก๊าซผสมที่ ระยะแก๊ป 10 ม.ม. ความดัน 3 บาร์ ขั้วบวก



รูปที่ 5.14 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาของก๊าซผสมที่ ระยะแก๊ป 10 ม.ม. ความดัน 3 บาร์ ขั้วลบ

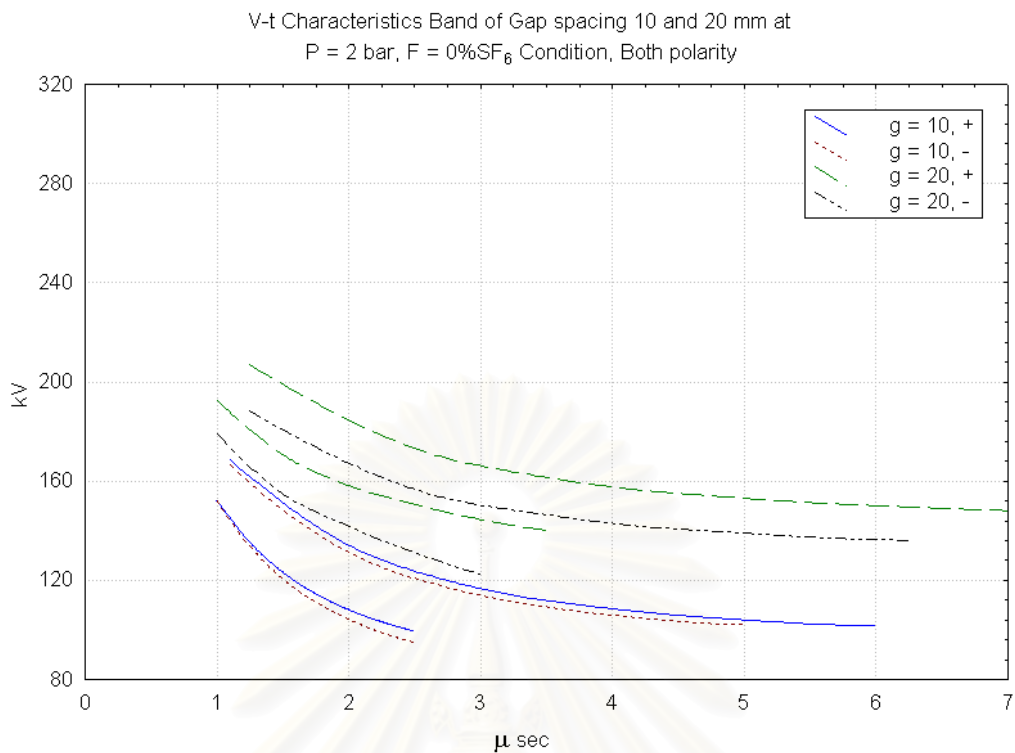
จากผลการทดลองพบว่าเส้นคุณลักษณะแรงดัน-เวลาขยับค่าสูงขึ้นเมื่อสัดส่วนของก๊าซ SF₆ ในก๊าซผสม SF₆ - N₂ เพิ่มขึ้น แต่ในกรณีเงื่อนไขที่ระยะแกป 10 ม.ม. ความดัน 2 บาร์ ขั้วลบ พบว่าสัดส่วนของก๊าซ SF₆ ในก๊าซผสม SF₆ - N₂ ที่ 25% มีค่าใกล้เคียงกับที่สัดส่วนของก๊าซผสม 50% โดยสูงกว่าที่สัดส่วนของก๊าซ SF₆ ในก๊าซผสม SF₆ - N₂ 0% ไม่มากนัก ในรูปที่ 5.10 และ ยังพบในรูปที่ 5.12 กรณีเงื่อนไขที่ระยะแกป 20 ม.ม. ความดัน 2 บาร์ ขั้วลบด้วยคือ คุณลักษณะแรงดัน-เวลาของสัดส่วนของก๊าซ SF₆ ในก๊าซผสม SF₆ - N₂ ที่ 25% มีความแตกต่างกับที่สัดส่วนของก๊าซผสม 50% น้อยมากที่ช่วงเบรกดาวน์หลังคลื่น(เวลามากกว่า 2 μs) และจะแตกต่างมากขึ้นเมื่อเวลาเบรกดาวน์ลดลง แต่ที่เงื่อนไขระยะแกป 10 ม.ม. ความดัน 3 บาร์ ขั้วลบ รูปที่ 5.14 ช่วงคุณลักษณะแรงดัน-เวลาของสัดส่วนของก๊าซผสม 50% สูงกว่าที่ 25% อย่างเห็นได้ชัด

เมื่อมองเปรียบเทียบรูปที่ 5.9 กับ รูปที่ 5.10 รูปที่ 5.11 กับ รูปที่ 5.12 และรูปที่ 5.13 กับ รูปที่ 5.14 พบว่าเส้นคุณลักษณะแรงดัน-เวลามีการเพิ่มของแรงดันเบรกดาวน์เมื่อสัดส่วนของก๊าซ SF₆ ในก๊าซผสม SF₆ - N₂ เพิ่มขึ้นในกรณีขั้วบวกมากกว่าขั้วลบ ในรูปที่ 5.9 กับ รูปที่ 5.11 และรูปที่ 5.10 กับ รูปที่ 5.12 แสดงให้เห็นว่าเมื่อระยะแกปเพิ่มขึ้นจาก 10 ม.ม. เป็น 20 ม.ม. ทำให้ช่วงคุณลักษณะแรงดัน-เวลาของก๊าซผสมมีระดับสูงกว่าช่วงคุณลักษณะแรงดัน-เวลาของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ (สัดส่วนของก๊าซ SF₆ ในก๊าซผสม SF₆ - N₂ 0%) มากขึ้นทั้งขั้วบวกและขั้วลบ เช่นเดียวกับในกรณีที่ความดันเพิ่มขึ้นจาก 2 บาร์เป็น 3 บาร์ เมื่อเปรียบเทียบรูปที่ 5.9 กับ รูปที่ 5.13 และรูปที่ 5.10 กับ รูปที่ 5.14

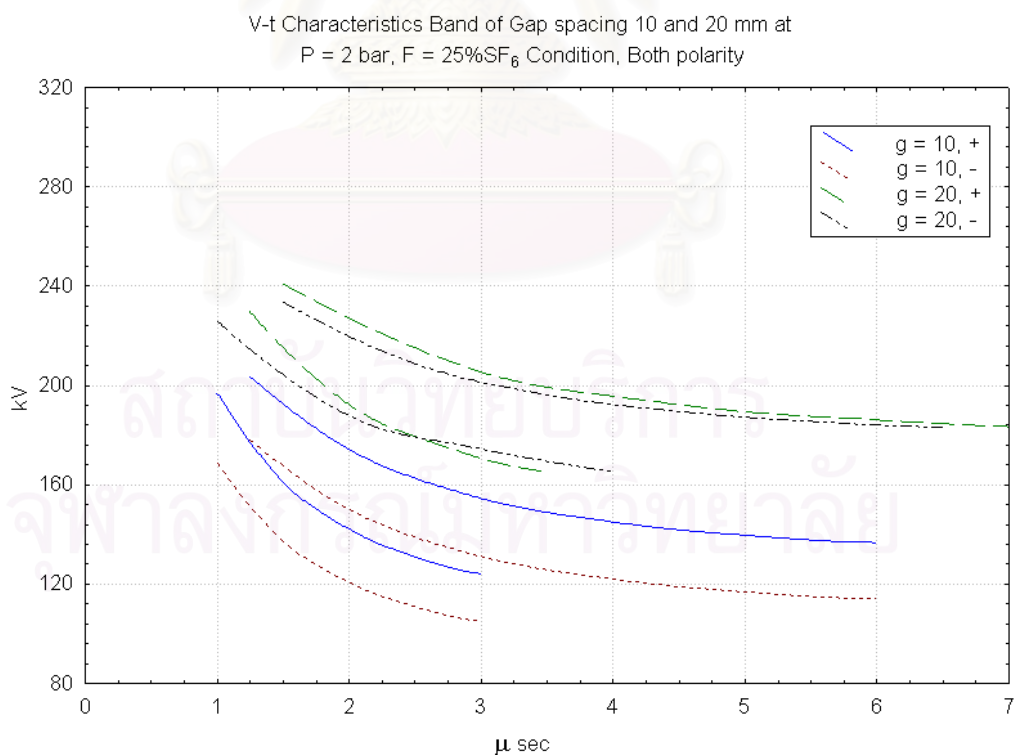
นอกจากนี้เมื่อสัดส่วนของก๊าซ SF₆ ในก๊าซผสม SF₆ - N₂ เพิ่มขึ้น ความชันของเส้นคุณลักษณะแรงดัน-เวลามีมากขึ้นเมื่อเวลาเบรกดาวน์น้อยลง (บริเวณ 1 ถึง 2 μs) ซึ่งเนื่องจากค่ายอดแรงดันที่เพิ่มขึ้น และมีลักษณะรูปร่างช่วงคุณลักษณะแรงดัน-เวลาของในกรณีก๊าซผสม SF₆ - N₂ คล้ายของก๊าซ SF₆ บริสุทธิ์ มากขึ้น

5.2 ผลของระยะแกปและขั้วแรงดันต่อคุณลักษณะแรงดัน-เวลา

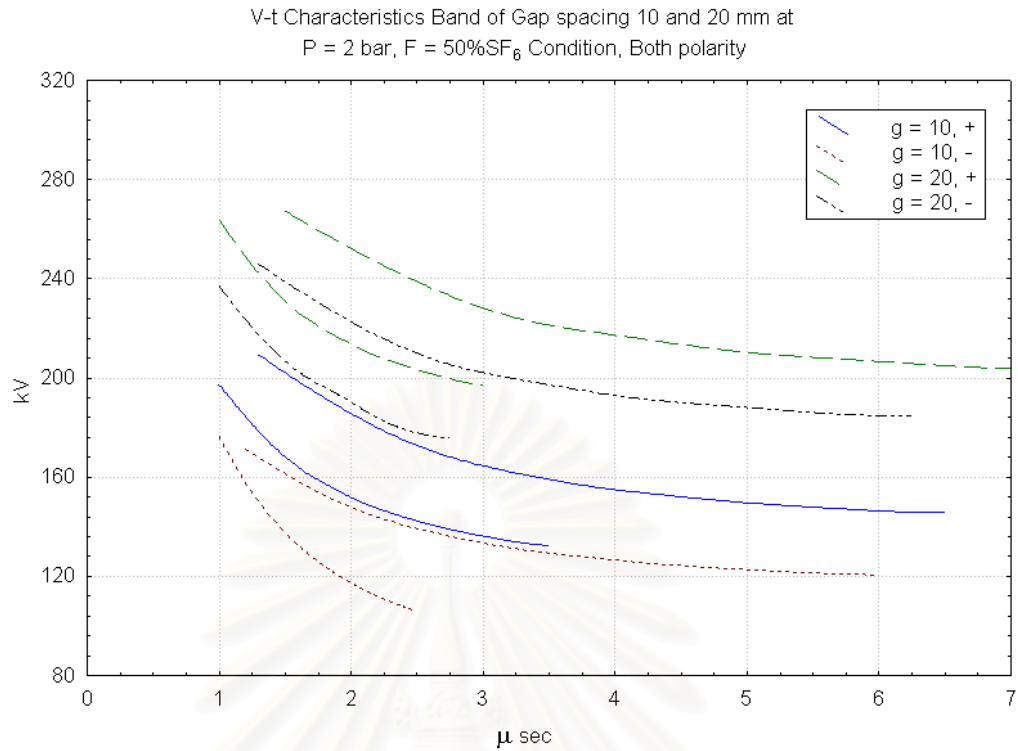
ผลของระยะแกปและขั้วแรงดันต่อเส้นคุณลักษณะแรงดัน-เวลาจากผลการทดลองแสดงในรูปที่ 5.15 ถึง รูปที่ 5.18 โดยแยกพิจารณาในสัดส่วนของก๊าซ SF₆ ในก๊าซผสม SF₆ - N₂ ที่ 0, 25, 50 และ 100% พบว่าเมื่อระยะแกปเพิ่มขึ้นเส้นคุณลักษณะแรงดัน-เวลาก็ขยับค่าสูงขึ้นในทุกสัดส่วนของก๊าซ SF₆ ในก๊าซผสม SF₆ - N₂ ซึ่งสามารถอธิบายด้วยการกระจายสนามไฟฟ้าของแกปเมื่อระยะแกปเพิ่มขึ้นความเครียดสนามไฟฟ้าในบริเวณอิเล็กโทรดแรงสูงจะมีค่าลดลง ดังนั้นการเกิดเบรกดาวน์จึงยากกว่าในกรณีระยะแกปแคบ



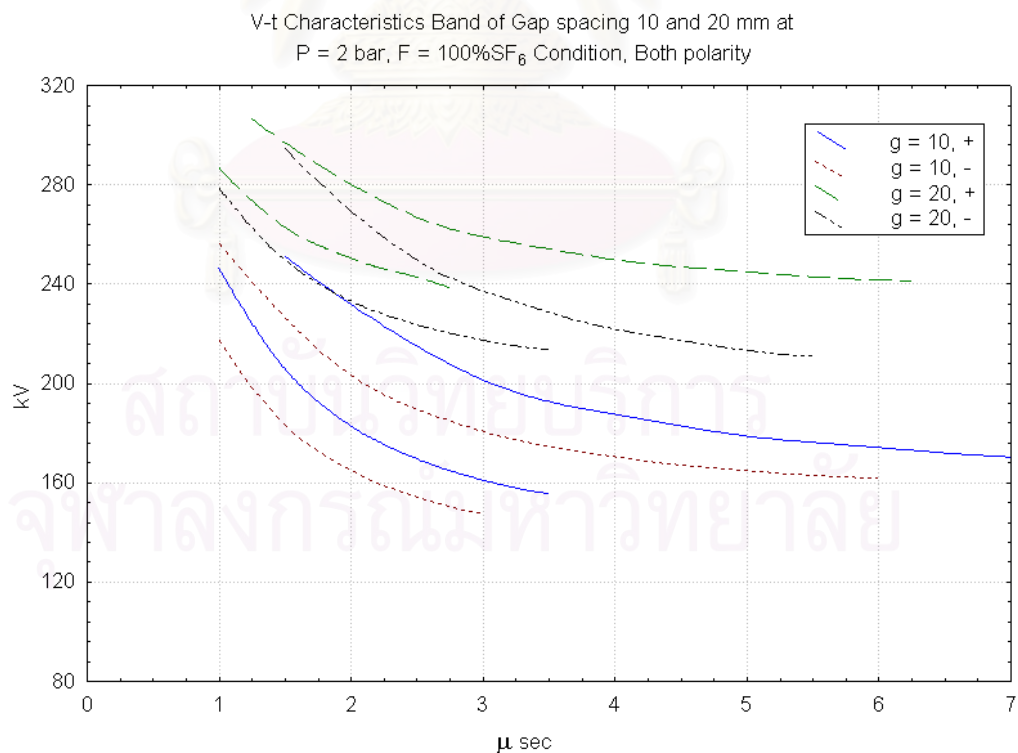
รูปที่ 5.15 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาของระยะแกป 10 และ 20 มม. ของอิมพัลส์ชั่ววอกและชั่วลบ
ที่ความดัน 2 บาร์ สัดส่วนของก๊าซ SF₆ ในก๊าซผสม SF₆ - N₂ 0%



รูปที่ 5.16 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาของระยะแกป 10 และ 20 มม. ของอิมพัลส์ชั่ววอกและชั่วลบ
ที่ความดัน 2 บาร์ สัดส่วนของก๊าซ SF₆ ในก๊าซผสม SF₆ - N₂ 25%

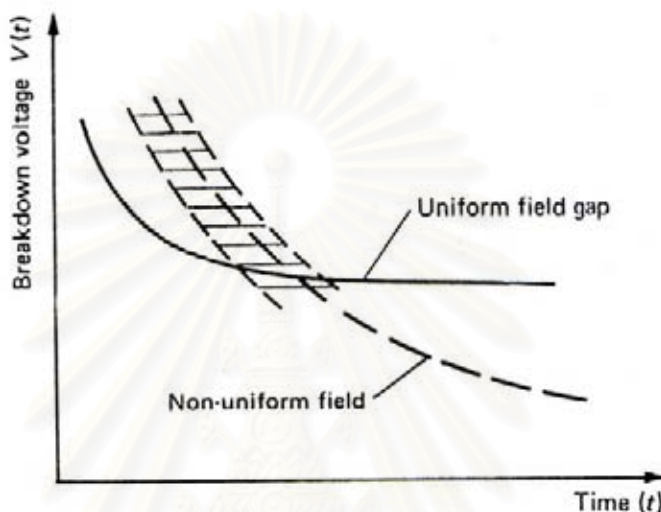


รูปที่ 5.17 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาของระยะแกป 10 และ 20 ม.ม. ของอิมพัลส์หัวบวกและหัวลบ ที่ความดัน 2 บาร์ สัดส่วนของก๊าซ SF₆ ในก๊าซผสม SF₆ - N₂ 50%



รูปที่ 5.18 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาของระยะแกป 10 และ 20 ม.ม. ของอิมพัลส์หัวบวกและหัวลบ ที่ความดัน 2 บาร์ สัดส่วนของก๊าซ SF₆ ในก๊าซผสม SF₆ - N₂ 100%

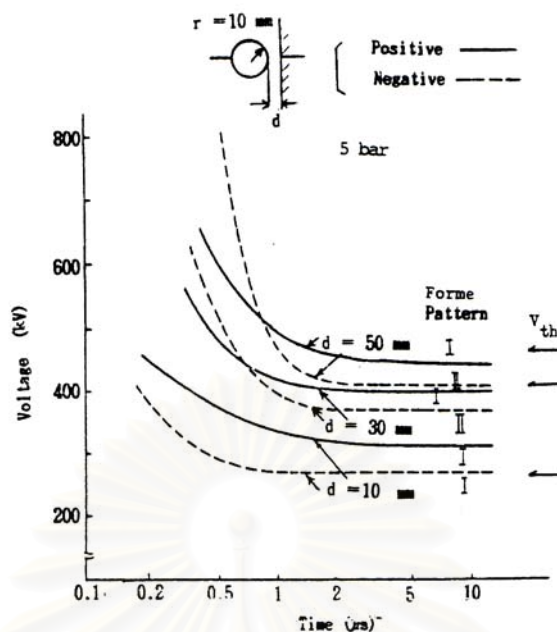
จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะแรงดัน-เวลา กับสภาพสนามไฟฟ้า พบว่า ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ลักษณะแรงดัน-เวลาของแรงดันอิมพัลส์จะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาน้อยๆ (น้อยกว่า 1 μ s) และเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นลักษณะแรงดัน-เวลาจะมีค่าค่อนข้างคงที่ แต่ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (ไม่สม่ำเสมอสูง) ลักษณะแรงดัน-เวลาของแรงดันอิมพัลส์มีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ยิ่งสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากลักษณะแรงดัน-เวลายิ่งลดลงมากเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ต่ำกว่ากรณีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ [4] ดังในรูปที่ 5.19



รูปที่ 5.19 ลักษณะแรงดัน-เวลา ภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอ

ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในอดีตของ Fujinami และ Takuma [27] ซึ่งแสดงผลในรายงานการวิจัยของ Izeki [28] อิเล็กโตรดลักษณะแบบทรงกลม-ระนาบทำจากเหล็กไร้สนิม โดยมีทรงกลมรัศมีขนาด 10 ม.ม. วางห่างจากระนาบเป็นระยะ 10 ม.ม. 30 ม.ม. และ 50 ม.ม. ที่ความดันก๊าซ 5 บาร์แสดงในรูปที่ 5.20

ความสัมพันธ์ของระยะแกป กับคุณลักษณะแรงดัน-เวลามีแนวโน้มที่ค่าแรงดันเบรกดาวนจะสูงขึ้นเมื่อระยะแกปเพิ่มขึ้น เพราะเมื่อระยะแกปเพิ่มขึ้นสนามไฟฟ้ามีความไม่สม่ำเสมอมากขึ้น ลักษณะแรงดัน-เวลามีรูปร่างชันขึ้นที่เวลาน้อยๆ และมีความชันมากขึ้นเมื่อระยะแกปมากขึ้น สามารถอธิบายลักษณะของคุณลักษณะแรงดัน-เวลาที่เกิดขึ้นว่า เมื่อป้อนแรงดันให้กับแกปที่มีความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าแตกต่างกัน เช่นที่แกปน้อยๆ ระยะห่างของอิเล็กโตรดมีไม่มาก สนามไฟฟ้ามีลักษณะค่อนข้างสม่ำเสมอ ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณปลายอิเล็กโตรดมีค่าสูง ระยะเวลาของอิเล็กโตรดเคลื่อนที่ในระยะใกล้ จึงเกิดเบรกดาวนที่เวลาสั้นกว่าในกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ดังนั้นแนวโน้มของคุณลักษณะแรงดัน-เวลาจึงมีความชันของเส้นมากขึ้นเมื่อสนามไฟฟ้ามีความไม่สม่ำเสมอสูงขึ้น

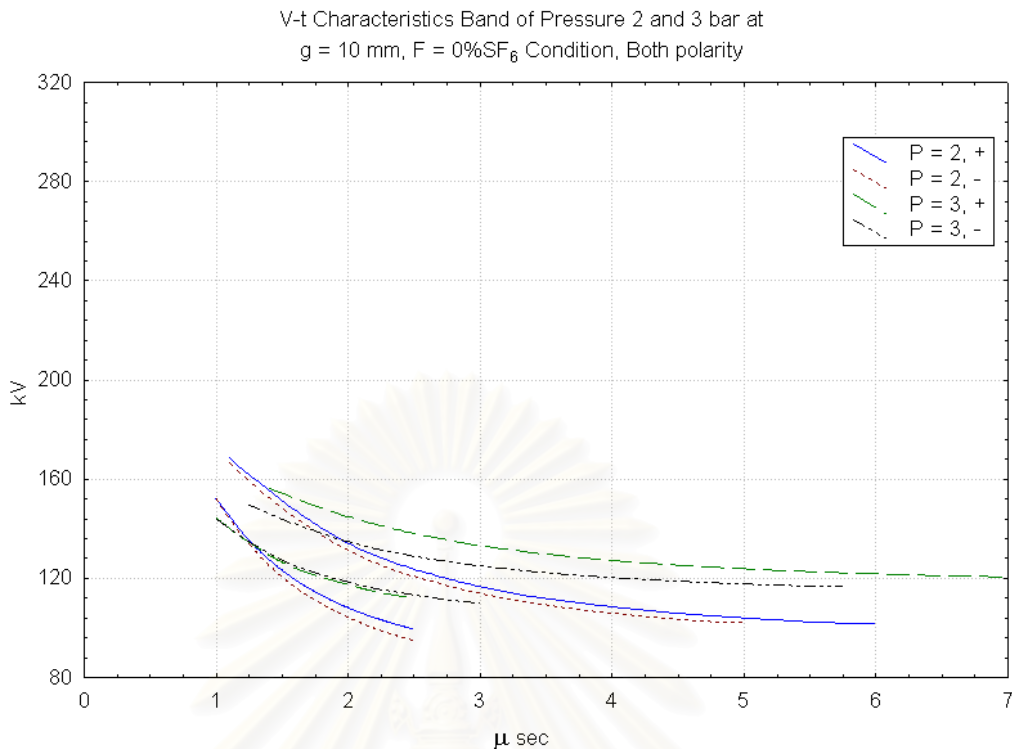


รูปที่ 5.20 ผลของระยะแกปต่อคุณลักษณะแรงดัน-เวลาของก๊าซ SF₆ [27]

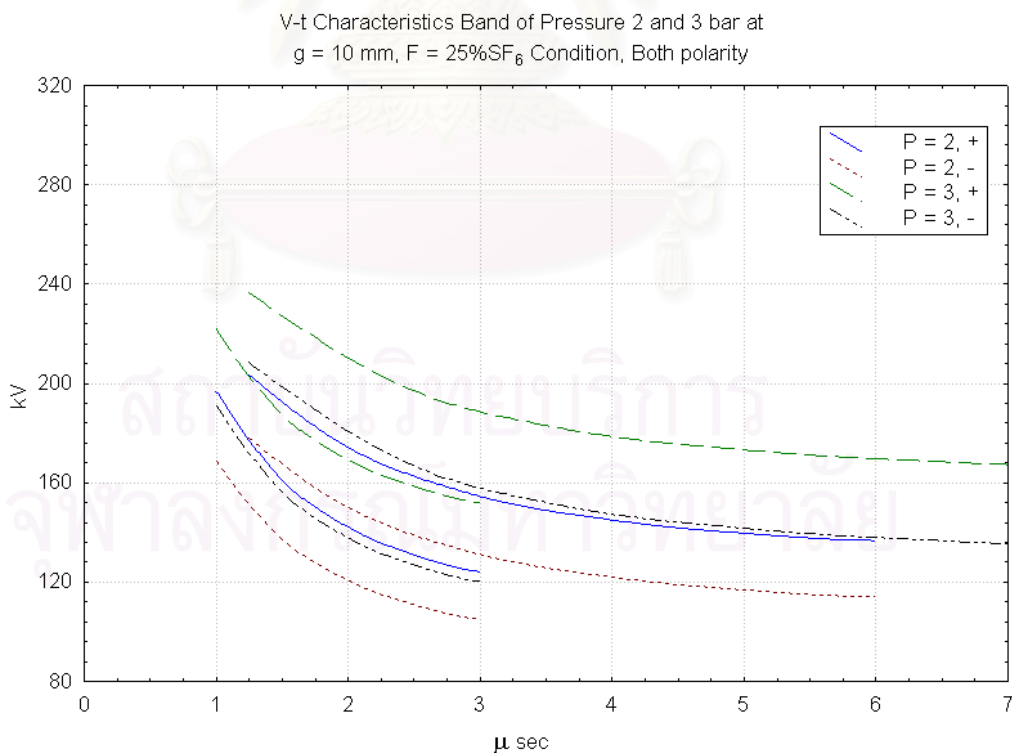
ความสัมพันธ์ระหว่างชั่วแรงแรงดันกับคุณลักษณะแรงดัน-เวลายังพบว่ากรณีชั่วแวกมีค่าสูงกว่ากรณีชั่วลบในทุกสัดส่วนผสมและจะเห็นความแตกต่างได้ชัดเจนขึ้นเมื่อสัดส่วนของก๊าซ SF₆ ในก๊าซผสม SF₆ - N₂ เพิ่มขึ้น

5.3 ผลของความดันและชั่วแรงแรงดันต่อคุณลักษณะแรงดัน-เวลา

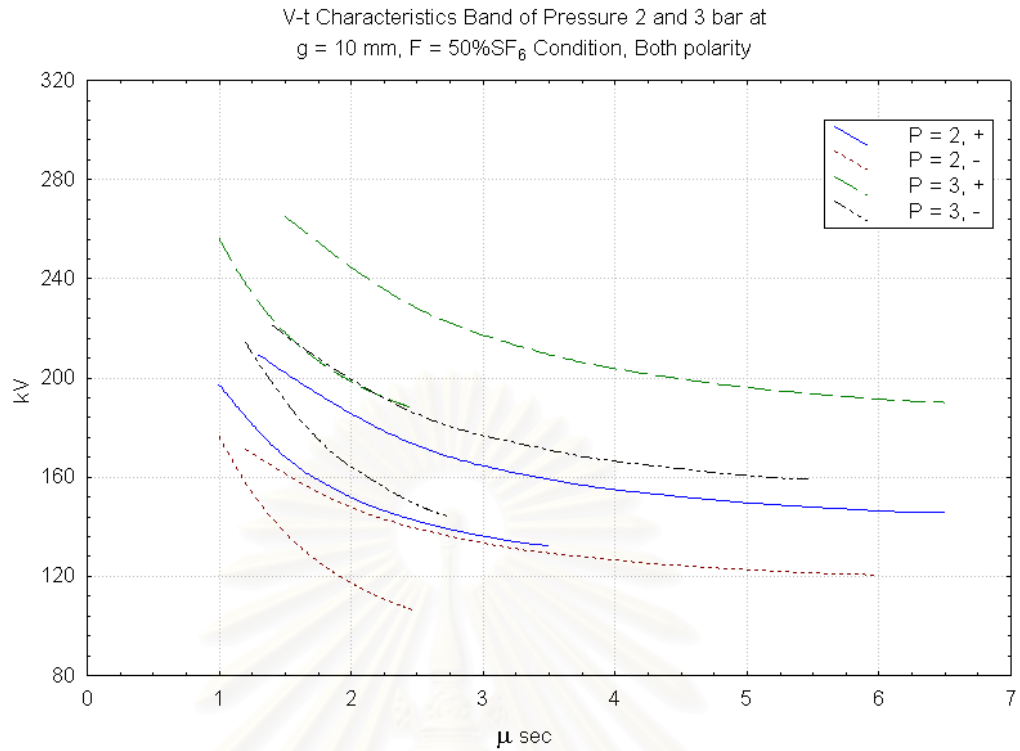
ในรูปที่ 5.21 ถึง รูปที่ 5.24 แสดงผลของความดันและชั่วแรงแรงดันต่อคุณลักษณะแรงดัน-เวลาโดยแยกพิจารณาในสัดส่วนของก๊าซ SF₆ ในก๊าซผสม SF₆ - N₂ ที่ 0, 25, 50 และ 100% พบว่า ความดันมีผลต่อลักษณะแรงดัน-เวลา คือแรงดันเบรกดาวนของก๊าซมีค่าสูงขึ้นเมื่อความดันก๊าซเพิ่มขึ้น. ซึ่งสังเกตได้ชัดเจนในรูปที่ 5.23 และ รูปที่ 5.24. ที่สัดส่วนของก๊าซ SF₆ ในก๊าซผสม SF₆ - N₂ 50 และ 100%.



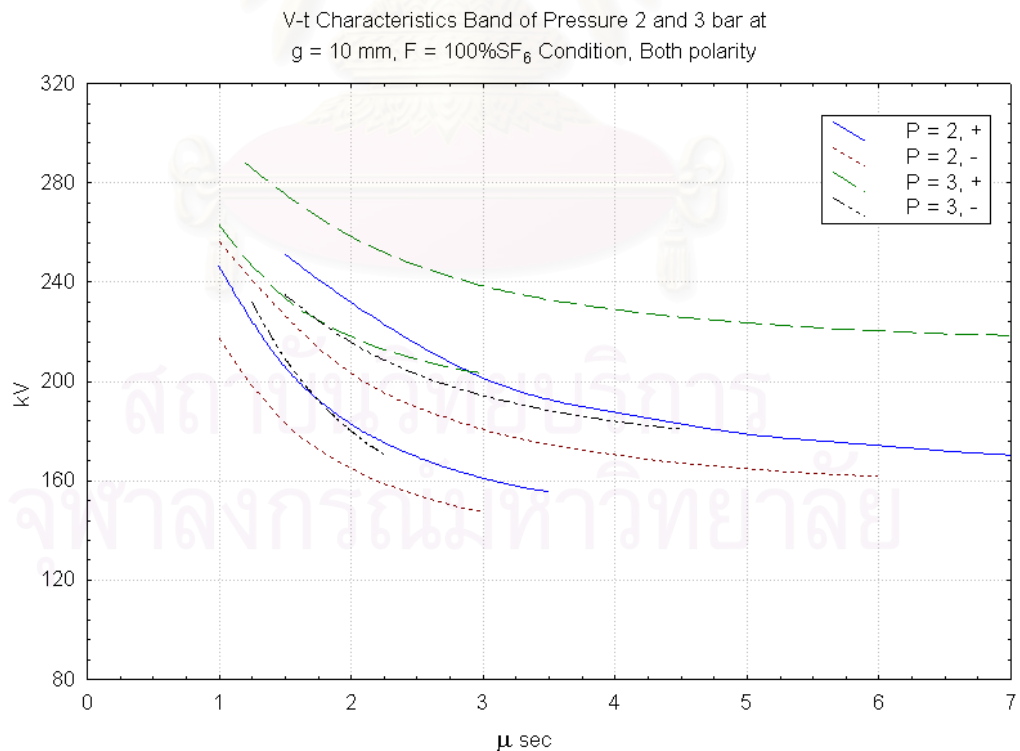
รูปที่ 5.21 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาของความดัน 2 และ 3 บาร์ ของอิมพัลส์ชั่วบวกละชั่วลบ ที่ระยะแกป 10 มม. สัดส่วนของก๊าซ SF₆ ในก๊าซผสม SF₆ - N₂ 0%



รูปที่ 5.22 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาของความดัน 2 และ 3 บาร์ ของอิมพัลส์ชั่วบวกละชั่วลบ ที่ระยะแกป 10 มม. สัดส่วนของก๊าซ SF₆ ในก๊าซผสม SF₆ - N₂ 25%

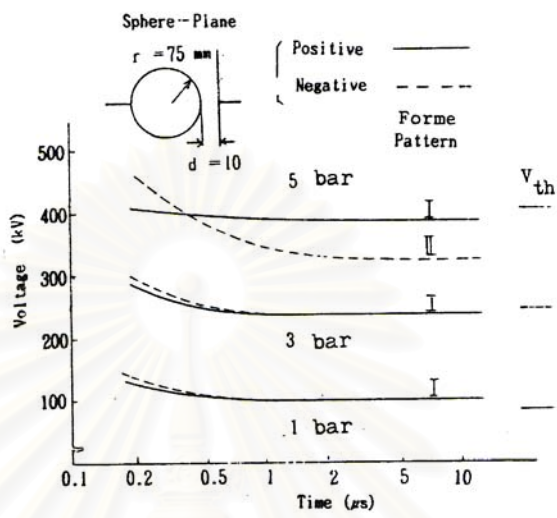


รูปที่ 5.23 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาของความดัน 2 และ 3 บาร์ ของอิมพัลส์ชั่ววอกและชั่วลบ
ที่ระยะแกป 10 มม. สัดส่วนของก๊าซ SF₆ ในก๊าซผสม SF₆ - N₂ 50%



รูปที่ 5.24 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาของความดัน 2 และ 3 บาร์ ของอิมพัลส์ชั่ววอกและชั่วลบ
ที่ระยะแกป 10 มม. สัดส่วนของก๊าซ SF₆ ในก๊าซผสม SF₆ - N₂ 100%

ซึ่งตรงกับการทดลองของ Fujinami และ Takuma ในอิเล็กโตรดลักษณะแบบทรงกลม-ระนาบ โดยมีทรงกลมรัศมีขนาด 75 ม.ม. ระยะแกป 10 ม.ม. ที่ความดันก๊าซ 1 3 และ 5 บาร์แสดงในรูปที่ 5.25



รูปที่ 5.25 ผลของความดันต่อคุณลักษณะแรงดัน-เวลาของก๊าซ SF₆ [27]

เมื่อเทียบผลการทดลองกับผลการทดลองในอดีตของ Fujinami และ Takuma แล้วพบว่าผลของความดันต่อคุณลักษณะแรงดัน-เวลากรณีช่วงบวกมีค่าสูงกว่ากรณีช่วงลบในทุกสัดส่วนผสม และจะเห็นความแตกต่างได้ชัดเจนขึ้นเมื่อความดันก๊าซเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกันกับในกรณีเพิ่มระยะแกปในข้อ 5.2

5.4 ค่า V_{50%}

ค่า V_{50%} จากผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ค. ข้อมูลแรงดันจากวิธีปรับระดับแรงดันขึ้นลงเพื่อหา V_{50%} โดยสรุปค่าในตารางที่ 5.1 ถึง 5.3 ในเงื่อนไขการทดลองที่ความดัน 2 และ 3 บาร์ และระยะแกป 10 ม.ม. และ 20 ม.ม. ค่าในตารางมีหน่วย KV

ตารางที่ 5.1 ค่า V_{50%} ในเงื่อนไขการทดลองที่ ความดัน 2 บาร์ ระยะแกป 10 ม.ม.

% SF ₆ ในก๊าซผสม	0 %	25 %	50 %	100 %
อิมพัลส์ +	102.46	117.28	122.10	140.72
อิมพัลส์ -	99.52	105.56	105.00	137.86

ตารางที่ 5.2 ค่า $V_{50\%}$ ในเงื่อนไขการทดลองที่ ความดัน 2 บาร์ ระยะแกป 20 ม.ม.

% SF ₆ ในก๊าซผสม	0 %	25 %	50 %	100 %
อิมพัลส์ +	139.88	158.02	179.36	210.87
อิมพัลส์ -	122.57	154.09	172.57	193.09

ตารางที่ 5.3 ค่า $V_{50\%}$ ในเงื่อนไขการทดลองที่ ความดัน 3 บาร์ ระยะแกป 10 ม.ม.

% SF ₆ ในก๊าซผสม	0 %	25 %	50 %	100 %
อิมพัลส์ +	112.96	154.16	168.05	185.39
อิมพัลส์ -	109.84	136.27	137.20	161.02

พบว่าค่า $V_{50\%}$ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนของก๊าซ SF₆ ในก๊าซผสม SF₆ - N₂ เพิ่มขึ้น

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองในบทที่ 5 สามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการทดลอง ซึ่งประกอบไปด้วย ผลของสัดส่วนของก๊าซ SF₆ ในก๊าซผสม SF₆ - N₂ ระยะแก๊ป ความดันและชั่วแรงแรงดัน ต่อคุณลักษณะแรงดัน-เวลาได้ดังนี้

1. คุณลักษณะแรงดัน-เวลาของระบบอิเล็กทรอนิกส์โทรดทรงกลม-ระนาบเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานมีช่วงแรงดันเบรกดาวน 100 ถึง 300 kV เวลาเบรกดาวนอยู่ในช่วง 1 ถึง 10 μsec โดยค่าแรงดันมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่เมื่อเวลาเบรกดาวนมากกว่า 3 μsec และคุณลักษณะแรงดัน-เวลามีความชันมากขึ้นเมื่อเวลาเบรกดาวนลดลง

2. การกระจายของแรงดันเบรกดาวนมีค่าน้อยที่ระดับแรงดันป้อนต่ำ คือในช่วงหางของคุณลักษณะแรงดัน-เวลามีระดับแรงดันคงที่ ซึ่งการกระจายของแรงดันเบรกดาวนจะมีมากขึ้นเมื่อระดับแรงดันป้อนสูงขึ้น เวลาเบรกดาวนลดลง ในทางกลับกัน การกระจายของเวลาเบรกดาวนมีค่าสูงที่ระดับแรงดันป้อนต่ำ และจะกระจายมากขึ้นเมื่อระดับแรงดันป้อนสูงขึ้น

3. คุณลักษณะแรงดัน-เวลามีค่าสูงขึ้นเมื่อสัดส่วนของก๊าซ SF₆ ในก๊าซผสม SF₆ - N₂ เพิ่มขึ้นในทุกเงื่อนไขการทดลอง แต่อัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดันจะลดลงเมื่อสัดส่วนของก๊าซ SF₆ ในก๊าซผสม SF₆ - N₂ เพิ่มขึ้น

4. คุณลักษณะแรงดัน-เวลามีค่าสูงขึ้นเมื่อระยะแก๊ปมีค่ามากขึ้น โดยมีระดับความแตกต่างมากขึ้นเมื่อสัดส่วนของก๊าซ SF₆ ในก๊าซผสม SF₆ - N₂ เพิ่มขึ้น และคุณลักษณะแรงดัน-เวลาของแรงดันอิมพัลส์ชั้วบวกมีค่าสูงกว่ากรณีชั้วลบ

5. คุณลักษณะแรงดัน-เวลามีค่าสูงขึ้นเมื่อความดันมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีระดับความแตกต่างมากขึ้นเมื่อสัดส่วนของก๊าซ SF₆ ในก๊าซผสม SF₆ - N₂ เพิ่มขึ้น และคุณลักษณะแรงดัน-เวลาของแรงดันอิมพัลส์ชั้วบวกมีค่าสูงกว่ากรณีชั้วลบเช่นเดียวกันในกรณีของระยะแก๊ป

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในงานวิจัยนี้ไม่ได้ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดอิเล็กทรอนิกส์ที่มีต่อเส้นคุณลักษณะแรงดัน-เวลา ซึ่งจากงานวิจัยในอดีตพบว่ามียุทธิพลต่อคุณลักษณะแรงดัน-เวลาเช่นกัน ดังนั้นควรมีการศึกษาวิจัยในประเด็นนี้เพิ่มขึ้น

2. ศึกษาผลของรูปคลื่นแรงดันแบบอื่นนอกเหนือจากรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50 μsec เช่นรูปคลื่นแรงดันความชันสูง (Steep front Impulse) ที่เวลาเบรกดาวน์อยู่ในช่วงน้อยกว่า 1 μsec เพราะการเกิดความบกพร่องในระบบไฟฟ้ามาจากหลายสาเหตุไม่ใช่มาจากฟ้าผ่าเท่านั้น และลักษณะรูปคลื่นฟ้าผ่าจริงก็แตกต่างจากรูปคลื่นมาตรฐาน
3. ศึกษาคุณลักษณะแรงดัน-เวลาในสัดส่วนของก๊าซ SF₆ ในก๊าซผสม SF₆ - N₂ อื่นๆ โดยเฉพาะที่สัดส่วนของก๊าซ SF₆ ในก๊าซผสม SF₆ - N₂ ต่ำๆ
4. ศึกษาคุณลักษณะแรงดัน-เวลาในระบบอิเล็กทรอนิกส์ชนิดอื่นๆ เช่นระบบเข็ม-ระนาบระบบทรงกลม-ทรงกลม เพื่อดูผลของสนามไฟฟ้า



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- 1 Dielectric Gases. Handbook of Electrical and Electornic Insulating Materials.
- 2 สำรวย สังข์สะอาด. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528.
- 3 Maller, V. N., and Naidu, M. S. Advances in High Voltage Insulation and Arc Interruption in SF₆ and Vacuum, Pergamon Press, 1981.
- 4 Kuffel, E.; Zaengl, W.; and Kuffel, J. High Voltage Engineering Fundamentals 2nd edition, Oxford: Newnes, 2000.
- 5 Tekletsadik, K., and Campbell, L.C. SF₆ Breakdown in GIS. IEE Proc.-Sci. Meas Technol., Vol.143, No.5, (September 1996): 270-276.
- 6 Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC) Radiative Forcing of Climate Change. The 1994 Report of the Scientific Assessment Working Group of IPCC.
- 7 Clavreul, R. Analysis Of Gas Mixture Decomposition By-Products in Electric Discharges. 7th International Conf. On Dielectric Materials Measurements & Applications Conf. Pub., no.430, (1996): 176-179
- 8 Christophorou, L. G., and Van Brunt, R. J. SF₆ - N₂ Mixtures, Basic and HV Insulation Properties. IEEE Trans. On Diel. And EI, Vol.2, No.5, (1995): 952-1003.
- 9 Graf, R., and Boeck, W. Statistical Breakdown Behavior of N₂ - SF₆ Gas Mixtures Under LI Stress. High Voltage Engineering Symposium, 22-27 August 1999 Conf. Pub. No. 467, (1999).
- 10 Qiu, X. Q.; Chalmers, I. D.; and Qiu, Y. Effect Of Initiatory Electrons On Breakdown Characteristics Of And Its Mixtures. IEE Proc.-Sci. Meas Technol., Vol.148, No.2, (March 2001): 80-83.
- 11 Ravindra, A., and Wolfgang, M. High Voltage Insulation Engineering: Wiley Eastern Ltd., New Age International Publishers Ltd., 1995.
- 12 Mazen, A. S.; and ABD E. H. A. Breakdown Voltage and Time-to- Breakdown as Influenced by the Steepness of the Applied Positive Impulse. IEEE Trans. On Indus. App., Vol.24, No.6, (November/December 1988): 1031-1037.

- 13 Suzuki, T.; and Miyake, K. Experimental Study of Breakdown Voltage-Time Characteristics of Large Air Gaps with Lightning Impulses. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems vol. PAS-96, No.1, (January/February 1977): 227-233.
- 14 Naidu, M. S., and Venkatesh, S. K. A Test setup with Automated Measurements for Impulse Voltage Breakdown Studies of Gaseous Insulation. High Voltage Engineering Symposium, 22-27 August 1999 Conf. Pub. No. 467, (1999).
- 15 Zhou, L. M.; Qiu, Y.; and Feng, Y. P. The Influence of O₂ and N₂ Additives on Impulse Breakdown of SF₆ in A Non-uniform Field. Conf. Rec. of the 1994 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (June 5-8, 1994).
- 16 Pecastaing, L., et al. Investigation of Breakdown Characteristics of N₂, SF₆ and SF₆-N₂ Mixtures Under Pressure. High Voltage Engineering Symposium, 22-27 August 1999 Conf. Pub. No. 467, (1999).
- 17 กัลยา วานิชย์บัญชา. การวิเคราะห์สถิติ: สถิติเพื่อการตัดสินใจ. พิมพ์ครั้งที่ 4: โรงพิมพ์จุฬาฯ, 2537.
- 18 คณาจารย์ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาฯ. ความน่าจะเป็นและสถิติ. พิมพ์ครั้งที่ 8 : ห้างหุ้นส่วนจำกัดพิทักษ์การพิมพ์, 2537.
- 19 Montanari, G.C.; Mazzanti, G.; Cacciari, M.; and Fothergill, J.C. Optimum Estimators for the Weibull Distribution of Censored Data Singly-censored Tests. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation vol.4, no.4(August 1997): 462-469.
- 20 Fothergill, J.C. Estimating the Cumulative Probability of Failure Data Points to be Plotted on Weibull and other Probability Paper. IEEE Trans. on Electrical Insulation vol.28, no.3(June 1990); 489-492.
- 21 คมสัน เพ็ชรวิรัช, สุกิจ ชูชาญชัย. แรงดันวาบไฟตามผิวท่อ PVC. การประชุมทางวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 20 พ.ศ. 2540.
- 22 Mardikyan, K., et al. AC Breakdown Strength of N₂, SF₆ and a Mixtures of N₂+SF₆ Containing a Small Amount of SF₆. Conf. Rec. of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (June 16-19, 1996).
- 23 Singha, S.; Joy, T. M.; and Naidu, M. S. Study of Fast Transients generated in a GIS bus duct in compressed SF₆-N₂ gas mixtures containing lower percentages of SF₆. Dielectric Materials, Meas. And App. Conf. Publ., No.473.

- 24 IEEE Std 4-1995. IEEE Standard Technique for High-Voltage Testing, 1995.
- 25 IEC 60-1 International Standard High-Voltage Test Technique, 2nd Edition, 1989.
- 26 Graf, R., and Boeck, W. Defect Sensibility of N₂ - SF₆ Gas Mixtures with Equal Dielectric Strength, 2000 Conf. On El. Ins and Diel. Phenomena, (2000).
- 27 Fujinami, H., and Takuma, T. Conf. On Electric Discharge of IEE of Japan. ED-81-5, 1981.
- 28 Izeki, N. Voltage-time characteristics of SF₆ gas, Electra No. 101, (1982) :41–59.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

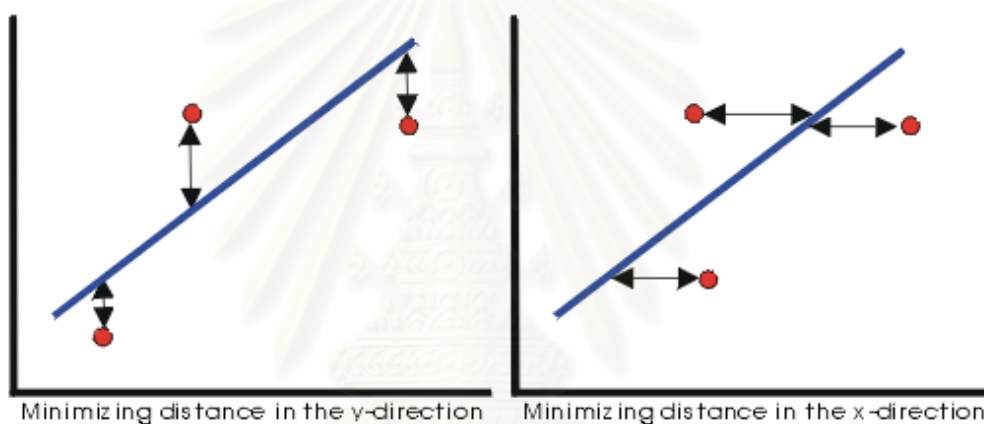
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

Least Square Estimation

Least Square เป็นการทำให้ค่ากำลังสองของระยะทางจากจุดข้อมูลไปยังเส้นตรงมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งอาจเป็นระยะทางตามแนวแกนตั้งหรือแนวแกนนอนก็ได้ ถ้าเป็น Regression ตามแนวแกนนอนหรือแกน x คือ ส่วนเบี่ยงเบนของข้อมูลตามแนวแกน x กับเส้นตรงมีค่าน้อยที่สุด และกลับกันในกรณีแกน y วิธีนี้ใช้ได้กับชุดข้อมูลที่มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง วิธีนี้จะใช้ได้กับข้อมูลแบบ Uncensored

[22]



รูปที่ ก.1 Least Square ตามแนวแกน y และ x

ก.1 Regression ตามแนวแกน y

สมมติว่ามีชุดข้อมูลอยู่ N ตัว ได้แก่ $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ ให้เส้นตรง $y = \hat{a} + \hat{b}x$ เป็นเส้นตรงที่ทำให้ค่ากำลังสองของระยะทางตามแนวตั้งจากจุดข้อมูลไปยังเส้นตรงนี้มีค่าน้อยที่สุด ตามสมการ

$$\sum_{i=1}^N (\hat{a} + \hat{b}x_i - y_i)^2 = \min(a, b) \sum_{i=1}^N (a + bx_i - y_i)^2 \quad (\text{ก.1})$$

$$\hat{a} = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} - \hat{b} \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} = \bar{y} - \hat{b}\bar{x} \quad (\text{ก.2})$$

$$\hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{N}}{\sum_{i=1}^N x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^N x_i\right)^2}{N}} \quad (\text{ก.3})$$

ก.2 Regression ตามแนวแกน x

สมมติว่ามีชุดข้อมูลอยู่ N ตัว ได้แก่ $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ ให้เส้นตรง $x = \hat{a} + \hat{b}y$ เป็นเส้นตรงที่ทำให้ค่ากำลังสองของระยะทางตามแนวนอนจากจุดข้อมูลไปยังเส้นตรงนี้มีค่าน้อยที่สุด ตามสมการ

$$\sum_{i=1}^N (\hat{a} + \hat{b}y_i - x_i)^2 = \min(a, b) \sum_{i=1}^N (a + by_i - x_i)^2 \quad (ก.4)$$

$$\hat{a} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} - \hat{b} \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} = \bar{x} - \hat{b}\bar{y} \quad (ก.5)$$

$$\hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{N}}{\sum_{i=1}^N y_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^N y_i\right)^2}{N}} \quad (ก.6)$$

ก.3 Correlation Coefficient

Correlation Coefficient ρ เป็นค่าที่บ่งบอกว่า Linear Regression นั้นให้สมการเส้นตรงที่พิตกับข้อมูลมากน้อยเพียงใด โดย ρ มีค่าตามสมการ

$$\rho = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (ก.7)$$

σ_{xy} คือ Covariance ของ x และ y σ_x คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ x σ_y คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ y ค่า Correlation Coefficient คาดเดา ρ ของข้อมูล N ตัว สามารถหาได้ดังนี้

$$\hat{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{N}}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^N x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^N x_i\right)^2}{N} \right) \left(\sum_{i=1}^N y_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^N y_i\right)^2}{N} \right)}} \quad (ก.8)$$

$\hat{\rho}$ จะมีค่าอยู่ในช่วง $[-1, 1]$ ถ้าค่า $\hat{\rho}$ มีค่าเข้าใกล้ 1 หรือ -1 แสดงว่าข้อมูลยังมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง คือเป็นเส้นตรงที่มีความชันเป็นบวกและลบตามลำดับ แต่ถ้า $\hat{\rho}$ มีค่าเป็นศูนย์ แสดงว่าข้อมูลไม่มีแนวโน้มที่จะเรียงตัวเป็นเส้นตรงเลย

ภาคผนวก ข

ข้อมูลแรงดันและเวลาเบรกดาวน

ข้อมูลแรงดันและเวลาเบรกดาวนเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานรูปคลื่น 1.2/50 μ s ให้แก่ชุดทดลองที่เงื่อนไขต่างๆ คือ ความดัน (P) ระยะเวลา (g) สัดส่วนของก๊าซ SF₆ ในก๊าซผสม SF₆ - N₂ (F) และชั่วแรงดันอิมพัลส์ โดยมีระดับแรงดันที่ป้อน 5 ระดับในแต่ละเงื่อนไขการทดลองแสดงที่ด้านบนของตาราง

ค่าทางสถิติของข้อมูล ประกอบด้วย ค่ากลาง (m) และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล (SD) ค่ากลางของข้อมูลคือ เวลาตำแหน่งกลาง (Median Time) และแรงดันเฉลี่ย (Average Voltage) ส่วนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลคือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเวลา และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันเบรกดาวนแสดงที่ด้านล่างของตาราง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข.1 ข้อมูลเบรกดาวนที่ P = 2 บาร์, g = 10 ม.ม.

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลเบรกดาวนที่ P = 2 บาร์, g = 10 ม.ม., F = 0% ไข้วบวก

ระดับที่ 1 = 107.10 kV			ระดับที่ 2 = 124.95 kV			ระดับที่ 3 = 142.80 kV			ระดับที่ 4 = 157.08 kV			ระดับที่ 5 = 185.64 kV		
No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	T(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)
1	4.80	104.23	21	2.06	120.48	41	1.67	133.13	61	1.43	142.44	81	1.02	155.47
2	4.19	104.23	22	1.80	117.15	42	1.55	130.57	62	1.36	139.87	82	1.04	156.14
3	3.09	104.23	23	1.78	118.49	43	1.44	126.93	63	1.46	145.64	83	1.15	163.48
4	2.61	103.91	24	1.74	118.49	44	1.36	126.40	64	1.52	142.11	84	1.17	163.48
5	5.67	104.23	25	1.93	118.05	45	1.80	133.45	65	1.60	143.08	85	1.13	160.81
6	2.44	104.86	26	1.79	118.49	46	1.53	132.81	66	1.32	138.59	86	1.08	160.42
7	3.49	104.23	27	2.04	120.48	47	1.56	130.75	67	1.45	142.11	87	1.02	154.81
8	4.62	105.18	28	1.80	115.49	48	1.49	129.71	68	1.40	138.47	88	1.04	154.14
9	3.86	104.86	29	1.82	116.77	49	1.46	128.32	69	1.35	137.94	89	1.13	155.16
10	3.47	104.23	30	1.74	113.83	50	1.33	127.04	70	1.30	137.30	90	1.18	165.15
11	3.92	104.23	31	1.72	117.49	51	1.64	132.17	71	1.25	138.26	91	1.15	164.81
12	2.66	104.86	32	1.68	112.50	52	1.50	129.01	72	1.15	141.28	92	1.16	164.81
13	3.70	104.26	33	1.78	118.49	53	1.48	126.93	73	1.18	140.51	93	1.13	163.15
14	4.04	104.23	34	1.76	117.15	54	1.44	127.68	74	1.38	137.94	94	1.09	159.48
15	2.53	104.23	35	2.87	117.73	55	1.52	129.71	75	1.47	143.40	95	1.16	163.48
16	3.71	104.86	36	2.12	121.81	56	1.38	126.93	76	1.15	140.22	96	1.04	158.48
17	4.28	104.86	37	1.90	117.15	57	1.36	125.89	77	1.16	139.87	97	1.08	158.14
18	3.92	104.23	38	2.40	117.73	58	1.50	129.71	78	1.42	146.93	98	1.16	163.48
19	3.36	104.23	39	2.70	118.19	59	1.58	130.75	79	1.27	137.30	99	1.12	162.48
20	3.74	104.86	40	1.92	114.49	60	1.42	126.93	80	1.24	145.83	100	1.20	164.15
m	3.73	104.45	m	1.81	117.52	m	1.50	129.24	m	1.36	140.96	m	1.13	160.58
SD	0.81	0.36	SD	0.33	2.22	SD	0.11	2.41	SD	0.13	2.94	SD	0.06	3.80

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลเบรกดาวนที่ P = 2 บาร์, g = 10 ม.ม., F = 0% ไข้วลบ

ระดับที่ 1 = 103.53 kV			ระดับที่ 2 = 121.38 kV			ระดับที่ 3 = 142.80 kV			ระดับที่ 4 = 160.65 kV			ระดับที่ 5 = 178.50 kV		
No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	T(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)
1	2.34	101.11	21	1.76	113.95	41	1.58	126.81	61	1.40	139.82	81	1.04	152.38
2	3.98	101.71	22	1.84	114.62	42	1.59	127.38	62	1.34	140.43	82	1.16	157.19
3	3.38	101.71	23	1.78	114.62	43	1.54	126.81	63	1.30	144.13	83	1.15	153.66
4	2.80	101.11	24	1.74	113.95	44	1.54	126.81	64	1.34	142.28	84	1.22	160.40
5	4.64	101.71	25	2.46	114.62	45	1.87	130.57	65	1.28	140.43	85	1.12	156.23
6	3.24	101.71	26	1.92	114.85	46	1.85	127.94	66	1.18	142.28	86	1.08	152.70
7	3.70	101.71	27	1.88	114.62	47	1.73	126.81	67	1.40	141.05	87	1.20	157.83
8	2.30	102.31	28	1.68	115.30	48	1.50	123.98	68	1.32	138.59	88	1.07	153.02
9	2.88	101.71	29	1.72	114.62	49	1.69	126.24	69	1.36	145.36	89	1.00	147.57
10	2.00	102.31	30	2.40	117.09	50	1.95	134.09	70	1.30	145.64	90	1.14	155.91
11	3.28	101.71	31	2.62	117.73	51	1.85	131.34	71	1.28	142.90	91	1.12	154.63
12	2.14	101.71	32	1.86	114.62	52	1.74	129.64	72	1.22	140.43	92	1.09	153.98
13	2.22	101.71	33	1.76	114.62	53	1.47	126.81	73	1.18	140.43	93	1.11	155.27
14	2.78	101.11	34	1.64	113.95	54	1.56	123.98	74	1.47	142.90	94	1.00	148.85
15	3.02	101.71	35	1.64	114.62	55	1.45	123.98	75	1.25	136.12	95	1.16	158.48
16	1.98	101.71	36	2.34	115.49	56	1.77	130.77	76	1.20	139.82	96	1.02	148.21
17	2.94	100.52	37	2.16	114.85	57	1.69	131.34	77	1.22	138.59	97	1.10	153.98
18	2.04	100.52	38	2.50	113.28	58	1.44	127.38	78	1.38	137.97	98	1.05	151.42
19	1.98	101.11	39	1.84	113.95	59	1.55	126.81	79	1.26	139.82	99	1.17	158.48
20	2.49	100.52	40	2.91	116.45	60	1.65	127.38	80	1.18	138.59	100	1.08	152.06
m	2.79	101.47	m	1.85	114.89	m	1.62	127.84	m	1.29	140.88	m	1.11	154.11
SD	0.74	0.53	SD	0.38	1.09	SD	0.15	2.69	SD	0.08	2.48	SD	0.06	3.51

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลเบรกดาวนที่ P = 2 บาร์, g = 10 ม.ม., F = 25% ^{ขั้วบวก}

ระดับที่ 1 = 135.66 kV			ระดับที่ 2 = 157.08 kV			ระดับที่ 3 = 178.50 kV			ระดับที่ 4 = 199.92 kV			ระดับที่ 5 = 228.48 kV		
No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	T(μs)	V(kV)
1	3.62	128.96	21	3.11	147.89	41	2.20	163.61	61	1.52	185.42	81	1.20	198.58
2	4.12	127.68	22	2.49	146.61	42	2.48	167.46	62	1.40	181.57	82	1.24	200.82
3	4.58	128.32	23	2.34	145.64	43	1.76	157.51	63	1.61	186.38	83	1.19	190.56
4	4.13	129.60	24	3.70	149.17	44	1.92	159.44	64	1.36	180.93	84	1.25	200.50
5	5.32	130.24	25	2.56	145.00	45	1.60	156.23	65	1.48	182.21	85	1.12	182.54
6	3.24	128.96	26	2.61	145.96	46	2.27	162.97	66	1.52	183.50	86	1.22	200.50
7	4.49	129.60	27	2.74	146.61	47	1.64	161.36	67	1.45	180.61	87	1.17	192.48
8	5.76	130.24	28	2.26	144.68	48	1.76	163.93	68	1.60	185.42	88	1.20	196.33
9	4.62	128.96	29	3.37	149.81	49	2.15	164.89	69	1.32	177.72	89	1.22	190.56
10	5.38	129.60	30	2.53	147.89	50	1.94	162.97	70	1.53	182.21	90	1.15	185.42
11	5.67	128.96	31	2.02	145.00	51	2.08	164.25	71	1.36	179.01	91	1.20	189.59
12	4.55	128.96	32	2.96	147.89	52	2.34	165.53	72	1.42	180.29	92	1.17	193.76
13	4.85	130.24	33	1.96	145.00	53	2.17	164.89	73	1.28	179.01	93	1.24	196.97
14	4.81	129.60	34	2.38	145.32	54	1.52	159.44	74	1.33	179.65	94	1.19	195.05
15	3.04	127.68	35	3.92	149.81	55	1.83	161.36	75	1.48	183.50	95	1.24	196.97
16	3.37	128.32	36	2.16	145.64	56	1.96	163.61	76	1.36	179.65	96	1.22	193.76
17	2.62	127.68	37	2.59	146.61	57	2.22	164.89	77	1.26	177.08	97	1.19	185.42
18	3.76	129.60	38	2.22	145.96	58	2.04	164.89	78	1.41	181.57	98	1.22	196.97
19	4.27	128.32	39	1.96	143.40	59	1.83	163.61	79	1.55	183.50	99	1.16	189.91
20	4.76	128.32	40	3.32	147.89	60	2.16	164.25	80	1.37	180.29	100	1.23	196.33
m	4.52	128.99	m	2.55	146.59	m	2.00	162.85	m	1.42	181.48	m	1.20	193.65
SD	0.87	0.84	SD	0.57	1.77	SD	0.26	2.83	SD	0.10	2.56	SD	0.03	5.28

ตารางที่ ข.4 ข้อมูลเบรกดาวนที่ P = 2 บาร์, g = 10 ม.ม., F = 25% ^{ขั้วลบ}

ระดับที่ 1 = 110.67 kV			ระดับที่ 2 = 128.52 kV			ระดับที่ 3 = 149.94 kV			ระดับที่ 4 = 171.36 kV			ระดับที่ 5 = 199.92 kV		
No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)
1	2.94	106.83	21	3.48	124.79	41	2.08	139.07	61	1.31	149.17	81	1.24	170.02
2	4.38	107.15	22	3.08	123.86	42	1.69	136.12	62	1.39	153.98	82	1.18	161.23
3	2.42	106.51	23	3.33	124.15	43	2.34	141.68	63	1.42	154.63	83	1.14	155.16
4	3.26	106.51	24	4.14	124.47	44	1.64	135.14	64	1.32	153.66	84	1.12	156.17
5	3.64	107.15	25	3.65	123.83	45	2.57	143.32	65	1.58	158.48	85	1.17	165.53
6	2.36	106.51	26	2.37	123.28	46	1.88	136.78	66	1.37	152.38	86	1.10	156.17
7	4.08	106.51	27	2.98	124.15	47	2.73	141.36	67	1.38	150.78	87	1.15	159.55
8	3.17	107.07	28	2.45	123.28	48	2.38	141.68	68	1.38	155.27	88	1.16	159.55
9	3.80	107.79	29	3.40	123.86	49	1.62	136.78	69	1.37	152.49	89	1.19	164.25
10	2.76	106.51	30	2.82	123.19	50	2.26	141.36	70	1.36	151.82	90	1.12	156.85
11	5.42	107.79	31	2.14	123.28	51	1.60	136.12	71	1.42	153.02	91	1.14	157.86
12	3.26	106.83	32	2.37	123.86	52	1.81	137.43	72	1.34	151.82	92	1.22	167.46
13	2.30	106.51	33	2.81	123.28	53	1.97	138.74	73	1.36	150.13	93	1.15	161.68
14	3.47	107.07	34	4.44	124.15	54	1.82	136.12	74	1.33	150.78	94	1.12	154.63
15	2.66	107.07	35	2.59	123.28	55	2.18	139.07	75	1.38	153.66	95	1.12	159.12
16	2.53	106.83	36	3.35	123.86	56	1.73	137.43	76	1.44	155.27	96	1.28	176.44
17	3.62	107.15	37	2.32	123.28	57	2.18	140.05	77	1.35	153.66	97	1.23	168.10
18	2.46	106.51	38	2.89	123.86	58	1.67	136.78	78	1.46	156.55	98	1.15	159.76
19	3.87	107.07	39	3.24	124.15	59	2.24	140.70	79	1.32	152.82	99	1.16	156.85
20	3.37	106.83	40	2.75	123.86	60	1.94	136.12	80	1.35	151.82	100	1.16	161.36
m	3.26	106.91	m	2.94	123.79	m	1.96	138.59	m	1.37	153.11	m	1.16	161.39
SD	0.79	0.40	SD	0.61	0.45	SD	0.33	2.44	SD	0.06	2.24	SD	0.05	5.69

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลเบรกดาวนที่ P = 2 บาร์, g = 10 ม.ม., F = 50% ^ขไว้บวก

ระดับที่ 1 = 142.80 kV			ระดับที่ 2 = 164.22 kV			ระดับที่ 3 = 185.64 kV			ระดับที่ 4 = 207.06 kV			ระดับที่ 5 = 235.62 kV		
No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)
1	5.37	135.06	21	3.06	154.30	41	2.16	175.16	61	1.64	192.48	81	1.36	200.29
2	4.62	134.21	22	5.30	156.51	42	2.04	173.23	62	1.54	187.99	82	1.18	195.05
3	4.84	134.23	23	3.20	154.30	43	2.44	173.23	63	1.60	190.88	83	1.26	194.79
4	3.98	133.45	24	2.84	153.98	44	1.88	168.10	64	1.48	182.21	84	1.28	196.06
5	4.26	134.23	25	3.44	155.59	45	1.60	165.21	65	1.68	186.71	85	1.36	201.14
6	4.44	134.23	26	2.44	154.63	46	1.80	166.82	66	1.72	191.84	86	1.24	196.06
7	5.30	134.23	27	3.26	155.59	47	1.92	166.17	67	1.32	179.01	87	1.22	196.97
8	4.92	135.02	28	2.78	154.30	48	1.63	165.21	68	1.47	180.29	88	1.28	200.29
9	3.26	134.23	29	3.65	156.55	49	1.64	166.17	69	1.52	183.50	89	1.12	189.71
10	6.06	135.02	30	2.29	153.66	50	2.62	175.16	70	1.66	185.42	90	1.28	196.91
11	2.48	134.23	31	3.47	155.59	51	1.84	169.38	71	1.38	179.65	91	1.20	198.18
12	3.98	134.23	32	2.64	154.63	52	2.20	171.31	72	1.44	180.93	92	1.22	191.84
13	4.06	134.23	33	2.96	155.59	53	2.08	170.02	73	1.48	182.86	93	1.16	193.94
14	3.25	133.45	34	2.38	153.98	54	1.94	168.10	74	1.32	178.36	94	1.14	192.48
15	2.96	134.23	35	2.61	155.59	55	1.77	166.17	75	1.51	184.14	95	1.26	193.94
16	3.38	134.23	36	2.93	154.63	56	2.15	168.74	76	1.64	191.84	96	1.08	187.35
17	2.49	132.66	37	3.16	155.59	57	2.08	167.46	77	1.59	188.63	97	1.14	193.12
18	3.82	132.66	38	2.27	153.66	58	1.85	166.82	78	1.48	187.35	98	1.08	190.56
19	3.66	133.45	39	3.04	154.63	59	2.02	173.23	79	1.52	189.27	99	1.30	196.91
20	2.84	132.66	40	3.52	155.59	60	2.24	174.52	80	1.74	193.12	100	1.40	198.18
m	3.98	134.00	m	3.00	154.94	m	1.98	169.51	m	1.52	185.82	m	1.23	195.19
SD	0.99	0.73	SD	0.67	0.88	SD	0.26	3.46	SD	0.12	4.86	SD	0.09	3.66

ตารางที่ ข.6 ข้อมูลเบรกดาวนที่ P = 2 บาร์, g = 10 ม.ม., F = 50% ^ขไว้ลบ

ระดับที่ 1 = 114.24 kV			ระดับที่ 2 = 135.66 kV			ระดับที่ 3 = 157.08 kV			ระดับที่ 4 = 178.50 kV			ระดับที่ 5 = 214.20 kV		
No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)
1	4.44	108.43	21	3.68	127.68	41	2.44	143.72	61	1.42	160.28	81	1.08	169.38
2	3.16	107.79	22	1.94	125.77	42	1.50	142.44	62	1.35	157.60	82	1.14	173.97
3	2.62	107.79	23	2.66	127.04	43	1.87	143.11	63	1.48	160.28	83	1.06	174.68
4	5.09	109.07	24	4.31	128.31	44	1.52	141.76	64	1.24	153.57	84	1.12	165.50
5	3.40	107.79	25	1.82	126.41	45	1.66	143.11	65	1.28	154.92	85	1.12	169.03
6	2.36	108.43	26	2.32	127.68	46	1.94	143.11	66	1.22	153.57	86	1.06	166.21
7	4.92	108.99	27	1.84	125.14	47	1.54	141.76	67	1.18	149.55	87	1.06	169.74
8	4.12	109.07	28	1.92	125.14	48	2.52	145.81	68	1.20	152.23	88	1.10	171.50
9	3.25	108.43	29	3.48	128.31	49	2.18	144.46	69	1.22	152.23	89	1.14	169.74
10	3.27	109.07	30	3.09	127.04	50	2.64	146.49	70	1.22	154.25	90	1.12	172.56
11	2.24	107.79	31	3.19	127.68	51	2.31	145.14	71	1.18	152.23	91	1.08	171.50
12	5.93	109.07	32	2.76	128.31	52	1.96	144.46	72	1.16	151.42	92	1.14	170.79
13	2.48	109.07	33	3.28	127.04	53	2.28	145.14	73	1.24	156.26	93	1.12	169.74
14	2.87	108.43	34	2.19	127.04	54	1.74	143.79	74	1.37	157.60	94	1.08	170.79
15	3.28	108.99	35	2.49	127.68	55	1.60	142.44	75	1.25	154.92	95	1.14	169.74
16	3.76	109.07	36	2.93	127.68	56	1.92	143.79	76	1.22	153.57	96	1.12	169.03
17	2.80	108.43	37	2.15	127.04	57	1.74	141.76	77	1.28	157.60	97	1.08	167.97
18	4.18	109.07	38	2.43	127.68	58	2.04	143.11	78	1.29	156.26	98	1.12	170.79
19	3.62	108.43	39	2.17	126.41	59	2.16	143.79	79	1.36	158.94	99	1.10	169.03
20	4.26	108.43	40	2.36	127.04	60	1.85	143.11	80	1.43	159.61	100	1.10	169.74
m	3.34	108.58	m	2.46	127.11	m	1.93	143.61	m	1.25	155.34	m	1.11	170.07
SD	0.99	0.50	SD	0.68	0.94	SD	0.34	1.33	SD	0.09	3.13	SD	0.03	2.21

ตารางที่ ๗.7 ข้อมูลเบรกดาวน์ที่ P = 2 บาร์, g = 10 ม.ม., F = 100% ไขว้บวก

ระดับที่ 1 = 171.36 kV			ระดับที่ 2 = 198.14 kV			ระดับที่ 3 = 224.91 kV			ระดับที่ 4 = 248.12 kV			ระดับที่ 5 = 278.46 kV		
No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)
1	4.04	159.76	21	5.06	185.42	41	2.20	208.84	61	1.71	222.20	81	1.44	247.98
2	3.81	157.83	22	2.98	184.78	42	2.51	207.88	62	1.46	218.56	82	1.40	241.88
3	5.26	160.08	23	4.27	185.42	43	2.31	204.99	63	1.28	215.91	83	1.34	238.68
4	5.04	159.76	24	4.22	184.78	44	1.83	193.76	64	1.62	224.85	84	1.10	235.47
5	6.21	160.08	25	2.48	184.78	45	2.67	197.61	65	1.47	218.46	85	1.22	234.83
6	3.84	160.40	26	2.33	183.50	46	2.48	200.82	66	1.77	225.84	86	1.16	231.94
7	5.40	160.40	27	3.64	180.93	47	3.25	205.31	67	1.32	217.56	87	1.29	233.86
8	4.85	159.44	28	3.12	185.42	48	2.55	200.50	68	1.86	219.43	88	1.24	228.09
9	5.37	160.40	29	4.23	185.42	49	2.71	204.67	69	2.10	227.17	89	1.26	231.62
10	4.60	158.80	30	2.71	180.29	50	2.64	206.92	70	1.54	221.99	90	1.19	239.64
11	3.21	158.48	31	2.57	179.65	51	1.78	194.73	71	1.83	225.84	91	1.25	236.11
12	6.87	157.83	32	2.80	182.86	52	2.16	201.46	72	1.52	217.90	92	1.17	233.54
13	4.81	158.48	33	3.25	184.14	53	1.94	196.33	73	1.55	218.56	93	1.32	235.47
14	3.04	158.48	34	3.18	180.93	54	2.35	204.35	74	1.30	216.24	94	1.38	236.11
15	3.37	159.12	35	3.36	184.14	55	2.72	205.31	75	1.44	222.53	95	1.20	232.58
16	2.62	157.19	36	2.98	179.65	56	2.24	203.71	76	1.67	218.56	96	1.23	234.18
17	4.05	157.83	37	3.07	184.14	57	2.06	197.61	77	1.29	216.24	97	1.25	233.54
18	3.48	157.83	38	3.42	185.42	58	2.59	202.75	78	1.86	225.84	98	1.46	247.66
19	4.50	158.48	39	3.86	182.21	59	2.34	200.18	79	1.26	216.57	99	1.28	232.90
20	3.75	158.48	40	3.57	184.14	60	2.51	202.10	80	1.34	216.90	100	1.16	230.98
m	4.28	158.96	m	3.22	183.40	m	2.42	201.99	m	1.53	220.36	m	1.25	235.85
SD	1.09	1.02	SD	0.70	2.05	SD	0.35	4.30	SD	0.24	3.81	SD	0.10	5.13

ตารางที่ ๗.8 ข้อมูลเบรกดาวน์ที่ P = 2 บาร์, g = 10 ม.ม., F = 100% ไขว้ลบ

ระดับที่ 1 = 155.30 kV			ระดับที่ 2 = 182.07 kV			ระดับที่ 3 = 208.85 kV			ระดับที่ 4 = 232.05 kV			ระดับที่ 5 = 264.18 kV		
No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)
1	4.64	144.72	21	2.72	168.74	41	2.44	189.65	61	1.74	193.50	81	1.20	226.36
2	3.94	144.36	22	2.34	169.38	42	1.94	186.19	62	1.40	203.48	82	1.08	209.16
3	2.64	145.43	23	2.58	170.02	43	2.34	190.91	63	1.34	196.57	83	1.16	241.37
4	4.40	145.07	24	4.24	172.27	44	2.30	190.59	64	1.98	202.72	84	1.12	217.12
5	4.64	145.43	25	3.50	171.51	45	2.18	190.91	65	1.84	203.87	85	1.18	240.98
6	5.76	145.79	26	4.28	173.23	46	2.13	189.96	66	1.58	191.20	86	1.18	221.35
7	3.02	145.07	27	3.08	168.10	47	2.48	194.05	67	1.76	199.26	87	1.14	229.82
8	4.20	145.07	28	2.24	171.95	48	2.63	194.05	68	2.00	202.72	88	1.06	207.88
9	5.04	145.43	29	2.32	171.95	49	1.80	185.25	69	1.54	199.64	89	1.12	209.80
10	2.96	145.07	30	3.84	171.95	50	1.62	178.96	70	1.32	197.72	90	1.16	224.82
11	2.68	145.43	31	4.06	171.95	51	2.90	190.28	71	1.24	199.64	91	1.14	230.66
12	2.62	146.50	32	2.88	169.37	52	2.18	189.65	72	1.63	205.02	92	1.14	222.31
13	4.96	147.57	33	2.74	172.59	53	1.94	180.84	73	1.68	202.72	93	1.18	239.96
14	4.92	144.00	34	2.66	167.46	54	2.96	197.93	74	1.36	195.80	94	1.14	202.10
15	3.10	144.72	35	3.00	172.59	55	2.78	190.59	75	1.78	203.48	95	1.24	228.67
16	2.74	144.00	36	2.04	170.02	56	1.86	184.30	76	1.62	201.18	96	1.18	226.36
17	3.32	147.57	37	2.18	172.59	57	1.92	184.93	77	1.74	202.72	97	1.22	241.37
18	2.72	145.07	38	2.06	170.42	58	2.15	187.76	78	1.38	198.11	98	1.10	218.14
19	2.80	144.36	39	2.32	172.59	59	1.88	186.50	79	1.62	195.04	99	1.08	212.37
20	3.24	145.07	40	2.34	172.59	60	1.98	190.91	80	1.86	201.95	100	1.18	225.59
m	3.28	145.29	m	2.69	171.06	m	2.17	188.71	m	1.63	199.82	m	1.15	223.81
SD	1.01	0.98	SD	0.73	1.73	SD	0.38	4.50	SD	0.22	3.85	SD	0.05	11.81

ข.2 ข้อมูลเบรกดาวนที่ P = 2 บาร์, g = 20 ม.ม.

ตารางที่ ข.9 ข้อมูลเบรกดาวนที่ P = 2 บาร์, g = 20 ม.ม., F = 0% ไข้วบว

ระดับที่ 1 = 149.94 kV			ระดับที่ 2 = 167.79 kV			ระดับที่ 3 = 185.64 kV			ระดับที่ 4 = 203.49 kV			ระดับที่ 5 = 221.34 kV		
No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)
1	5.08	140.51	21	3.33	156.23	41	2.82	171.51	61	1.55	182.70	81	1.14	194.65
2	4.86	141.15	22	3.82	155.91	42	2.18	170.02	62	1.48	179.41	82	1.06	185.42
3	3.42	140.51	23	2.58	154.63	43	1.82	167.78	63	1.58	186.82	83	1.12	187.35
4	9.00	141.47	24	3.10	155.59	44	2.56	170.67	64	1.64	182.29	84	1.13	190.58
5	6.76	141.15	25	2.44	153.98	45	2.06	169.38	65	1.72	183.52	85	1.16	197.93
6	4.64	141.47	26	3.75	155.91	46	2.66	171.51	66	1.44	177.76	86	1.10	187.67
7	3.26	140.83	27	3.06	154.63	47	2.22	170.67	67	1.57	182.29	87	1.22	204.44
8	5.12	140.83	28	2.69	154.63	48	1.90	168.42	68	1.52	177.62	88	1.10	189.91
9	6.22	141.47	29	2.54	155.27	49	2.64	170.67	69	1.50	176.94	89	1.14	188.95
10	4.23	141.15	30	2.59	154.95	50	2.78	172.27	70	1.46	176.12	90	1.20	193.84
11	3.85	141.15	31	2.68	155.27	51	2.49	171.63	71	1.53	177.35	91	1.18	191.94
12	3.76	140.51	32	4.27	155.91	52	2.30	169.38	72	1.77	181.21	92	1.14	189.59
13	4.04	140.83	33	3.42	155.59	53	2.28	170.67	73	1.60	180.23	93	1.18	200.18
14	3.47	140.83	34	2.67	154.95	54	2.23	169.84	74	1.50	176.94	94	1.20	201.78
15	4.29	141.15	35	2.42	155.27	55	2.07	169.84	75	1.59	183.94	95	1.17	190.23
16	3.18	141.15	36	2.58	155.91	56	2.14	170.67	76	1.51	179.87	96	1.18	192.16
17	3.37	140.51	37	2.37	155.59	57	2.38	171.51	77	1.48	179.42	97	1.18	187.59
18	3.65	141.47	38	2.90	155.59	58	2.06	169.70	78	1.88	188.46	98	1.17	195.47
19	4.29	141.15	39	2.81	155.59	59	2.38	170.67	79	1.39	176.12	99	1.14	197.61
20	3.48	141.47	40	2.26	155.27	60	1.74	166.82	80	1.56	187.06	100	1.18	201.46
m	4.14	141.04	m	2.69	155.33	m	2.26	170.18	m	1.54	180.80	m	1.17	193.44
SD	1.43	0.35	SD	0.55	0.57	SD	0.31	1.36	SD	0.12	3.77	SD	0.04	5.54

ตารางที่ ข.10 ข้อมูลเบรกดาวนที่ P = 2 บาร์, g = 20 ม.ม., F = 0% ไข้วลบ

ระดับที่ 1 = 135.66 kV			ระดับที่ 2 = 153.51 kV			ระดับที่ 3 = 171.36 kV			ระดับที่ 4 = 189.21 kV			ระดับที่ 5 = 207.06 kV		
No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)
1	4.45	127.68	21	3.96	142.76	41	2.74	157.83	61	1.60	167.78	81	1.18	185.74
2	3.82	127.36	22	2.88	142.11	42	2.62	156.87	62	1.92	174.19	82	1.08	180.29
3	2.80	127.36	23	3.34	142.11	43	3.06	159.12	63	1.44	166.17	83	1.16	184.14
4	3.66	127.36	24	3.60	142.76	44	2.13	157.19	64	1.56	167.14	84	1.12	182.21
5	3.69	127.04	25	2.48	141.47	45	2.49	157.83	65	1.36	162.97	85	1.08	172.27
6	5.12	127.68	26	3.15	141.79	46	2.25	156.55	66	1.28	163.61	86	1.16	185.10
7	2.84	127.68	27	2.22	141.15	47	2.18	156.55	67	1.32	164.89	87	1.12	183.18
8	3.87	127.36	28	2.63	141.15	48	2.36	157.19	68	1.44	167.78	88	1.20	187.99
9	2.94	126.72	29	2.47	140.83	49	2.51	158.48	69	1.65	173.23	89	1.08	179.01
10	5.22	127.68	30	3.32	142.11	50	2.14	155.91	70	1.48	171.63	90	1.12	185.74
11	4.20	127.68	31	3.08	141.79	51	2.29	156.87	71	1.62	170.99	91	1.14	184.14
12	3.74	127.04	32	3.17	142.44	52	1.86	153.98	72	1.56	170.67	92	1.10	182.86
13	3.94	127.68	33	2.74	141.79	53	2.07	155.91	73	1.47	170.02	93	1.08	181.89
14	2.81	127.36	34	2.65	141.15	54	2.14	157.19	74	1.54	172.27	94	1.14	183.50
15	5.72	127.04	35	3.85	141.79	55	2.32	157.83	75	1.52	169.38	95	1.20	184.46
16	3.56	127.04	36	2.68	140.83	56	2.52	158.48	76	1.65	175.16	96	1.14	183.82
17	3.98	127.68	37	3.15	141.47	57	2.21	156.87	77	1.60	173.23	97	1.06	174.84
18	2.60	126.72	38	3.26	141.47	58	2.25	156.55	78	1.48	170.99	98	1.12	179.65
19	2.82	127.36	39	3.70	142.11	59	3.00	159.12	79	1.52	171.63	99	1.08	179.01
20	3.17	127.36	40	2.62	141.15	60	1.92	155.27	80	1.72	173.87	100	1.18	184.46
m	3.72	127.34	m	3.12	141.71	m	2.27	157.08	m	1.53	169.88	m	1.12	182.21
SD	0.88	0.32	SD	0.49	0.58	SD	0.32	1.27	SD	0.14	3.57	SD	0.04	3.80

ตารางที่ ข.11 ข้อมูลเบรกดาวนที่ P = 2 บาร์, g = 20 ม.ม., F = 25% ไข้วบวก

ระดับที่ 1 = 178.50 kV			ระดับที่ 2 = 199.92 kV			ระดับที่ 3 = 221.34 kV			ระดับที่ 4 = 242.76 kV			ระดับที่ 5 = 271.32 kV		
No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	T(μs)	V(kV)
1	6.79	171.95	21	2.85	191.84	41	2.12	209.16	61	1.58	224.88	81	1.36	237.71
2	3.24	171.31	22	2.42	188.32	42	1.68	200.88	62	1.44	223.60	82	1.32	235.15
3	2.84	170.99	23	2.24	192.48	43	2.34	210.77	63	1.56	224.56	83	1.26	230.33
4	4.32	171.31	24	3.17	192.48	44	1.91	210.12	64	1.59	226.16	84	1.32	238.35
5	10.16	171.95	25	2.96	188.95	45	1.65	206.60	65	1.40	215.26	85	1.30	234.50
6	5.68	171.95	26	2.56	188.31	46	1.76	207.88	66	1.60	223.28	86	1.36	241.88
7	4.60	171.63	27	3.33	192.48	47	1.92	209.16	67	1.72	224.56	87	1.34	236.11
8	5.91	171.63	28	2.86	190.88	48	2.25	210.12	68	1.48	219.43	88	1.33	236.43
9	6.55	171.95	29	2.48	191.52	49	3.16	211.41	69	1.62	221.03	89	1.32	235.15
10	5.22	171.63	30	2.24	188.95	50	2.04	209.48	70	1.61	221.03	90	1.36	243.17
11	3.97	171.31	31	3.15	189.91	51	3.11	212.05	71	1.57	221.67	91	1.32	236.75
12	4.19	171.31	32	4.52	191.20	52	2.78	209.80	72	1.62	222.31	92	1.26	230.98
13	6.34	171.63	33	3.07	191.20	53	2.29	209.16	73	2.04	225.20	93	1.30	233.86
14	5.72	170.99	34	2.81	189.91	54	2.96	209.80	74	1.45	216.86	94	1.34	235.47
15	4.86	170.99	35	2.49	190.23	55	1.99	209.80	75	1.53	217.18	95	1.27	232.26
16	4.74	171.31	36	3.00	189.27	56	2.27	209.16	76	1.77	218.14	96	1.35	241.88
17	3.65	170.99	37	3.12	188.95	57	1.84	204.35	77	1.49	217.18	97	1.28	230.98
18	4.10	171.95	38	4.27	190.23	58	1.96	205.31	78	1.65	220.39	98	1.34	238.03
19	3.94	171.63	39	4.81	191.20	59	2.20	205.63	79	1.60	219.43	99	1.30	235.47
20	5.06	171.95	40	3.38	190.56	60	1.81	204.03	80	1.48	218.14	100	1.26	231.62
m	4.80	171.52	m	2.98	190.44	m	2.08	208.23	m	1.59	221.02	m	1.32	235.80
SD	1.62	0.36	SD	0.71	1.36	SD	0.46	2.86	SD	0.14	3.24	SD	0.03	3.68

ตารางที่ ข.12 ข้อมูลเบรกดาวนที่ P = 2 บาร์, g = 20 ม.ม., F = 25% ไข้วลบ

ระดับที่ 1 = 171.36 kV			ระดับที่ 2 = 192.78 kV			ระดับที่ 3 = 214.20 kV			ระดับที่ 4 = 235.62 kV			ระดับที่ 5 = 271.32 kV		
No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)
1	11.38	167.14	21	5.94	185.79	41	1.97	201.14	61	1.46	216.54	81	1.22	226.16
2	9.09	167.14	22	3.20	182.60	42	2.62	199.54	62	1.58	218.79	82	1.38	236.11
3	4.44	166.82	23	4.32	188.63	43	1.84	198.90	63	1.32	212.37	83	1.35	235.15
4	9.30	166.82	24	2.92	183.50	44	3.88	201.46	64	1.24	211.73	84	1.24	227.77
5	13.46	167.14	25	2.76	186.06	45	1.86	194.40	65	1.78	219.75	85	1.17	223.92
6	7.72	166.17	26	3.18	187.67	46	2.06	202.75	66	1.54	215.58	86	1.04	220.07
7	5.34	166.82	27	3.26	187.35	47	2.77	202.10	67	1.97	219.75	87	1.08	221.67
8	5.82	166.82	28	3.04	184.78	48	2.52	203.07	68	1.65	217.18	88	1.16	222.96
9	6.18	167.14	29	2.68	182.54	49	1.89	198.90	69	1.83	219.43	89	1.19	226.81
10	3.92	166.17	30	4.32	184.78	50	2.18	202.75	70	1.60	215.90	90	1.42	232.58
11	4.61	167.14	31	2.28	183.50	51	1.76	198.25	71	1.32	211.73	91	1.35	233.86
12	3.73	166.17	32	2.79	184.78	52	2.37	201.46	72	1.48	213.65	92	1.27	229.69
13	4.28	166.17	33	2.40	182.60	53	1.99	199.86	73	1.56	214.94	93	1.14	221.99
14	4.43	167.14	34	5.03	186.38	54	2.56	201.78	74	2.07	220.71	94	1.08	220.71
15	3.70	166.82	35	2.64	185.10	55	1.85	199.54	75	1.42	213.01	95	1.05	219.43
16	6.14	166.82	36	2.36	183.18	56	1.76	196.33	76	1.36	213.01	96	1.22	230.33
17	5.02	167.14	37	2.92	184.14	57	2.04	200.82	77	2.17	217.18	97	1.33	232.26
18	3.91	166.17	38	2.26	183.18	58	3.46	202.10	78	1.26	211.09	98	1.24	226.48
19	3.62	166.82	39	3.45	185.42	59	2.27	200.18	79	1.92	218.79	99	1.10	221.99
20	3.87	166.82	40	2.98	182.54	60	1.76	197.61	80	1.64	215.90	100	1.15	225.20
m	4.82	166.77	m	2.95	184.73	m	2.05	200.15	m	1.57	215.85	m	1.21	226.76
SD	2.80	0.38	SD	0.96	1.83	SD	0.57	2.28	SD	0.27	3.07	SD	0.11	5.26

ตารางที่ ข.13 ข้อมูลเบรกดาวนที่ P = 2 บาร์, g = 20 ม.ม., F = 50% ไขว้บวก

ระดับที่ 1 = 207.06 kV			ระดับที่ 2 = 228.48 kV			ระดับที่ 3 = 249.90 kV			ระดับที่ 4 = 271.32 kV			ระดับที่ 5 = 299.88 kV		
No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)
1	3.61	196.97	21	2.50	216.86	41	1.96	229.69	61	1.92	249.37	81	1.20	261.77
2	5.68	196.70	22	4.04	218.46	42	2.76	237.93	62	1.54	244.13	82	1.44	265.62
3	3.60	196.65	23	3.01	215.86	43	1.65	226.48	63	1.42	239.96	83	1.12	252.15
4	3.56	197.49	24	2.76	215.58	44	2.44	237.39	64	1.73	249.58	84	1.28	262.41
5	4.27	197.61	25	4.31	218.14	45	2.80	236.63	65	1.82	248.94	85	1.24	257.92
6	4.19	197.29	26	2.84	214.94	46	1.60	227.13	66	1.94	250.87	86	1.22	260.49
7	3.88	196.97	27	3.33	217.82	47	2.47	237.39	67	1.71	244.77	87	1.18	259.53
8	2.89	196.65	28	4.12	218.14	48	2.23	234.18	68	1.85	248.30	88	1.12	255.36
9	6.09	197.29	29	2.80	216.86	49	1.72	229.05	69	1.90	249.26	89	1.16	259.85
10	3.94	196.33	30	2.67	216.86	50	2.18	236.43	70	1.62	246.37	90	1.09	253.43
11	4.62	197.61	31	3.14	217.82	51	1.84	232.58	71	1.40	240.60	91	1.14	257.92
12	2.77	196.33	32	2.94	217.18	52	2.66	236.11	72	1.95	251.83	92	1.08	252.15
13	3.39	197.29	33	2.32	216.22	53	2.92	237.07	73	1.56	244.45	93	1.20	258.24
14	3.62	196.97	34	1.98	215.58	54	2.41	236.11	74	1.73	245.73	94	1.23	259.85
15	5.11	197.61	35	2.46	216.54	55	2.17	233.54	75	1.65	247.34	95	1.16	255.36
16	4.78	196.97	36	3.35	217.18	56	2.26	236.43	76	1.83	249.90	96	1.18	257.92
17	4.03	197.29	37	3.61	217.50	57	2.25	237.39	77	1.50	242.52	97	1.20	259.21
18	3.54	196.65	38	2.59	217.18	58	1.92	231.62	78	1.53	243.81	98	1.24	255.36
19	3.79	196.97	39	2.13	215.90	59	1.88	230.01	79	1.81	251.83	99	1.16	256.00
20	3.16	196.65	40	2.96	216.22	60	2.62	238.03	80	1.61	245.09	100	1.22	250.22
m	3.84	197.02	m	2.89	216.84	m	2.24	234.06	m	1.72	246.73	m	1.19	257.54
SD	0.87	0.41	SD	0.64	0.98	SD	0.40	3.80	SD	0.17	3.54	SD	0.08	3.83

ตารางที่ ข.14 ข้อมูลเบรกดาวนที่ P = 2 บาร์, g = 20 ม.ม., F = 50% ไขว้ลบ

ระดับที่ 1 = 185.64 kV			ระดับที่ 2 = 207.06 kV			ระดับที่ 3 = 228.48 kV			ระดับที่ 4 = 249.90 kV			ระดับที่ 5 = 285.60 kV		
No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)
1	4.22	176.93	21	3.28	196.20	41	2.62	214.72	61	1.56	218.79	81	1.36	240.64
2	5.48	178.33	22	2.62	194.79	42	2.27	211.96	62	1.48	218.46	82	1.20	235.58
3	2.66	177.40	23	2.84	194.08	43	1.60	207.78	63	1.60	223.92	83	1.08	231.56
4	3.45	176.93	24	3.62	195.50	44	1.79	209.89	64	1.72	225.52	84	1.32	240.85
5	2.86	177.63	25	2.16	193.38	45	1.74	208.44	65	1.52	219.75	85	1.26	240.23
6	2.42	176.93	26	2.30	194.08	46	1.98	211.27	66	1.46	217.50	86	1.28	242.09
7	4.53	177.63	27	2.52	194.79	47	1.84	211.27	67	1.42	218.14	87	1.25	236.20
8	3.96	177.40	28	2.38	194.08	48	1.56	207.82	68	1.58	219.43	88	1.28	239.61
9	2.74	176.93	29	3.24	195.50	49	1.91	208.76	69	1.51	218.79	89	1.24	240.54
10	2.82	178.36	30	2.46	194.79	50	1.73	207.82	70	1.70	224.56	90	1.30	237.75
11	3.27	177.63	31	2.54	194.08	51	2.17	210.58	71	1.47	218.46	91	1.14	232.18
12	2.58	176.93	32	3.80	195.50	52	1.62	209.89	72	1.43	216.86	92	1.32	243.01
13	3.16	178.04	33	4.29	196.20	53	1.99	213.67	73	1.26	213.65	93	1.18	235.89
14	2.48	177.63	34	2.36	194.08	54	2.13	211.96	74	1.58	221.99	94	1.18	237.13
15	3.82	178.33	35	2.79	194.79	55	2.57	210.58	75	1.35	215.90	95	1.24	238.68
16	4.85	177.63	36	2.66	194.08	56	2.46	212.65	76	1.43	218.46	96	1.26	241.16
17	2.52	178.04	37	2.35	193.38	57	1.58	209.20	77	1.50	220.39	97	1.21	234.04
18	3.54	178.33	38	2.62	194.08	58	2.03	211.27	78	1.57	220.07	98	1.34	235.27
19	3.62	176.93	39	3.08	194.79	59	1.62	209.20	79	1.61	221.35	99	1.26	243.01
20	4.41	178.33	40	2.46	193.38	60	1.97	209.89	80	1.38	217.18	100	1.34	236.51
m	3.36	177.62	m	2.62	194.58	m	1.94	210.43	m	1.51	219.46	m	1.26	238.10
SD	0.88	0.56	SD	0.57	0.86	SD	0.33	1.95	SD	0.11	2.92	SD	0.07	3.41

ตารางที่ ข.15 ข้อมูลเบรกดาวนที่ P = 2 บาร์, g = 20 ม.ม., F = 100% ไข้วบวง

ระดับที่ 1 = 249.90 kV			ระดับที่ 2 = 267.75 kV			ระดับที่ 3 = 285.60 kV			ระดับที่ 4 = 303.45 kV			ระดับที่ 5 = 324.87 kV		
No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)
1	4.72	237.39	21	3.31	255.93	41	2.43	269.48	61	1.87	286.80	81	1.23	302.51
2	5.04	238.68	22	2.37	250.87	42	2.17	269.96	62	1.64	281.02	82	1.12	294.17
3	2.96	237.39	23	2.97	252.02	43	2.27	268.30	63	1.32	270.43	83	1.05	290.64
4	3.74	237.39	24	2.68	253.33	44	1.89	259.51	64	1.49	275.25	84	1.18	295.78
5	4.29	238.68	25	2.83	251.37	45	2.33	270.44	65	1.55	277.17	85	1.04	286.15
6	3.86	238.03	26	2.65	252.67	46	1.96	262.46	66	1.58	281.02	86	1.13	291.29
7	3.76	238.68	27	2.67	253.98	47	2.43	273.84	67	1.36	270.11	87	1.21	300.27
8	5.14	238.68	28	3.31	255.28	48	2.17	266.61	68	1.65	282.95	88	1.08	293.53
9	4.60	238.68	29	3.23	254.63	49	2.07	260.23	69	1.85	284.23	89	1.20	295.78
10	3.98	238.03	30	3.05	251.37	50	2.18	271.23	70	1.78	283.59	90	1.04	282.30
11	4.62	238.03	31	2.25	250.07	51	2.39	265.81	71	1.48	274.28	91	1.21	298.34
12	2.67	237.39	32	2.63	252.02	52	2.42	266.61	72	1.65	278.13	92	1.18	297.70
13	3.62	238.03	33	2.92	254.07	53	1.87	264.37	73	1.38	270.76	93	1.05	287.12
14	4.90	237.39	34	3.21	254.72	54	1.88	266.13	74	1.44	272.68	94	1.08	293.53
15	3.46	238.03	35	2.79	250.72	55	2.11	266.77	75	1.63	284.87	95	1.12	291.29
16	4.82	238.68	36	3.35	255.93	56	2.49	269.32	76	1.41	270.76	96	1.17	296.42
17	3.58	237.39	37	2.61	253.98	57	1.85	259.11	77	1.82	286.80	97	1.06	283.59
18	5.45	238.03	38	3.33	256.00	58	2.17	261.02	78	1.44	275.25	98	1.04	290.00
19	5.21	238.03	39	3.29	253.98	59	2.29	260.39	79	1.34	268.51	99	1.09	291.93
20	3.52	237.39	40	2.49	250.07	60	1.59	260.70	80	1.57	283.59	100	1.15	293.85
m	4.14	238.00	m	2.88	253.15	m	2.17	265.61	m	1.56	277.91	m	1.12	292.81
SD	0.79	0.53	SD	0.35	1.98	SD	0.24	4.43	SD	0.17	6.15	SD	0.07	5.28

ตารางที่ ข.16 ข้อมูลเบรกดาวนที่ P = 2 บาร์, g = 20 ม.ม., F = 100% ไข้วลบ

ระดับที่ 1 = 224.91 kV			ระดับที่ 2 = 240.98 kV			ระดับที่ 3 = 257.04 kV			ระดับที่ 4 = 280.25 kV			ระดับที่ 5 = 310.59 kV		
No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)
1	4.92	214.65	21	2.96	227.28	41	2.14	240.60	61	1.82	256.96	81	1.43	284.87
2	3.86	214.65	22	2.24	223.92	42	2.08	245.41	62	2.06	256.00	82	1.66	286.80
3	3.62	214.65	23	2.86	229.05	43	2.32	243.49	63	2.16	262.74	83	1.58	288.72
4	4.90	215.05	24	3.08	228.07	44	2.42	243.49	64	2.18	263.70	84	1.56	286.80
5	5.94	214.65	25	2.58	228.07	45	2.10	239.64	65	1.84	256.96	85	1.64	287.76
6	3.76	214.65	26	2.40	224.12	46	1.86	243.81	66	1.52	252.47	86	1.38	275.25
7	5.14	215.05	27	2.42	225.70	47	1.88	243.49	67	1.60	253.11	87	1.12	268.51
8	4.55	215.05	28	2.95	227.28	48	2.13	244.45	68	1.76	255.04	88	1.46	281.02
9	5.21	214.65	29	3.04	228.07	49	1.82	240.60	69	1.66	254.07	89	1.18	269.15
10	3.52	214.65	30	2.54	225.70	50	1.84	242.52	70	2.15	261.77	90	1.50	283.59
11	4.27	214.65	31	3.10	228.07	51	2.04	243.17	71	1.94	261.77	91	1.30	272.68
12	5.04	215.05	32	2.72	229.65	52	1.92	243.17	72	1.64	253.11	92	1.54	284.87
13	3.98	214.65	33	2.38	224.12	53	2.24	243.49	73	1.87	260.81	93	1.22	270.76
14	4.62	215.05	34	2.67	227.28	54	2.18	243.49	74	1.82	259.85	94	1.26	275.25
15	5.16	215.05	35	3.06	228.07	55	1.86	243.81	75	1.62	259.21	95	1.38	277.17
16	4.88	214.65	36	2.32	224.12	56	2.02	244.45	76	1.64	260.49	96	1.42	281.02
17	4.60	214.65	37	2.72	228.07	57	1.92	242.52	77	1.84	255.04	97	1.16	270.11
18	3.96	215.05	38	3.06	229.65	58	2.18	244.45	78	1.46	250.54	98	1.36	274.28
19	4.37	215.05	39	2.98	228.07	59	2.27	245.09	79	1.74	254.72	99	1.14	268.83
20	4.85	215.05	40	2.80	228.86	60	2.14	243.17	80	1.66	253.43	100	1.18	270.76
m	4.61	214.83	m	2.76	227.16	m	2.09	243.21	m	1.79	257.09	m	1.38	277.91
SD	0.63	0.20	SD	0.29	1.88	SD	0.17	1.48	SD	0.21	3.91	SD	0.17	7.20

ข.3 ข้อมูลเบรกดาวนที่ P = 3 บาร์, g = 10 ม.ม.

ตารางที่ ข.17 ข้อมูลเบรกดาวนที่ P = 3 บาร์, g = 10 ม.ม., F = 0% ไข้วบวก

ระดับที่ 1 = 121.38 kV			ระดับที่ 2 = 132.09 kV			ระดับที่ 3 = 142.80 kV			ระดับที่ 4 = 153.51 kV			ระดับที่ 5 = 178.50 kV		
No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)
1	3.43	116.13	21	4.52	127.04	41	1.71	134.52	61	1.55	143.08	81	1.38	149.81
2	2.46	116.77	22	3.47	127.68	42	2.67	135.70	62	1.37	141.15	82	1.12	143.72
3	3.71	117.41	23	2.85	126.40	43	1.64	133.51	63	1.43	141.79	83	1.10	143.08
4	2.97	116.77	24	2.45	125.11	44	3.08	137.30	64	1.26	139.55	84	1.34	151.42
5	5.32	118.05	25	4.74	125.00	45	1.33	132.81	65	1.64	143.72	85	1.26	149.49
6	3.76	116.33	26	3.05	125.75	46	2.02	134.74	66	1.96	144.36	86	1.31	148.21
7	5.68	116.88	27	1.99	125.11	47	1.89	134.74	67	1.65	141.79	87	1.43	151.42
8	2.46	115.49	28	2.14	125.11	48	1.66	134.09	68	1.37	139.87	88	1.26	147.57
9	6.79	117.35	29	2.30	126.07	49	1.48	132.81	69	1.36	142.11	89	1.14	142.44
10	4.56	117.41	30	1.88	126.40	50	2.04	133.46	70	1.79	145.64	90	1.48	152.70
11	2.73	117.09	31	2.46	126.72	51	1.93	134.09	71	1.81	143.72	91	1.37	150.13
12	3.17	116.77	32	1.75	124.47	52	2.28	135.70	72	1.70	143.08	92	1.22	145.00
13	3.20	116.45	33	3.00	127.68	53	2.54	136.34	73	1.52	141.15	93	1.15	145.00
14	4.14	116.45	34	1.36	124.38	54	1.92	133.45	74	1.32	140.19	94	1.28	150.78
15	2.26	115.49	35	1.72	125.75	55	2.04	135.83	75	1.65	142.44	95	1.30	148.85
16	4.28	116.77	36	2.04	126.40	56	1.36	133.45	76	1.22	139.87	96	1.23	146.93
17	3.52	116.77	37	3.75	127.04	57	2.24	134.74	77	1.20	138.59	97	1.16	145.64
18	3.70	117.41	38	3.04	127.04	58	2.64	136.34	78	1.82	144.50	98	1.08	143.72
19	3.78	116.45	39	2.24	124.47	59	2.41	135.30	79	1.76	142.44	99	1.06	141.15
20	3.39	116.77	40	2.57	125.75	60	1.64	133.45	80	1.31	139.23	100	1.22	143.72
m	3.61	116.75	m	2.46	125.97	m	1.98	134.62	m	1.54	141.91	m	1.25	147.04
SD	1.14	0.63	SD	0.91	1.04	SD	0.47	1.28	SD	0.23	1.96	SD	0.12	3.46

ตารางที่ ข.18 ข้อมูลเบรกดาวนที่ P = 3 บาร์, g = 10 ม.ม., F = 0% ไข้วลบ

ระดับที่ 1 = 116.03 kV			ระดับที่ 2 = 128.52 kV			ระดับที่ 3 = 142.80 kV			ระดับที่ 4 = 153.51 kV			ระดับที่ 5 = 174.93 kV		
No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)
1	2.38	112.85	21	3.26	122.76	41	2.08	131.21	61	1.36	134.74	81	1.26	146.28
2	2.60	112.85	22	2.18	121.19	42	1.80	129.92	62	1.34	133.45	82	1.20	141.79
3	4.86	112.85	23	2.28	121.51	43	1.96	130.57	63	1.40	135.38	83	1.26	145.00
4	2.94	113.46	24	2.04	120.88	44	1.98	131.53	64	1.68	138.59	84	1.32	146.28
5	2.48	112.85	25	2.66	120.88	45	1.78	129.28	65	1.36	134.74	85	1.32	146.93
6	2.38	112.54	26	3.86	122.13	46	2.38	132.17	66	1.32	133.45	86	1.22	139.87
7	4.54	113.15	27	2.22	120.94	47	2.14	130.57	67	1.74	137.94	87	1.24	145.64
8	2.72	113.15	28	2.94	121.51	48	1.78	129.28	68	1.50	136.66	88	1.28	146.93
9	3.06	112.85	29	2.64	121.51	49	1.84	130.57	69	1.36	135.38	89	1.28	146.28
10	4.56	113.15	30	2.78	122.13	50	2.79	132.81	70	1.34	132.81	90	1.30	146.93
11	2.76	113.15	31	2.64	121.51	51	1.96	130.24	71	1.50	134.74	91	1.28	146.93
12	5.26	113.15	32	3.51	122.13	52	1.84	129.28	72	1.64	137.30	92	1.28	145.64
13	2.32	113.46	33	2.28	121.51	53	1.68	130.57	73	1.42	136.02	93	1.18	138.59
14	4.26	113.46	34	2.56	121.51	54	2.12	129.92	74	1.38	134.74	94	1.24	143.08
15	2.96	113.46	35	2.28	122.13	55	1.92	129.92	75	1.42	134.09	95	1.22	139.23
16	2.40	113.15	36	2.34	121.51	56	2.20	130.57	76	1.41	134.74	96	1.20	142.44
17	3.16	113.46	37	2.42	120.88	57	2.74	132.17	77	1.34	133.45	97	1.18	140.51
18	2.86	113.15	38	2.36	121.51	58	1.68	129.28	78	1.52	136.02	98	1.20	140.51
19	3.76	113.15	39	2.38	122.13	59	2.48	131.53	79	1.49	135.38	99	1.32	146.93
20	3.52	113.46	40	2.26	121.51	60	1.72	129.28	80	1.44	135.38	100	1.28	146.93
m	2.95	113.14	m	2.40	121.59	m	1.96	130.53	m	1.42	135.25	m	1.26	144.14
SD	0.93	0.27	SD	0.47	0.51	SD	0.33	1.08	SD	0.12	1.52	SD	0.05	3.03

ตารางที่ ข.19 ข้อมูลเบรกดาวนที่ P = 3 บาร์, g = 10 ม.ม., F = 25% ไข้วบวก

ระดับที่ 1 = 164.22 kV			ระดับที่ 2 = 185.64 kV			ระดับที่ 3 = 207.06 kV			ระดับที่ 4 = 228.48 kV			ระดับที่ 5 = 249.90 kV		
No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	T(μs)	V(kV)
1	2.94	157.83	21	2.24	178.36	41	2.24	196.23	61	1.68	212.05	81	1.44	218.79
2	4.72	158.48	22	3.44	179.01	42	2.91	196.86	62	1.42	206.27	82	1.20	213.33
3	3.94	157.19	23	2.76	175.80	43	1.84	194.96	63	1.40	204.99	83	1.24	215.58
4	5.24	157.83	24	3.04	177.72	44	1.96	194.96	64	1.56	207.24	84	1.20	210.12
5	4.36	157.83	25	3.52	178.36	45	1.76	193.70	65	1.52	205.95	85	1.36	220.71
6	3.52	156.55	26	2.08	176.44	46	2.44	196.86	66	1.68	207.24	86	1.24	214.94
7	4.76	157.19	27	4.80	178.36	47	1.88	191.17	67	1.64	207.56	87	1.28	216.86
8	4.12	157.19	28	2.91	177.72	48	1.52	189.27	68	1.52	205.31	88	1.24	215.58
9	3.76	157.83	29	1.96	175.80	49	2.27	196.86	69	1.45	208.52	89	1.16	215.58
10	4.90	158.48	30	1.76	174.52	50	1.68	194.33	70	1.58	206.60	90	1.25	216.22
11	2.48	157.19	31	2.64	177.08	51	2.62	196.86	71	1.84	209.16	91	1.36	217.50
12	6.73	158.48	32	1.88	174.52	52	2.36	196.54	72	1.28	204.35	92	1.32	218.14
13	5.91	158.48	33	2.42	175.80	53	2.05	193.38	73	1.60	209.80	93	1.08	210.12
14	3.52	156.55	34	1.96	174.52	54	1.71	191.80	74	1.88	213.97	94	1.24	217.50
15	3.18	157.19	35	4.32	178.36	55	2.28	195.91	75	1.36	202.10	95	1.36	223.92
16	3.42	156.55	36	2.88	177.08	56	2.32	196.54	76	1.52	205.31	96	1.04	213.33
17	3.86	157.83	37	3.14	178.36	57	1.98	196.23	77	1.37	203.07	97	1.16	214.29
18	3.72	157.19	38	1.94	175.16	58	1.82	194.96	78	1.71	208.52	98	1.08	209.16
19	2.72	156.55	39	2.06	176.44	59	1.68	189.91	79	1.42	203.71	99	1.22	211.73
20	3.44	157.19	40	2.77	177.72	60	1.84	196.23	80	1.54	205.31	100	1.26	216.22
m	3.81	157.48	m	2.70	176.86	m	1.97	194.68	m	1.53	206.85	m	1.24	215.48
SD	1.07	0.67	SD	0.83	1.48	SD	0.36	2.41	SD	0.16	2.93	SD	0.10	3.63

ตารางที่ ข.20 ข้อมูลเบรกดาวนที่ P = 3 บาร์, g = 10 ม.ม., F = 25% ไข้วลบ

ระดับที่ 1 = 128.52 kV			ระดับที่ 2 = 149.94 kV			ระดับที่ 3 = 171.36 kV			ระดับที่ 4 = 192.78 kV			ระดับที่ 5 = 214.20 kV		
No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)
1	3.56	124.79	21	2.44	141.15	41	3.04	162.32	61	1.64	178.36	81	1.28	196.01
2	5.45	124.47	22	2.72	142.76	42	2.24	159.12	62	1.52	173.23	82	1.24	193.12
3	6.10	123.83	23	2.32	140.83	43	1.83	155.27	63	1.56	174.19	83	1.32	196.65
4	2.94	124.47	24	3.16	142.44	44	2.13	156.95	64	1.56	175.80	84	1.18	186.71
5	4.86	123.83	25	4.38	143.49	45	2.82	161.04	65	1.45	171.31	85	1.32	194.40
6	3.42	124.47	26	5.03	144.36	46	3.05	162.97	66	1.56	172.91	86	1.08	178.69
7	2.32	123.19	27	2.64	141.79	47	3.24	163.61	67	2.16	179.01	87	1.24	193.76
8	2.68	123.19	28	3.62	143.08	48	2.91	161.68	68	1.58	173.87	88	1.12	182.21
9	3.94	125.01	29	2.61	140.80	49	1.76	153.98	69	1.36	166.82	89	1.08	179.65
10	4.72	123.83	30	2.08	138.78	50	2.02	157.83	70	1.52	171.31	90	1.22	183.50
11	6.43	124.79	31	2.98	141.79	51	2.48	159.44	71	1.47	174.19	91	1.16	180.61
12	2.48	123.83	32	2.38	140.19	52	2.64	161.04	72	1.68	174.52	92	1.20	190.56
13	3.76	123.83	33	3.04	141.47	53	1.86	155.27	73	1.52	174.19	93	1.32	197.61
14	3.64	123.83	34	2.32	141.79	54	2.15	157.83	74	1.78	178.36	94	1.24	191.20
15	2.44	123.19	35	2.55	143.08	55	1.85	154.63	75	1.42	169.38	95	1.16	188.63
16	2.72	123.83	36	2.00	139.55	56	2.42	159.76	76	1.45	171.31	96	1.28	193.76
17	3.04	123.19	37	2.24	141.15	57	2.27	157.83	77	1.86	179.65	97	1.14	186.06
18	3.94	123.83	38	1.96	138.59	58	3.14	162.32	78	1.93	180.29	98	1.16	184.14
19	4.12	124.47	39	2.29	140.51	59	2.86	161.68	79	1.49	173.23	99	1.24	188.95
20	3.62	123.19	40	2.67	142.11	60	1.96	156.55	80	1.52	169.38	100	1.08	180.29
m	3.63	123.95	m	2.58	141.49	m	2.35	159.06	m	1.54	174.07	m	1.21	188.33
SD	1.19	0.59	SD	0.78	1.52	SD	0.49	2.98	SD	0.20	3.67	SD	0.08	6.18

ตารางที่ ข.21 ข้อมูลเบรกดาวนที่ P = 3 บาร์, g = 10 ม.ม., F = 50% ไขว้บวก

ระดับที่ 1 = 192.78 kV			ระดับที่ 2 = 214.20 kV			ระดับที่ 3 = 235.62 kV			ระดับที่ 4 = 257.04 kV			ระดับที่ 5 = 285.60 kV		
No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)
1	2.48	185.74	21	2.38	203.07	41	2.24	221.99	61	2.17	236.11	81	1.32	260.17
2	3.76	186.71	22	3.92	204.01	42	1.71	219.43	62	1.93	236.11	82	1.10	243.17
3	2.68	186.53	23	3.37	203.39	43	1.98	221.03	63	1.81	236.75	83	1.16	243.81
4	3.94	186.00	24	2.53	203.39	44	2.20	221.67	64	1.70	233.07	84	1.20	249.58
5	4.72	186.38	25	2.96	203.39	45	1.65	217.82	65	1.37	231.30	85	1.08	245.09
6	3.43	185.74	26	1.96	201.46	46	1.94	221.03	66	1.46	232.26	86	1.22	250.87
7	3.56	186.06	27	3.11	202.89	47	1.72	218.79	67	1.79	236.75	87	1.18	245.09
8	5.25	186.71	28	2.49	203.07	48	2.25	221.67	68	2.17	240.28	88	1.35	266.26
9	4.12	186.71	29	2.22	202.75	49	1.77	219.43	69	1.82	238.39	89	1.26	258.56
10	3.62	186.38	30	1.96	202.10	50	2.53	222.31	70	1.43	233.54	90	1.18	247.66
11	2.72	186.06	31	2.12	202.42	51	2.08	221.03	71	1.39	231.62	91	1.33	261.77
12	3.04	186.00	32	2.61	203.07	52	2.38	220.71	72	1.64	234.83	92	1.36	264.34
13	4.22	186.38	33	2.74	203.07	53	1.93	220.07	73	1.52	233.54	93	1.42	266.91
14	6.10	186.71	34	2.26	202.10	54	1.81	219.43	74	1.32	229.69	94	1.24	254.07
15	2.94	186.00	35	2.02	202.52	55	2.71	221.67	75	1.65	233.22	95	1.33	258.56
16	4.86	186.71	36	2.34	202.42	56	1.93	220.07	76	1.82	236.11	96	1.31	254.07
17	3.24	186.00	37	3.70	203.39	57	2.97	221.99	77	1.55	231.30	97	1.16	243.49
18	2.32	186.06	38	2.56	202.75	58	1.64	216.54	78	1.37	228.46	98	1.20	245.73
19	3.64	186.71	39	2.16	202.10	59	1.77	219.43	79	1.96	238.03	99	1.19	246.37
20	2.44	185.42	40	2.00	202.52	60	1.72	218.14	80	1.65	235.47	100	1.12	243.81
m	3.59	186.25	m	2.44	202.79	m	1.94	220.21	m	1.65	234.34	m	1.21	252.47
SD	1.01	0.39	SD	0.57	0.60	SD	0.37	1.58	SD	0.26	3.06	SD	0.10	8.30

ตารางที่ ข.22 ข้อมูลเบรกดาวนที่ P = 3 บาร์, g = 10 ม.ม., F = 50% ไขว้ลบ

ระดับที่ 1 = 157.08 kV			ระดับที่ 2 = 178.50 kV			ระดับที่ 3 = 199.92 kV			ระดับที่ 4 = 228.48 kV			ระดับที่ 5 = 249.90 kV		
No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)
1	2.78	152.23	21	3.14	171.95	41	1.86	186.06	61	1.68	204.99	81	1.39	216.22
2	4.32	153.66	22	3.45	171.95	42	1.73	184.67	62	1.46	202.39	82	1.29	208.65
3	2.48	153.29	23	2.29	170.78	43	1.86	187.24	63	1.82	206.60	83	1.37	214.82
4	2.88	152.86	24	1.88	169.52	44	1.77	186.71	64	1.46	199.02	84	1.27	206.60
5	4.62	153.02	25	2.74	171.95	45	1.82	185.42	65	1.46	201.72	85	1.35	211.73
6	3.30	152.86	26	3.46	172.04	46	1.92	187.89	66	1.66	202.73	86	1.24	205.31
7	2.42	152.23	27	2.60	171.73	47	2.26	188.53	67	1.39	200.70	87	1.35	213.79
8	3.61	152.23	28	2.22	170.78	48	1.68	184.03	68	1.61	202.73	88	1.35	213.79
9	2.24	152.23	29	2.46	171.95	49	2.57	188.53	69	1.46	199.69	89	1.33	212.76
10	5.30	153.49	30	2.86	170.67	50	2.64	187.89	70	1.68	205.77	90	1.31	210.71
11	2.72	152.23	31	2.12	170.15	51	2.35	187.89	71	1.57	202.39	91	1.33	210.71
12	3.24	152.86	32	2.37	170.15	52	2.67	188.53	72	1.48	201.72	92	1.37	212.76
13	2.92	152.23	33	2.41	171.41	53	1.95	187.24	73	1.72	205.95	93	1.35	212.42
14	2.84	152.23	34	3.20	170.78	54	2.04	187.99	74	1.54	201.04	94	1.37	211.73
15	3.82	152.86	35	3.31	171.41	55	2.08	187.89	75	1.54	202.75	95	1.33	209.68
16	2.92	152.38	36	2.12	170.15	56	1.72	186.60	76	1.40	199.02	96	1.27	205.31
17	3.16	152.86	37	1.94	170.78	57	1.66	185.31	77	1.44	200.03	97	1.31	209.80
18	2.57	152.23	38	3.05	172.04	58	2.37	187.89	78	1.42	201.04	98	1.35	213.10
19	2.82	153.34	39	2.14	171.41	59	1.92	186.71	79	1.63	204.03	99	1.29	211.73
20	3.62	153.75	40	2.37	171.41	60	1.79	185.42	80	1.46	201.72	100	1.31	210.71
m	2.92	152.76	m	2.44	171.15	m	1.92	186.92	m	1.51	202.30	m	1.33	211.12
SD	0.79	0.53	SD	0.51	0.77	SD	0.33	1.36	SD	0.12	2.24	SD	0.04	2.94

ตารางที่ ข.23 ข้อมูลเบรกดาวนที่ P = 3 บาร์, g = 10 ม.ม., F = 100% ไข้วบวง

ระดับที่ 1 = 214.20 kV			ระดับที่ 2 = 239.19 kV			ระดับที่ 3 = 264.18 kV			ระดับที่ 4 = 296.31 kV			ระดับที่ 5 = 335.58 kV		
No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)
1	5.89	204.47	21	4.10	223.85	41	3.22	241.23	61	1.48	253.11	81	1.22	264.34
2	6.75	202.51	22	2.77	222.64	42	2.08	235.25	62	1.28	247.66	82	1.15	260.49
3	4.81	203.52	23	2.08	221.62	43	2.77	239.03	63	1.77	257.28	83	1.32	289.36
4	2.91	205.73	24	2.37	220.67	44	1.64	233.37	64	1.81	258.89	84	1.32	271.72
5	2.81	203.52	25	4.94	223.85	45	1.77	230.85	65	2.20	265.30	85	1.07	260.17
6	3.79	202.58	26	3.12	222.90	46	2.71	240.29	66	1.57	259.21	86	1.26	269.47
7	4.26	203.52	27	2.48	221.62	47	1.93	237.14	67	1.93	254.39	87	1.16	262.41
8	3.15	205.10	28	5.27	228.63	48	1.98	237.77	68	1.89	265.19	88	1.28	287.44
9	3.76	203.52	29	3.00	224.81	49	2.20	239.97	69	1.62	254.07	89	1.29	279.74
10	4.32	204.47	30	3.51	224.81	50	1.65	231.79	70	1.97	257.92	90	1.04	256.64
11	5.02	205.73	31	2.91	223.85	51	1.94	234.62	71	1.68	259.93	91	1.22	277.49
12	2.88	203.52	32	3.15	224.81	52	1.72	233.37	72	2.00	264.34	92	1.30	282.95
13	3.37	204.47	33	4.56	226.72	53	2.24	237.77	73	2.14	261.77	93	1.18	262.41
14	4.19	204.47	34	2.71	225.76	54	1.71	233.05	74	1.42	248.94	94	1.26	270.76
15	3.25	202.58	35	3.39	225.76	55	1.52	229.91	75	2.04	262.41	95	1.22	263.06
16	3.77	203.52	36	2.43	223.85	56	2.68	239.66	76	1.88	256.32	96	1.18	271.72
17	2.94	202.58	37	4.06	225.76	57	1.93	232.74	77	1.79	261.77	97	1.15	261.13
18	2.68	202.58	38	2.51	224.81	58	1.81	234.00	78	1.95	259.21	98	1.04	253.43
19	3.36	203.52	39	2.97	225.76	59	2.52	238.40	79	1.63	260.17	99	1.24	268.19
20	3.58	204.47	40	3.72	226.72	60	1.77	234.31	80	1.52	248.94	100	1.14	263.70
m	3.67	203.82	m	3.06	224.46	m	1.94	235.73	m	1.80	257.84	m	1.22	268.83
SD	1.07	1.02	SD	0.89	1.95	SD	0.46	3.40	SD	0.25	5.29	SD	0.09	10.09

ตารางที่ ข.24 ข้อมูลเบรกดาวนที่ P = 3 บาร์, g = 10 ม.ม., F = 100% ไข้วลบ

ระดับที่ 1 = 185.64 kV			ระดับที่ 2 = 207.06 kV			ระดับที่ 3 = 224.91 kV			ระดับที่ 4 = 244.55 kV			ระดับที่ 5 = 264.18 kV		
No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)
1	3.70	182.69	21	2.48	195.10	41	2.26	205.36	61	1.58	214.14	81	1.42	218.49
2	2.56	181.35	22	1.82	193.76	42	1.92	206.36	62	1.64	217.58	82	1.51	234.02
3	2.22	180.68	23	2.67	193.76	43	1.60	204.35	63	1.69	216.89	83	1.44	222.63
4	1.96	180.01	24	2.44	193.09	44	1.58	202.34	64	1.76	219.65	84	1.54	226.77
5	2.53	180.68	25	2.83	195.10	45	2.14	205.36	65	1.48	213.45	85	1.56	230.92
6	2.96	182.02	26	1.98	194.43	46	2.04	205.36	66	1.62	218.27	86	1.50	229.05
7	1.96	180.68	27	2.18	193.76	47	1.64	205.09	67	1.50	216.89	87	1.54	225.74
8	2.02	180.68	28	2.09	193.76	48	1.66	204.35	68	1.48	214.83	88	1.48	232.58
9	2.34	182.69	29	2.28	194.43	49	1.58	203.34	69	1.58	217.58	89	1.54	231.95
10	2.16	182.02	30	2.52	195.10	50	2.30	206.36	70	1.63	215.52	90	1.47	228.41
11	2.00	180.68	31	1.84	193.09	51	1.60	201.33	71	1.46	211.73	91	1.42	223.67
12	3.20	181.35	32	2.67	197.11	52	1.76	202.34	72	1.52	214.14	92	1.44	223.67
13	2.49	180.68	33	3.02	197.78	53	1.93	204.69	73	1.46	211.73	93	1.40	218.14
14	2.12	180.01	34	2.26	191.74	54	1.86	205.69	74	1.68	219.65	94	1.42	220.21
15	2.61	181.35	35	1.82	191.74	55	1.74	204.01	75	1.85	220.33	95	1.52	231.95
16	2.74	182.02	36	2.39	193.76	56	1.72	203.34	76	1.54	215.52	96	1.48	222.63
17	2.26	182.69	37	2.47	193.09	57	1.68	203.34	77	1.44	212.76	97	1.50	225.05
18	2.38	182.69	38	2.61	194.43	58	2.17	204.69	78	1.50	216.89	98	1.46	222.29
19	3.92	182.02	39	2.32	193.09	59	1.84	203.01	79	1.52	216.20	99	1.48	225.05
20	3.37	182.69	40	2.43	195.77	60	2.08	204.01	80	1.58	218.27	100	1.44	220.91
m	2.44	181.49	m	2.41	194.19	m	1.80	204.24	m	1.56	216.10	m	1.48	225.71
SD	0.58	0.94	SD	0.33	1.53	SD	0.24	1.37	SD	0.11	2.57	SD	0.05	4.83

ภาคผนวก ค

ข้อมูลแรงดันจากวิธีปรับระดับแรงดันขึ้นลง

ข้อมูลแรงดันเบรกดาวร์เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานรูปคลื่น $1.2/50 \mu\text{s}$ ให้แก่ชุดทดลองที่เงื่อนไขต่างๆ คือ ความดัน (P) ระยะแกป (g) สัดส่วนของก๊าซ SF_6 ในก๊าซผสม $\text{SF}_6 - \text{N}_2$ (F) และชั่วแรงดันอิมพัลส์ โดยวิธีปรับระดับแรงดันขึ้นลงในแต่ละเงื่อนไขการทดลองเป็นจำนวน 30 ครั้ง เพื่อหาค่า $V_{50\%}$ คือ ค่ายอดแรงดันที่มีความน่าจะเป็นที่เกิดเบรกดาวร์ 50% ในตารางแสดงระดับแรงดันป้อน (Va) และ ค่ายอดอิมพัลส์เฉลี่ย ของค่ายอดอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นที่ระดับแรงดันป้อนนั้นๆ (Vp)) สัญลักษณ์ O แทนเหตุการณ์ที่ไม่เบรกดาวร์ X แทนเหตุการณ์ที่เบรกดาวร์

ค่า $V_{50\%}$ และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดัน (SD) แสดงที่ด้านล่างของตาราง

ค.1 ข้อมูลจากวิธีปรับระดับแรงดันขึ้นลง ที่ P = 2 บาร์, g = 10 ม.ม.

ตารางที่ ค.1 ข้อมูลจากวิธีปรับระดับแรงดันขึ้นลง ที่ P = 2 บาร์, g = 10 ม.ม., F = 0% ชั่วบวก

ระดับที่	Va (kV)	Vp (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	113.53	109.55							X																				X			
2	110.31	106.18						O		X										X								O		X		X
3	107.10	103.80			X		O				X		X					O			X				X		O				O	
4	103.89	99.95		O		O						O		X		X		O				X		O		O						
5	100.67	96.00	O												O		O															

$$V_{50\%} = 102.46 \text{ kV}$$

$$SD = 3.82 \text{ kV}$$

ตารางที่ ค.2 ข้อมูลจากวิธีปรับระดับแรงดันขึ้นลง ที่ P = 2 บาร์, g = 10 ม.ม., F = 0% ไขว้ลบ

ระดับที่	Va (kV)	Vp (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	113.526	108.75											X																			
2	110.313	106.40										O		X		X																
3	107.1	104.10					X				O				O		X															
4	103.887	100.04				O		X		O							X		X				X		X							
5	100.674	97.17	X		O				O									O		X		O		O		X		X		X		
6	97.461	93.87		O																		O						O		O		X

$V_{50\%} = 99.52 \text{ kV}$ $SD = 4.27 \text{ kV}$

ตารางที่ ค.3 ข้อมูลจากวิธีปรับระดับแรงดันขึ้นลง ที่ P = 2 บาร์, g = 10 ม.ม., F = 25% ไขว้บวก

ระดับที่	Va (kV)	Vp (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	131.38	126.40														X																
2	127.95	122.87					X								O		X						X									
3	124.52	119.48				O		X						O				X				O		X						X		
4	121.09	117.13			O				X				O					X		O					X				O		X	
5	117.67	113.93		O						X		O									O					X		O				X
6	114.24	109.93	O								O																O					

$V_{50\%} = 117.28 \text{ kV}$ $SD = 4.08 \text{ kV}$

ตารางที่ ค.4 ข้อมูลจากวิธีปรับระดับแรงดันขึ้นลง ที่ P = 2 บาร์, g = 10 ม.ม., F = 25% ไขว้ลบ

ระดับที่	Va (kV)	Vp (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	113.526	109.55									X								X													
2	110.313	108.52				X				O		X		X		X		O		X					X		X		X		X	
3	107.1	103.96	X		O		X		O			O		O		O					X		X		O		O		O		O	
4	103.887	100.65		O				O															O		O							

$V_{50\%} = 105.56 \text{ kV}$ $SD = 2.98 \text{ kV}$

ตารางที่ ค.5 ข้อมูลจากวิธีปรับระดับแรงดันขึ้นลง ที่ P = 2 บาร์, g = 10 ม.ม., F = 50% ไข้วบวก

ระดับที่	Va (kV)	Vp (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	136.23	129.60							X																								
2	132.38	126.72						O		X		X					X											X					
3	128.52	123.96	X				O				O		X			O		X				X				O		X		X			
4	124.66	119.43		X		O								X		O				X		O		X		O				O		X	
5	120.81	116.45			O										O						O				O								

$V_{50\%} = 122.10 \text{ kV}$ $SD = 3.70 \text{ kV}$

ตารางที่ ค.6 ข้อมูลจากวิธีปรับระดับแรงดันขึ้นลง ที่ P = 2 บาร์, g = 10 ม.ม., F = 50% ไข้วลบ

ระดับที่	Va (kV)	Vp (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30		
1	113.526	109.71					X																			X								
2	110.313	107.74				O		X		X					X							X				O		X						
3	107.1	104.20	X		O				O		X				O		X		X		O		X		O				X					
4	103.887	101.05		O								X		O			O		O		O									X		X		
5	100.674	97.04											O																			O		

$V_{50\%} = 104.08 \text{ kV}$ $SD = 3.37 \text{ kV}$

ตารางที่ ค.7 ข้อมูลจากวิธีปรับระดับแรงดันขึ้นลง ที่ P = 2 บาร์, g = 10 ม.ม., F = 100% ไข้วบวก

ระดับที่	Va (kV)	Vp (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	155.65	147.41					X						X									X						X					
2	151.37	143.08				O		X		X		O		X								O		X		X		O		X		X	
3	147.08	138.97	X		O				O		O				X				X		O				O		O				O		
4	142.80	134.17		O												X		O		O													
5	138.52	131.85															O																

$V_{50\%} = 140.72 \text{ kV}$ $SD = 4.24 \text{ kV}$

ตารางที่ ค.8 ข้อมูลจากวิธีปรับระดับแรงดันขึ้นลง ที่ P = 2 บาร์, g = 10 ม.ม., F = 100% ไข้วลบ

ระดับที่	Va (kV)	Vp (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	151.368	145.40								X		X											X									X
2	147.084	140.67	X						O		O		X							X		O		X							O	
3	142.8	136.34		X		X		O						X		X		X		O		O				X		X		O		
4	138.516	132.72			O		O								O		O		O								O		O			

$V_{50\%} = 137.86 \text{ kV}$ $SD = 4.16 \text{ kV}$

ค.2 ข้อมูลจากวิธีปรับระดับแรงดันขึ้นลง ที่ P = 2 บาร์, g = 20 ม.ม.

ตารางที่ ค.9 ข้อมูลจากวิธีปรับระดับแรงดันขึ้นลง ที่ P = 2 บาร์, g = 20 ม.ม., F = 0% ไข้วบวก

ระดับที่	Va (kV)	Vp (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	159.94	154.63															X																
2	155.65	150.13														O		X															
3	151.37	145.32			X		X								O				X														
4	147.08	142.01		O		O		X						O						X		X											
5	142.80	138.51	O						X		X		O								O		X			X				X			
6	138.52	134.64								O		O												X		O		X		O		X	
7	134.23	128.80																							O					O			

$V_{50\%} = 139.88 \text{ kV}$ $SD = 5.95 \text{ kV}$

ตารางที่ ค.10 ข้อมูลจากวิธีปรับระดับแรงดันขึ้นลง ที่ P = 2 บาร์, g = 20 ม.ม., F = 0% ไข้วลบ

ระดับที่	Va (kV)	Vp (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	136.23	129.60																	X													
2	132.38	126.72								X							O		X		X						X					X
3	128.52	123.74	X		X				O		X		X			O					O		X			O		X		O		
4	124.66	119.62		O		X		O				O		X		O								X		O			O			
5	120.81	116.45					O								O										O							

$V_{50\%} = 122.57 \text{ kV}$ $SD = 3.51 \text{ kV}$

ตารางที่ ค.11 ข้อมูลจากวิธีปรับระดับแรงดันขึ้นลง ที่ P = 2 บาร์, g = 20 ม.ม., F = 25% ไขว้บวก

ระดับที่	Va (kV)	Vp (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	175.93	169.06							X																								
2	171.22	165.98						O		X		X																X				X	
3	166.50	161.01			X		O				O		X		X		X									O		X			O		
4	161.79	155.47		O		O								O		O		X						X		O				O			
5	157.08	151.10	O																X		X		O		O								
6	152.37	146.61																															

$V_{50\%} = 158.02 \text{ kV}$ $SD = 6.08 \text{ kV}$

ตารางที่ ค.12 ข้อมูลจากวิธีปรับระดับแรงดันขึ้นลง ที่ P = 2 บาร์, g = 20 ม.ม., F = 25% ไขว้ลบ

ระดับที่	Va (kV)	Vp (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	171.22	164.57										X																					
2	166.50	161.20	X								O		X														X						
3	161.79	155.85		X		X				O				X		X				X		X				O		X		X		X	
4	157.08	150.57			O		X		O						O		X		O		O		X		O				O		O		
5	152.37	147.57						O										O							O								

$V_{50\%} = 154.09 \text{ kV}$ $SD = 4.59 \text{ kV}$

ตารางที่ ค.13 ข้อมูลจากวิธีปรับระดับแรงดันขึ้นลง ที่ P = 2 บาร์, g = 20 ม.ม., F = 50% ไขว้บวก

ระดับที่	Va (kV)	Vp (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30		
1	205.92	197.93																X																
2	199.92	191.36	X														O		X													X		
3	193.92	184.87		X										X		O				X		X								O		X		
4	187.92	178.91			X						X		O		O						O		X					O						
5	181.93	173.49				X				O		O												X			O							
6	175.93	168.18					X		O																X		O							
7	169.93	165.37						O																		O								

$V_{50\%} = 179.36 \text{ kV}$ $SD = 8.71 \text{ kV}$

ตารางที่ ค.14 ข้อมูลจากวิธีปรับระดับแรงดันขึ้นลง ที่ P = 2 บาร์, g = 20 ม.ม., F = 50% ไข้วลบ

ระดับที่	Va (kV)	Vp (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	124.52	119.66				X						X				X																
2	121.09	116.95			O		X				O		X		O		X													X		
3	117.67	113.70		O				X		O				O				X									O		X			
4	114.24	110.41	O						O										X				X			O				X		
5	110.81	106.57																		X		O		X		O						X
6	107.39	103.62																			O				O							

$V_{50\%} = 112.54 \text{ kV}$ $SD = 4.78 \text{ kV}$

ตารางที่ ค.15 ข้อมูลจากวิธีปรับระดับแรงดันขึ้นลง ที่ P = 2 บาร์, g = 20 ม.ม., F = 100% ไข้วบวก

ระดับที่	Va (kV)	Vp (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	233.48	223.44																		X												X
2	227.05	217.98			X													O			X		X		X					O		
3	220.63	212.98		O		X		X				X					O					O		O		X				O		
4	214.20	206.84	O				O		X		O		X			O										X		O				
5	207.77	201.54								O				X		O												O				
6	201.35	193.76													O																	

$V_{50\%} = 210.87 \text{ kV}$ $SD = 7.02 \text{ kV}$

ตารางที่ ค.16 ข้อมูลจากวิธีปรับระดับแรงดันขึ้นลง ที่ P = 2 บาร์, g = 20 ม.ม., F = 100% ไข้วลบ

ระดับที่	Va (kV)	Vp (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	210.77	202.34				X				X													X									X
2	204.78	197.68			O		X		O		X					X						O		X				X		O		
3	198.78	192.16		O				O				X			O		X					O			X		O		O			
4	192.78	185.90	O										X		O				X		O						O					
5	186.78	179.65												O						O												

$V_{50\%} = 193.09 \text{ kV}$ $SD = 6.46 \text{ kV}$

ค.3 ข้อมูลจากวิธีปรับระดับแรงดันขึ้นลง ที่ P = 3 บาร์, g = 10 ม.ม.

ตารางที่ ค.17 ข้อมูลจากวิธีปรับระดับแรงดันขึ้นลง ที่ P = 3 บาร์, g = 10 ม.ม., F = 0% ไข้วอก

ระดับที่	Va (kV)	Vp (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	127.95	122.87																			X												
2	124.52	120.51											X						O		X												
3	121.09	116.61			X							O		X				O				X		X									
4	117.67	113.44		O		X						O			X		O						O		X							X	
5	114.24	110.25	O				X				O						O									X					O		
6	110.81	106.75						X		O																	X		O				
7	107.39	104.42									O																		O				

$V_{50\%} = 112.96 \text{ kV}$ $SD = 4.90 \text{ kV}$

ตารางที่ ค.18 ข้อมูลจากวิธีปรับระดับแรงดันขึ้นลง ที่ P = 3 บาร์, g = 10 ม.ม., F = 0% ไข้วลบ

ระดับที่	Va (kV)	Vp (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	121.0944	117.09							X			X												X									
2	117.6672	113.67					O		X		O	X											O		X								
3	114.24	110.07	X				O				O			X				X		X		O				X		X					
4	110.8128	106.47		X		O									X		O		O		O						O		X		X		
5	107.3856	104.37			O												O													O			

$V_{50\%} = 109.84 \text{ kV}$ $SD = 3.89 \text{ kV}$

ตารางที่ ค.19 ข้อมูลจากวิธีปรับระดับแรงดันขึ้นลง ที่ P = 3 บาร์, g = 10 ม.ม., F = 25% ไขว้บวก

ระดับที่	Va (kV)	Vp (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	181.64	169.70			X							X																				
2	176.50	165.15		O		X						O		X																		X
3	171.36	160.46	O				X				O				X																O	
4	166.22	154.82						X		O						X										X					O	
5	161.08	149.62							O								X							O			X		O			
6	155.94	144.84															X					X		O				O				
7	150.80	139.87																X		O		O										
8	145.66	136.02																		O												

$$V_{50\%} = 154.16 \text{ kV}$$

$$SD = 9.61 \text{ kV}$$

ตารางที่ ค.20 ข้อมูลจากวิธีปรับระดับแรงดันขึ้นลง ที่ P = 3 บาร์, g = 10 ม.ม., F = 25% ไขว้ลบ

ระดับที่	Va (kV)	Vp (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	155.652	146.93																							X							
2	151.368	145.00		X																			O		X		X		X		X	
3	147.084	139.15	O		X														X		X		O			O		O		O		
4	142.8	134.42				X				X		X						O		O		O										
5	138.516	130.44					X		O		O		X				O															
6	134.232	125.33						O						X		O																
7	129.948	123.19													O																	

$$V_{50\%} = 136.27 \text{ kV}$$

$$SD = 6.84 \text{ kV}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.21 ข้อมูลจากวิธีปรับระดับแรงดันขึ้นลง ที่ P = 3 บาร์, g = 10 ม.ม., F = 50% ไขว้บวก

ระดับที่	Va (kV)	Vp (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	189.21	181.41															X		X													
2	183.86	176.20														O		O		X												X
3	178.50	172.80	X								X				O						X					X					O	
4	173.15	167.86		X						O		X		O								X			O		X		O			
5	167.79	162.00			X				O				O									X		O				O				
6	162.44	156.87				X		O															O									
7	157.08	151.42					O																									

$$V_{50\%} = 168.05 \text{ kV}$$

$$SD = 7.50 \text{ kV}$$

ตารางที่ ค.22 ข้อมูลจากวิธีปรับระดับแรงดันขึ้นลง ที่ P = 3 บาร์, g = 10 ม.ม., F = 50% ไขว้ลบ

ระดับที่	Va (kV)	Vp (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	155.652	147.25												X														X				
2	151.368	143.91											O		X							X		X		O		X				
3	147.084	139.73								X		O				X						O		O		O				X		
4	142.8	134.92	X		X				O		O						X				O									X		
5	138.516	130.67		O		X		O										X		O												X
6	134.232	125.75					O																									

$$V_{50\%} = 137.20 \text{ kV}$$

$$SD = 6.08 \text{ kV}$$

ตารางที่ ค.23 ข้อมูลจากวิธีปรับระดับแรงดันขึ้นลง ที่ P = 3 บาร์, g = 10 ม.ม., F = 100% ไข้วบก

ระดับที่	Va (kV)	Vp (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	204.35	197.72		X						X																		X				
2	198.56	191.20	O		X				O		X		X											X		O		X				
3	192.78	185.32				X		O				O		X					X				O		O				X		X	
4	187.00	179.70					O								X			O		X		O								O		
5	181.21	174.41														X		O				O										
6	175.43	169.70															O															

$$V_{50\%} = 151.90 \text{ kV}$$

$$SD = 14.56 \text{ kV}$$

ตารางที่ ค.24 ข้อมูลจากวิธีปรับระดับแรงดันขึ้นลง ที่ P = 3 บาร์, g = 10 ม.ม., F = 100% ไข้วลบ

ระดับที่	Va (kV)	Vp (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	181.6416	172.91																			X												
2	176.5008	168.66										X							O		X		X										
3	171.36	165.40	X								O		X					O				O		X		X							
4	166.2192	161.08		X		X				O				X				O							O		X					X	
5	161.0784	156.00			O		X		O						X		O											X		O			
6	155.9376	148.21						O								O														O			

$$V_{50\%} = 161.02 \text{ kV}$$

$$SD = 6.37 \text{ kV}$$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายปิ่นศักดิ์ เณศ ล้ำเลิศประเสริฐ เกิดวันที่ 12 ตุลาคม พ.ศ. 2521 จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ในปีการศึกษา 2542 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ตั้งแต่ปีการศึกษา 2543 จนถึงปัจจุบัน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย