บทที่ 2 ทฤษฎีเกี่ยวข้อง

ก๊าซเป็นฉนวนชนิดหนึ่งที่มีการพัฒนาปรับปรุงเพื่อให้มีประสิทธิภาพเพื่อใช้ในด้านเทคนิคการฉนวนไฟฟ้าแรงสูง ใช้เป็นฉนวนหลัก ฉนวนแทรกซึม และระบายความร้อน เป็นฉนวนอัดความดันได้ในภาชนะปิดหุ้มเพื่อให้มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้สูงขึ้น เช่น ก๊าซ SF_6 ใช้เป็นฉนวนในระบบสถานีไฟฟ้าย่อยที่ก๊าซเป็นฉนวน (Gas Insulated Substation) [10] ใช้เป็นฉนวนในเซอร์กิตเบรกเกอร์ แต่การเป็นฉนวนของก๊าซก็สามารถเสียได้เช่นกัน เมื่อมีการดิสชาร์จในก๊าซ โดยมีการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านก๊าซ โดยอาศัยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน และไอออนที่เกิดเพิ่มทวีคูณจากกระบวนการไอออไนเซชัน ซึ่งบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ในก๊าซ คุณสมบัติ ลักษณะธรรมชาติของก๊าซ เพราะก๊าซดิสชาร์จหรือเบรกดาวน์ในก๊าซจะเกี่ยวข้องกับโมเลกุล ความดัน การชนของโมเลกุลเป็นต้น

2.1 ลักษณะสมบัติธรรมชาติของก๊าซ [11]

ก๊าซที่สมบูรณ์ประกอบด้วยอนุภาคทรงกลมที่ยืดหยุ่นได้ (Elastic) จำนวนมากคือ โมเลกุล มีการเคลื่อนที่แบบยถากรรมอย่างต่อเนื่อง และชนกันเอง หรือชนผนังภาชนะ ก๊าซหนึ่งที่กำหนดให้ในสถานะปกติ โมเลกุลจะมีขนาดและน้ำหนักเท่ากันหมด โมเลกุลมีขนาดเล็ก เมื่อเทียบกับระยะเคลื่อนที่ระหว่างที่ชนครั้งหนึ่งกับครั้งถัดไป ซึ่งระยะดังกล่าวขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความดันก๊าซและเป็นไปตามกฎธรรมชาติของก๊าซที่นำมากล่าวในที่นี้

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของก๊าซชนิดต่างๆที่ใช้ในการทดสอบ [13]

ก๊าซ	He	Ar	CO_2	O_2	N_2	Air	SF_6
น้ำหนักโมเลกุล	4.003	39.948	44.001	32	28.013	28.96	146.05
จุดหลอมเหลว T_b(K)*	4.2	87.5	194.7	90.2	77.4	79	209.3
ความหนาแน่น(kg/m^3)	0.18	1.78	1.98	1.43	1.25	1.29	6.39
ค่าพลังงานไอออไนเซชัน(eV)[11]	24.6	15.7	14.4	12.1	15.7	-	15.9-19.3
GWP**	0	0	1	0	0	0	23900
โครงสร้าง	อะตอมเดี่ยว	อะตอมเดี่ยว	พันธะคู่	พันธะคู่	พันธะสาม	-	พันธะเดี่ยว

*T_b อ้างอิงที่ความดันบรรยากาศปกติ 760 Torr

**GWP (Global Warming Potential) เป็นค่าที่วัดเทียบกับ CO_2 ที่กำหนดให้ CO_2 มีค่าเท่ากับ 1

2.1.1 กฎทั่วไปของก๊าซ

กฎเบื้องต้นของก๊าซที่ควรกล่าวอันดับแรกก็คือ สมมติฐานของ Avogadro กล่าวว่า ก๊าซทั้งหลายในสถานะเดียวกัน คือ อุณหภูมิ และความดันเดียวกัน จะมีจำนวนโมเลกุลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรเท่ากัน ซึ่งจะช่วยให้สามารถหาค่าอื่นๆเกี่ยวกับก๊าซได้

กฎต่อไปที่เกี่ยวข้องกับก๊าซ ก็คือ Gay Lussac 's law ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ของความดันปริมาตร และอุณหภูมิสมบูรณ์ (K) ก๊าซที่สมบูรณ์อาจเขียนความสัมพันธ์ได้ว่า

$$pV = RT$$

ถ้าให้ $V = V_0$ จะได้ $p = RT/V_0$ และ

แทนค่า $n = N_0 / V_0$ จะได้ $p = RnT/ N_0$

นั่นคือ $p = nKT$

โดยที่ p คือ ความดันก๊าซ

V คือ ปริมาตรของก๊าซ

R คือ ค่าคงตัวของก๊าซทั่วไป = 8.3143 J/K mole

T คือ อุณหภูมิสมบูรณ์ K

V_0 คือ ปริมาตรกรัมโมลของก๊าซ

N_0 คือ จำนวนโมเลกุลในหนึ่งกรัมโมล

N คือ จำนวนโมเลกุลใน $1cm^3$ เท่ากับ N_0/ V_0

K คือ Boltzman's gas constant เท่ากับ $R/ N_0 = 1.3804 \times 10^{-23}$ J/ K

2.1.2 ทฤษฎีจลน์เบื้องต้นของก๊าซ

การเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซ อาจจะอธิบายด้วยวิธีกลไกของทาวน์เซนด์ หรือกลไกเบรกดาวน์แบบสตรีมเมอร์ ซึ่งกลไกทั้งสองอาศัยทฤษฎีจลน์ (Kinetic theory) เป็นพื้นฐานที่เกี่ยวกับระยะอิสระ การถ่ายทอดพลังงาน การเกิดประจุอิสระโดยการไอออไนเซชัน หรือการปล่อยประจุ การเพิ่มทวีคูณของอนุภาคประจุที่นำไปสู่การเกิดดิสชาร์จหรือการเบรกดาวน์

2.1.2.1 ระยะอิสระเฉลี่ย

ก๊าซประกอบด้วยโมเลกุล หรืออะตอม ซึ่งอยู่หรือเคลื่อนที่ด้วยพลังงานความร้อนอย่างไม่เป็นระเบียบ จึงเกิดการชนกันเองได้ ช่วงระยะห่างระหว่างที่อนุภาคเคลื่อนที่ชนครั้งหนึ่ง กับครั้งสองในขณะที่มีความเร็ว v เรียกว่าระยะอิสระ

2.1.2.2 การเคลื่อนที่ของอนุภาค

ถ้ามีสนามไฟฟ้า อนุภาคประจุจะเคลื่อนที่ไม่เป็นระเบียบ (จากพลังงานความร้อน) เมื่อมีสนามไฟฟ้า E จะทำให้เกิดแรงกระทำบนอนุภาคประจุ อนุภาคประจุเหล่านี้จะเคลื่อนที่อย่างมีระเบียบ การเคลื่อนที่ของประจุก็คือมีกระแสไหลผ่านนั้นเอง ในก๊าซอัตความดันความเร็วจะมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับความเร็วเนื่องจากความร้อน สภาพการเคลื่อนที่ของอนุภาคพิจารณาจากการชนกัน ความเร็วของการเคลื่อนที่ของอนุภาคเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียดสนามไฟฟ้า

$$V = \mu \cdot E$$

เมื่อ μ คือสภาพการเคลื่อนที่ (Mobility) ของอนุภาค

2.2 การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนก๊าซ

เบรกดาวน์ในก๊าซจะเกิดได้ต้องมีอะวาลานซ์ของอิเล็กตรอน ซึ่งเกิดจากสององค์ประกอบคือ การมีอิเล็กตรอนอิสระเบื้องต้น และ สนามไฟฟ้าที่ป้อนมีค่าสูงเพียงพอที่ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ และมีพลังงานเพียงพอที่เกิดไอออไนเซชันสร้างอิเล็กตรอนอะวาลานซ์ ก๊าซจะเสียสภาพความเป็นฉนวนไปเมื่อเกิดเบรกดาวน์ด้วยกระบวนการไอออไนเซชันและกลไกการเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซ อย่างไรก็ตามสภาพการฉนวนจะกลับคืนสู่สภาพเดิมได้เมื่อแรงดันที่ทำให้เกิดดิสชาร์จหมดไป เช่น แรงดันอิมพัลส์ [11][14][15]

2.3 ไอออไนเซชันและการปล่อยอิเล็กตรอน

โดยทั่วไปอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซเมื่อได้รับพลังงานเพียงพอ จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกไปหนึ่งอิเล็กตรอน อะตอมหรือโมเลกุลนั้น จึงมีประจุเป็นบวก เช่นนี้เรียกว่าเกิดไอออไนซ์ กระบวนการที่แยกอิเล็กตรอนออกจากโมเลกุลของก๊าซ และมีไอออไนบวกเพิ่มขึ้น เรียกว่า ไอออไนเซชัน (Ionization) หรือการแตกตัวของอิเล็กตรอนจากโมเลกุล ส่วนกระบวนการที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากของแข็ง เรียกว่า การปล่อยอิเล็กตรอน (Electron emission) ในที่นี้อิเล็กตรอนจะหลุดออกจากอิเล็กโตรด ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง ที่ทำให้ก๊าซมีสภาพนำไฟฟ้าขึ้นมาได้

ก๊าซจะมีสภาพนำไฟฟ้าได้เมื่อมีอนุภาคประจุอิสระจำนวนมากพอ โดยกระบวนการทวีคูณเพิ่มขึ้นของอิเล็กตรอน และไอออนในแกปนั้นแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการ [16] คือ กระบวนการแตกตัวของอิเล็กตรอนออกจากโมเลกุลของก๊าซ อันเกิดจากการชนของอนุภาคกับโมเลกุล (อิเล็กตรอน, ไอออน และโฟตอนชนกับโมเลกุล) และกระบวนการปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวอิเล็กโตรด เมื่อได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าสูง หรือได้รับพลังงานความร้อน รังสี หรือไอออนวิ่งมากระทบผิวอิเล็กโตรด

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 28 มี.ค. 2555
เลขทะเบียน 247087
เลขเรียกหนังสือ

2.3.1 ไอออไนเซชันโดยการชน (Collision ionization)

อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดการเคลื่อนที่เป็นพลังงานจลน์ อิเล็กตรอนวิ่งเข้าชนอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซ ถ้าพลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้านี้มีค่ามากกว่าพลังงานไอออไนเซชัน (Ionization energy) W_i ของโมเลกุลของก๊าซ ก็จะเกิดไอออไนเซชัน ตามความสัมพันธ์ในสมการ (2.1)

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

เมื่อเกิดไอออไนเซชันแล้วอิเล็กตรอนจะหลุดออกมาจากโมเลกุลเป็นไอออนบวก และอิเล็กตรอนที่หลุดออกมานี้เคลื่อนที่ไปชนโมเลกุลก๊าซตัวอื่นแล้วให้อิเล็กตรอนตัวใหม่อีกเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เรียกว่าอะวาลานซ์ของอิเล็กตรอน (Electron avalanche)

2.3.1.2 สัมประสิทธิ์การไอออไนเซชันในก๊าซ

ขณะที่อนุภาคเคลื่อนที่ไประหว่างอิเล็กโตรดอาจเกิดการชนได้มากกว่าหนึ่งครั้ง ทาวน์เซนด์ได้เสนอว่าจำนวนการชนและเกิดไอออเซชันต่อหนึ่งหน่วยระยะที่อนุภาคประจุเคลื่อนที่ไปนั้นจะกำหนดด้วยแฟกเตอร์อย่างหนึ่งหรือที่เรียกว่า สัมประสิทธิ์การเกิดไอออไนเซชัน α และ β โดย α เป็นสัมประสิทธิ์การชนแตกตัวด้วยอิเล็กตรอนชนกับโมเลกุล ส่วน β เป็นสัมประสิทธิ์การชนของไอออน หรือสามารถจำกัดความได้เป็น α เป็นค่าเฉลี่ยของการชนแล้วเกิดไอออไนเซชันของอิเล็กตรอน 1 ตัวที่เคลื่อนที่ไประหว่างแกป เป็นระยะ 1 ซม. หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าสัมประสิทธิ์การไอออไนเซชันขั้นที่หนึ่งของ Townsend first ionization coefficient สำหรับ β คือจำนวนการชนของไอออนบวกกับโมเลกุลก๊าซทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระและไอออนบวกต่อหนึ่งหน่วยระยะทางที่เคลื่อนที่

เนื่องจากไอออนบวกมีมวลมาก ฉะนั้นการได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าจึงน้อยและการถ่ายทอดพลังงานเมื่อชนก็จะน้อยด้วย นั่นคือ $\beta << \alpha$ ฉะนั้นการไอออไนเซชันในก๊าซจึงมักจะเกิดจากกระบวนการชนด้วยอิเล็กตรอน ค่าสัมประสิทธิ์การไอออไนเซชัน α จะขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นของก๊าซซึ่งมีความสัมพันธ์

$$\frac{\alpha}{p} = f\left(\frac{E}{p}\right) \qquad (2.2)$$

ความสัมพันธ์สมการ (2.2) สำหรับก๊าซต่างๆมีลักษณะคล้ายๆกันอาจเขียนได้ด้วยสมการ

$$\frac{\alpha}{p} = A\exp\left(-\frac{B}{E/p}\right) \qquad (2.3)$$

โดยที่ $B = A V_i$ และ $A = AT$ (T คือ อุณหภูมิมีหน่วยเป็น K)

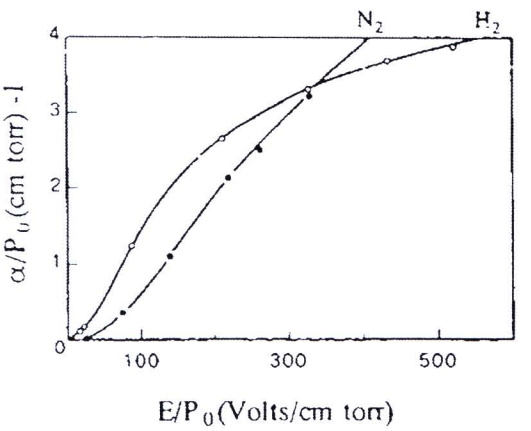
แต่การใช้สมการ (2.3) จะต้องใช้ค่า A และ B ช่วงจำกัดของ E/p ดังตารางที่ 2.1

A และ B เป็นค่าคงตัวขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซ ฟังก์ชันนี้ใช้ได้ในช่วงจำกัดของ E/p ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.2 ค่าคงตัว A และ B ของก๊าซต่างๆ

Gas	$A(cm - torr)^{-1}$	$B(cm - torr)^{-1}$	$\frac{E}{p}\left(\frac{V}{cm\text{-}torr}\right)$	V_i (volts)
H_2	5	130	150-160	15.4
N_2	12	342	100-600	15.5
Air	15	365	100-800	-
CO_2	20	466	500-1000	12.6
He	3	34	20-150	24.5
Hg	20	370	200-600	-

ค่าของ α / p ดังสมการ (2.2) จะเป็นปัจจัยที่สำคัญที่กำหนดค่าความคงทนต่อการเกิดเบรกดาวน์ของก๊าซ รูปที่ 2.1 จะเป็นกราฟตัวอย่างของความสัมพันธ์ในสมการ (2.3) ของก๊าซ N_2 และ H_2 จากกราฟจะเห็นว่า α / p จะไม่ได้เริ่มต้นที่แกนศูนย์แต่จะเริ่มที่ค่า E/p ค่าหนึ่งซึ่งแสดงถึงค่าความคงทนต่อแรงดัน E_b มีค่าต่ำสุดเกิดในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอที่แกปวางห่างกันมากๆ ทั้งนี้เนื่องจากที่ความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำๆและเส้นทางเดินของอิเล็กตรอนมีระยะไกลจึงมีโอกาสที่โมเลกุลของก๊าซจับอิเล็กตรอนไว้ได้กลายเป็นไอออนลบทำให้เคลื่อนที่ได้ช้าไอออไนเซชันได้ยาก เป็นการหน่วงการเกิดการเกิดเบรกดาวน์ ปรากฏการณ์เช่นนี้จะเห็นได้ชัดในก๊าซอนุภาคประจุลบ

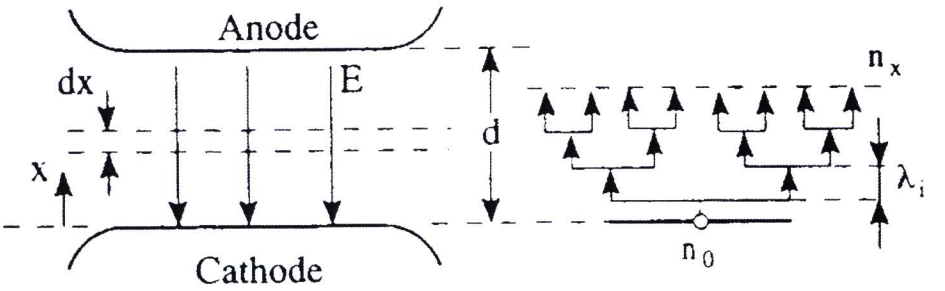


รูปที่ 2.1 กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง α / p และ E/p ของก๊าซ N_2 และ H_2

2.3.1.3 การเกิดอะวาลานซ์อิเล็กตรอน (Electron avalanche)

เมื่ออิเล็กตรอนที่มีพลังงานจลน์มากพอเคลื่อนที่ชนกับโมเลกุลของก๊าซจะทำให้เกิดการไอออไนเซชัน คือ จะเกิดอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นใหม่และเมื่ออิเล็กตรอนที่หลุดมาใหม่นี้ได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าที่จ่ายอยู่ก็จะเคลื่อนที่ไปชนโมเลกุลของก๊าซอีก ดังนั้นจะทำให้อิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงจุดที่เกิด

การแตกตัวของอิเล็กตรอนเป็นจำนวนมากเรียกว่าการเกิดอะวาลานซ์ของอิเล็กตรอน รูปที่ 2.2 แสดงไดอะแกรมของการเกิดอะวาลานซ์ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอโดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนจากขั้วแกปที่เป็นแคโทดไปยังแอโนดโดยจะเพิ่มจำนวนขึ้นเรื่อยๆไปตามเส้นทางแบบทวีคูณ[11]



รูปที่ 2.2 รูปการเกิดอะวาลานซ์ของอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

2.3.2 โฟโตไอออไนเซชัน (Photo ionization)

เมื่อโมเลกุลหรืออะตอมของก๊าซได้รับพลังงานเข้าไปจำนวนหนึ่งเช่น อาจเกิดจากอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปชน หรือได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้า แต่พลังงานที่ได้รับนั้นมีค่าไม่มากพอที่จะทำให้เกิดการไอออไนเซชันอิเล็กตรอนจะไม่หลุดออกมาแต่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นคือจะมีวงโคจรที่มากขึ้นและจะกลับเข้าสู่วงโคจรปกติโดยจะคายพลังงานออกมาเรียกว่า โฟตอน (Photon) และถ้าอะตอมหรืออนุภาคใดกระทบกับโฟตอนอาจทำให้เกิดการไอออไนเซชันขึ้นได้ หรือเรียกว่าโฟโตไอออไนเซชัน (Photo ionization) สำหรับพลังงานที่อิเล็กตรอนคายออกมาเมื่อถูกกระตุ้นหรือโฟตอนจะใช้สัญลักษณ์เป็น $h\nu$ ดังนั้นเมื่อเกิดโฟโตไอออไนเซชันจะได้ว่า

$$h\nu \geq W_i \tag{2.4}$$

โดย h เป็นค่าคงตัวของ Plank (6.6257×10^{-34} j·s)

ν ความถี่ของรังสี (Hz)

W_i พลังงานไอออไนเซชัน (eV)

2.3.3 เทอร์มัลไอออไนเซชัน (Thermal ionization)

กระบวนการเทอร์มัลไอออไนเซชันเป็นการเกิดไอออไนเซชันโดยอนุภาคของก๊าซได้รับพลังงานความร้อนโดยผลจากความร้อนจะทำให้ อนุภาคของก๊าซมีพลังงานจลน์สูงขึ้นเมื่อชนกันจะทำให้เกิดการไอออไนเซชันได้ อนุภาคของก๊าซถูกพลังงานกระตุ้นทำให้ปล่อยโฟตอนออกมาและเกิดการชนระหว่างโฟตอนกับอนุภาค เกิดโฟโตไอออไนเซชันขึ้น

2.3.4 การเกิดอิเล็กตรอนโดยหลุดจากผิวโลหะ (Electron emission)

การเกิดอิเล็กตรอนโดยหลุดออกจากผิวโลหะหรือผิวของขั้วแคโทดเรียกว่า Cathode process กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่เสริมกระบวนการไอออไนเซชันที่สำคัญอย่างหนึ่งเพราะถือได้ว่าเป็นขบวนการเพิ่มทวีคูณจำนวนอิเล็กตรอนอิสระเป็นจำนวนมากทั้งยังช่วยให้เกิดอิเล็กตรอนเริ่มต้น *สำหรับขบวนการไอออไนเซชันอีกด้วย โดยปกติอิเล็กตรอนจะถูกดึงดูดอยู่ในเนื้อโลหะด้วยแรงการ* ปล่อยประจุ (Electrostatic forces) ระหว่างอิเล็กตรอนกับไอออนในผลึกโลหะ ดังนั้นต้องใช้พลังงานจำนวนหนึ่งในการที่จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวโลหะเรียกว่าค่าฟังก์ชันการทำงาน (Work function) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของโลหะแต่ละชนิดและรูปแบบในการรับพลังงานเข้าไปก็ยังมีได้หลายวิธีดังกล่าวต่อไป [11]

ตารางที่ 2.3 ค่าเวิร์คฟังก์ชันการทำงานของธาตุบางชนิด

Element	Ag	Al	Cu	Fe	W
W_a (eV)	4.74	2.98-4.43	4.07-4.70	3.91-4.60	4.35-4.60

การปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากผิวโลหะโดยการชนของไอออนบวกและอะตอมในสภาพถูกกระตุ้น อิเล็กตรอนอาจหลุดออกจากผิวของโลหะได้ด้วยการกระทบของไอออนบวก หรืออะตอมที่อยู่ในสภาวะไม่เสถียรในการที่จะเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมาได้นั้นไอออนบวกที่ไปกระทบจะทำให้มีอิเล็กตรอนหลุดออกมา 2 ตัว และตัวหนึ่งจะใช้ไปในการทำให้ไอออนนั้นมีสภาวะเป็นกลาง พลังงานต่ำสุดที่ต้องใช้ในการทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากผิวโลหะด้วยการชนไอออนบวกจึงมีค่าเป็นสองเท่าของค่าฟังก์ชันการทำงาน (Work function) คือ $W_k+W_p \geq W_a$ โดย W_k และ W_p คือ พลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของไอออนที่ตกกระทบตามลำดับ กระบวนการเกิดอิเล็กตรอนจากผิวโลหะหรืออาจเรียกว่าการปล่อยประจุ (Electron emission) โดยการชนของไอออนบวกเป็นกระบวนการเบื้องต้นในการศึกษากลไกการเกิดการคายประจุแบบสปาร์กของทาวน์เซนด์ และนอกจากไอออนบวกแล้ว การชนของอะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้นหรือกึ่งเสถียร (Metastable) ยังสามารถทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากผิวโลหะได้อีกด้วย

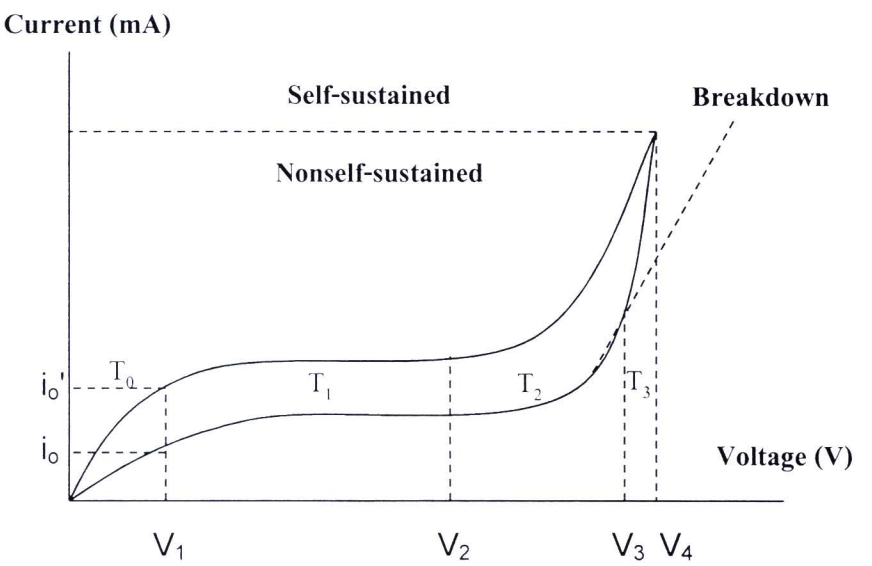
2.3.4.1 การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวแคโทดโดยสนามไฟฟ้า (Field emission)

อิเล็กตรอนสามารถหลุดออกจากผิวแคโทดได้โดยการจ่ายสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงคร่อมขั้วแคโทดทำให้เกิดอิเล็กตรอนหนาแน่นที่บริเวณผิวแคโทด และอิเล็กตรอนเหล่านี้จะรับพลังงานเข้าไปจนสามารถหลุดออกจากผิวโลหะได้ โดยปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ทันเนล เอฟเฟกท์ (Tunnel effect)

2.4 กลไกเบรกดาวน์ในก๊าซ (Mechanisms breakdown)

การเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซ หมายถึง การเปลี่ยนสภาพจากฉนวนไปสู่สภาพการนำไฟฟ้าโดยผ่านกระบวนการไอออไนเซชันและการปล่อยอิเล็กตรอนจนอิเล็กตรอนมีจำนวนมากพอทำให้ก๊าซสามารถนำไฟฟ้าได้โดยทฤษฎีแล้วกระแสไหลเป็นอนันต์ คือกระแสจะถูกจำกัดด้วยค่าความต้านทานของวงจรภายนอกเท่านั้นสำหรับกระแสที่ไหลในก๊าซจะมีสองลักษณะคือ กระแสไหลแบบประทังตัวเองไม่ได้ (Nonself-sustained) และกระแสไหลแบบประทังตัวเองได้ (Self-sustained)

เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าคร่อมขั้วอิเล็กโตรด จากนั้นทำการกระตุ้นให้เกิดอิเล็กตรอนเริ่มต้นโดยใช้รังสีส่องไปที่ขั้วอิเล็กโตรดที่เป็นแคโทด เมื่อเกิดกระแสไหลแบบประทังตัวเองไม่ได้ถ้านำต้นกำเนิดรังสีออกกระแสก็จะหยุดไหลแต่ถ้าเป็นกระแสไหลแบบประทังตัวเองได้กระแสจะยังคงไหลอยู่ กระแสที่ไหลในก๊าซกับแรงดันที่ป้อนจะสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังกราฟในรูปที่ 2.3 โดยช่วงแรกถ้าจ่ายแรงดันต่ำๆ จะมีกระแสไหลแบบประทังตัวเองไม่ได้ และเมื่อเพิ่มแรงดันขึ้น (จนถึง V_4) กระแสจะไหลแบบประทังตัวเองได้ ซึ่งในที่สุดก็จะเกิดเบรกดาวน์



รูปที่ 2.3 แสดงการเบรกดาวน์ของก๊าซ

ระยะเริ่มต้น, ระยะปานกลาง และระยะสุดท้าย

-ที่ระยะเริ่มต้น (T_0) จะเห็นว่ากระแสเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เพราะว่าเกิดกระแสรั่วไหล

-ที่ระยะปานกลาง (T_1) กระแสที่ไหลค่อนข้างคงที่ เพราะว่าเกิดขบวนการไอออไนเซชันกับขบวนการรวมตัวของอิเล็กตรอน (T_2) สมดุลกัน

-ที่ระยะสุดท้าย (T_3) กระแสจะไหลอย่างรวดเร็วและมากมาย และในที่สุดก็จะเกิดการเบรกดาวน์ อย่างสมบูรณ์ (Completely breakdown)

2.4.1 กลไกเบรกดาวน์ของทาวน์เซนด์ (Townsend Breakdown Mechanism)

ทฤษฎีนี้อธิบายการเกิดเบรกดาวน์ของก๊าซว่าเกิดจากการเพิ่มทวีคูณของอิเล็กตรอนซึ่งเกิดจากการชนไอออไนเซชัน (Collision ionization) ซึ่งประกอบด้วยขบวนการขั้นต้น (Primary or α - process) หมายถึงการเพิ่มทวีคูณของอิเล็กตรอนที่เกิดจากอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากแคโทดเคลื่อนที่ไปในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและได้รับพลังงานจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในขณะที่วิ่งเข้าหาแอโนดพลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับจะเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ เมื่ออิเล็กตรอนดังกล่าว (กำหนดให้เป็น e_1) เคลื่อนที่เข้าชนโมเลกุล หรืออะตอมของก๊าซ ซึ่งประกอบด้วยกลุ่มอิเล็กตรอน (กำหนดให้เป็น e_2) โคจรอยู่รอบๆ นิวเคลียส หลังจากที่ e_1 ชนอิเล็กตรอนดังกล่าวแล้ว ถ้าพลังงานที่ e_2 ได้รับจากการชนมีค่ามากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่าง e_2 กับนิวเคลียสของอะตอม หรือโมเลกุลของมัน e_2 จะหลุดออกมาเป็นอิสระจากอะตอมเดิมของมัน ซึ่งทำให้ขณะนี้มีอิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่ภายใต้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพิ่มขึ้น รวมเป็น 2 ตัว คือ e_1 และ e_2 เรียกว่าการเกิดไอออไนเซชัน โดยอะตอมเดิมที่เป็นกลางจะกลายเป็นไอบวก การเกิดไอออไนเซชันโดยทั่วไปจะหมายถึงการสร้างไอออนบวกโดยเอาอิเล็กตรอนออกมาจากอะตอมที่เป็นกลาง สำหรับกระบวนการที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากแคโทด ซึ่งโดยปกติแล้วอิเล็กตรอนจะยึดติดกับผิวอิเล็กโตรดด้วยแรง เนื่องจากไฟฟ้าสถิต ดังนั้นการทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากแคโทดหรืออิเล็กโตรดจะต้องให้พลังงานจำนวนหนึ่งไม่น้อยกว่าพลังงานเนื่องจากไฟฟ้าสถิต ดังกล่าว ซึ่งอาจจะทำได้โดยการฉายแสง, ฉายรังสี, ให้ความร้อน หรือได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าไปที่แคโทดหรืออาจจะใช้การชนของไอออนบวกไปที่แคโทด ส่วนกระบวนการขั้นสอง (γ - process) อันเป็นกระบวนการที่เกิดจากอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มขึ้นโดยการชนของไอออนบวกที่เกิดจากกระบวนการขั้นต้นซึ่งมีทิศทางในการเคลื่อนที่วิ่งเข้าชนแคโทด และเนื่องจากไอออนบวกมีน้ำหนักมากกว่าอิเล็กตรอน 1,840 เท่า เมื่อไอออนบวกนี้วิ่งเข้าชนแคโทดจะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากแคโทดทำให้อิเล็กตรอนอิสระในแกปเพิ่มทวีคูณเพิ่มขึ้น เมื่อมีอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดจากกระบวนการขั้นต่อไปอีก นั่นก็หมายความว่าจำนวนอิเล็กตรอนอิสระในแกปจะเพิ่มทวีคูณเพิ่มขึ้น ส่วนกระบวนการขั้นสองอีกกระบวนการหนึ่งคือ กระบวนการที่ไอออนบวกที่เกิดขึ้นจากกระบวนการขั้นต้นวิ่งไปชนโมเลกุลของก๊าซ ถ้าไอออนบวกนี้มีพลังงานสูงพอก็จะทำให้เกิดไอออไนเซชันในก๊าซ เรียกว่า กระบวนการ β (β – process) อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้ไม่อาจนำมาอธิบายการเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซได้ ด้วยเหตุผลพอสรุปได้คือ

1) ไอออนบวกไม่อาจทำให้เกิดไอออไนเซชันในก๊าซได้อย่างมีประสิทธิผลที่ความเครียดสนามไฟฟ้าจนเกิดเบรกดาวน์ เพราะจะเกิดได้ต้องใช้พลังงานตามทฤษฎีถึงสองเท่าแต่โอกาสเช่นนั้นมีน้อยมาก

2) ถ้ากลไกการเกิดไอออไนเซชันตามกระบวนการ (β) เป็นส่วนที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ ผิวโลหะของแคโทดจะไม่มีผลต่อค่าแรงดันเริ่มเกิดเบรกดาวน์ แต่ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าผิวโลหะของแคโทดมีผลอย่างมากต่อค่าแรงดันเบรกดาวน์

3) กลไกการเบรกดาวน์ตามกระบวนการ (β) ต้องใช้เวลาการเคลื่อนที่ของไอออนข้ามแกปมากกว่าเวลาการเกิดเบรกดาวน์ที่วัดได้

กระบวนการที่สองที่เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์จึงเป็นแบบไอออนบวกวิ่งชนแคโทดหรือที่เรียกว่ากระบวนการ (γ) โดยที่เงื่อนไขของการเกิดเบรกดาวน์คือ

$$\gamma (e^{\alpha_d} - 1) = 1 \qquad (2.5)$$

2.4.2 กฎของพาสเชน (Paschen's law)

กฎของพาสเชนเป็นผลสืบเนื่องของการเกิดเบรกดาวน์ของก๊าซในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ที่อธิบายโดยทฤษฎีทาวน์เซนด์

กฎของพาสเชน เป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรกดาวน์ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอกับผลคูณของความดันก๊าซ p กับระยะแกป d ระหว่างอิเล็กโตรด กล่าวว่า ค่าแรงดันเบรกดาวน์จะมีค่าคงที่ ถ้าผลคูณของ p กับ d มีค่าคงตัว หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ค่าแรงดันเบรกดาวน์ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอนั้นอยู่ในฟังก์ชันของผลคูณ p.d เท่านั้น บางตำราเรียกกฎนี้เป็นความสัมพันธ์ของพาสเชนทั้งนี้เพราะว่ากฎดังกล่าวไม่เป็นจริงทุกกรณี โดยเฉพาะปรากฏการณ์ที่ใช้กับความดันสูงๆ ทำให้บางครั้งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าความสัมพันธ์ของ พาสเชน

จากสมการ (2.2)

$$\frac{\alpha}{p} = f\left(\frac{E}{p}\right)$$

คูณสมการตลอดด้วย p.d

$$\alpha d = p \times df\left(\frac{E}{p}\right)$$

$$= p \times d\, f\left(\frac{v}{p \times d}\right) = \text{ค่าคงที่} \qquad (2.6)$$

เมื่อ V เป็นค่าแรงดันซึ่งจะพบว่า V อยู่ในฟังก์ชัน $P \times d$ เท่านั้น

จะสามารถพล็อตกราฟระหว่าง α / p กับ E/p ได้กราฟในรูปที่ 2.4 ซึ่งจะใช้ในการหาความสัมพันธ์หรือกฎของ พาสเชน (กราฟเส้น 1) จากรูปที่ 2.4

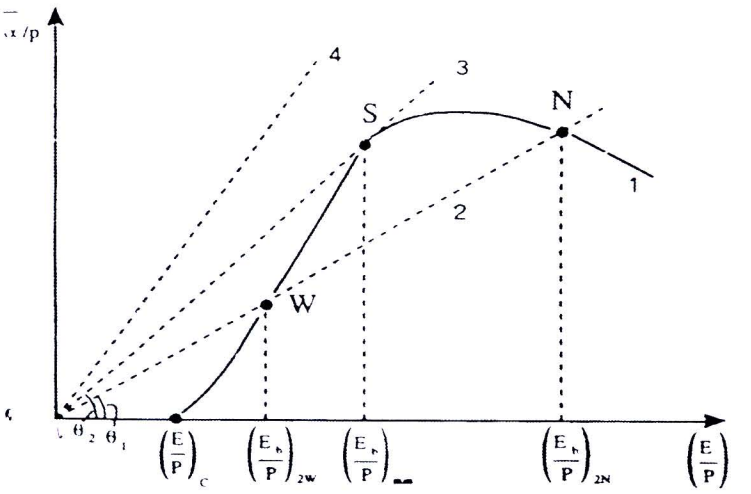
$$\tan \theta = \frac{\alpha p}{E/p}$$

เนื่องจากเป็นสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ ($\eta = 1$) V = Ed ดังนั้น

$$\tan\theta = \frac{\alpha \times p}{V} \qquad (2.7)$$

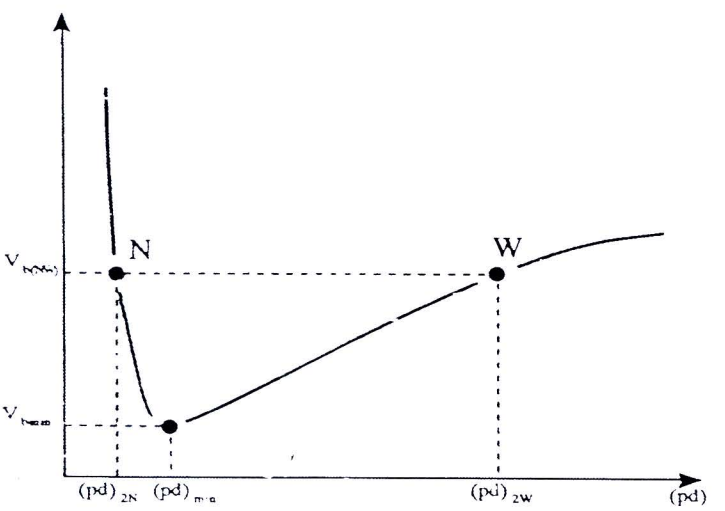
เมื่อลากเส้นตามสมการ (2.7) จะได้เส้นตรงทำมุม θ โดยค่ามุม θ จะขึ้นอยู่กับแรงดัน V โดยที่แรงดันต่ำๆ จะได้เส้นตรงความชันมากๆ (มุม θ ใหญ่) ดังเส้น (4) ทำให้ไม่ตัดกับเส้นโค้ง พาสเชน

เส้นที่ 1 หมายความว่าไม่มีการเบรกดาวน์เกิดขึ้นและที่แรงดันสูงๆจะได้กราฟดังเส้น (2) ซึ่งจะมีจุดตัดสองจุดแสดงว่ามีค่าแรงดันเบรกดาวน์สองค่า



รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ของ Townsend (αd=k) และฟังก์ชั่น α / p = f(E/p)

ดังนั้นที่จุด S เป็นจุดที่เส้นตรงสัมผัสเส้นโค้ง แสดงถึงค่าแรงดันต่ำสุดที่จะทำให้เกิดการเบรกดาวน์ได้ ที่จุดตัด W เกิดการเบรกดาวน์กรณีที่ระยะช่องอากาศกว้างๆ (E/p) มีค่าต่ำความดันคงที่ และจุด N เกิดการเบรกดาวน์กรณีช่องอากาศแคบๆ แต่ E/p มีค่าสูง เมื่อหาหลายจุดจะได้เส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของ V และ p.d ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรกดาวน์กับค่า pd หรือเรียกว่า Paschen's curve

2.4.3 ทฤษฎีสตรีมเมอร์ (Streamer theory) [17][18]

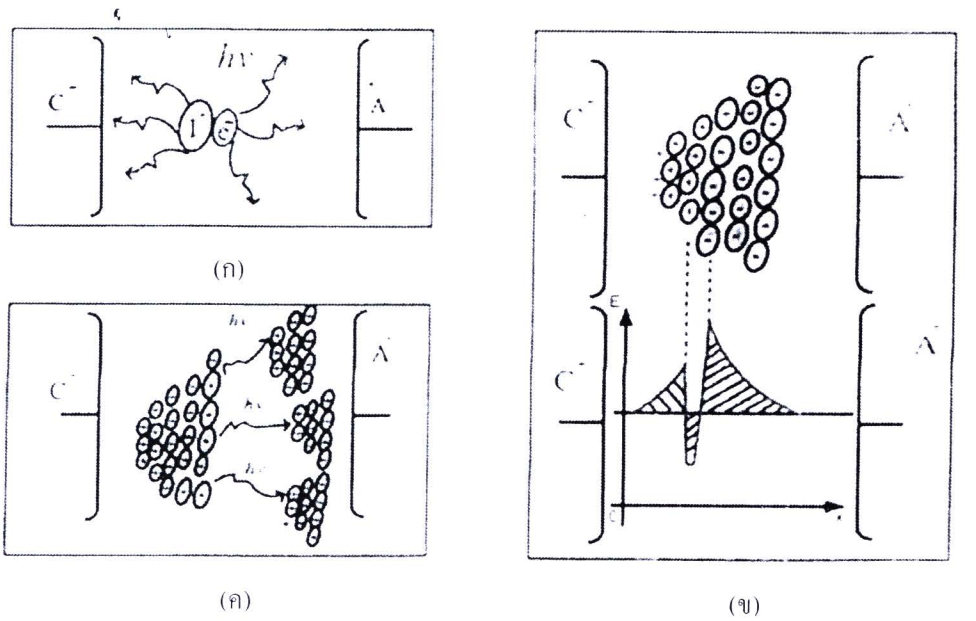
เนื่องจากกลไกเบรกดาวน์ตามทฤษฎีของทาวน์เซนด์ไม่สามารถอธิบายการเกิดเบรกดาวน์ได้ทุกกรณี เช่น การเกิดเบรกดาวน์ในช่องแกปกว้างๆในบรรยากาศของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าที่เกิดเบรกดาวน์ในช่วงหน้าคลื่น เวลาคลื่นตัด (Chopped Time, T_c) น้อยกว่า 0.1 ไมโครวินาที เป็นเวลาที่น้อยเกินไปที่ไอออนบวกจะสามารถเคลื่อนที่ไปถึงแคโทดเพื่อสร้างอิเล็กตรอนอิสระได้ เมื่อคำนวณเวลาตามกระบวนการของทาวน์เซนด์ที่ใช้สร้างอะวาลานซ์ของอิเล็กตรอนโดยการชนแตกตัวแล้วปล่อยอิเล็กตรอนจะพบว่า มากกว่าเวลาคลื่นตัดที่วัดได้จากการทดลองหรือแม้แต่คิดเวลาที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่โดยตรงจากแคโทดข้ามช่องแกปไปยังแอโนดโดยไม่ชนกับโมเลกุลเลยก็ใช้เวลานานกว่าเวลาคลื่นตัดที่ทดลองได้ อีกประการหนึ่งทฤษฎีของทาวน์เซนด์ไม่สามารถอธิบายผลของประจุค้าง ที่อยู่เบื้องหลังของอิเล็กตรอนอะวาลานซ์ก่อนๆ กลุ่มไอออนเหล่านี้ทำให้สนามไฟฟ้าเดิมบิดเบือนไปในทางที่มีความเครียดสูงขึ้นและอาจทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานมากพอที่จะเกิดไอออไนเซชันขึ้นได้ เช่น ในสนามไฟฟ้าที่มีความไม่สม่ำเสมอสูง

Meek และ Loeb [17] ได้เสนอทฤษฎีสตรีมเมอร์บวกในปี 1940 และในเวลาเดียวกัน Rather [18] ก็เสนอทฤษฎีสตรีมเมอร์ลบ เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ซึ่งทฤษฎีของทาวน์เซนด์อธิบายไม่ได้ หลักการของการเกิดเบรกดาวน์ตามทฤษฎีสตรีมเมอร์เป็นผลสืบเนื่องจากกระบวนการวิ่งชนไอออไนเซชัน (กระบวนการ α) ของทาวน์เซนด์ กล่าวคือจะมีการไอออไนเซชันเป็นจำนวนมากจากหลังโฟตอน ซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันใหม่ (Recombination) ระหว่างไอออนบวกกับอิเล็กตรอนแล้วจะปลดปล่อยพลังงานออกมา การเกิดไอออไนเซชันแบบนี้เรียกว่า โฟโตไอออไนเซชัน (Photo ionization) ของก๊าซ ดังรูป 2.6 โมเลกุลที่ส่วนหน้าของอะวาลานซ์ กลุ่มประจุค้างของไอออนที่ส่วนหัวของอะวาลานซ์ทำให้สนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและทำให้เกิดไอออไนเซชันเพิ่มขึ้นอย่างมาก ไอออนบวกเคลื่อนที่ได้ช้าเมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ไอออนบวกจึงรวมตัวกันอยู่เบื้องหลังเป็นหมอกประจุค้าง ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ส่วนหัวและหลังอะวาลานซ์เพิ่มสูงขึ้นแต่ในบริเวณระหว่างอิเล็กตรอนกับประจุค้าง ความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลง การเพิ่มสูงขึ้นของความเครียดสนามไฟฟ้าตามจุดต่างๆทำให้เกิด โฟโตไอออไนเซชันขยายตัวเพิ่มขึ้นเกิดอะวาลานซ์ใหม่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หมอกประจุค้างเพิ่มขึ้นทำให้สภาพนำไฟฟ้าสูงขึ้นเป็นแนวมีลักษณะเป็นสตรีมเมอร์ระหว่างแอโนดกับแคโทดและเกิดเบรกดาวน์ตามแนวนี้ จึงเรียกกลไกเบรกดาวน์ลักษณะนี้ว่าสตรีมเมอร์เบรกดาวน์

เงื่อนไขการเกิดสตรีมเมอร์เบรกดาวน์กำหนดด้วยช่วงต่อของการเปลี่ยนแปลงสถานภาพจากอิเล็กตรอนอะวาลานซ์ไปสู่สตรีมเมอร์ซึ่งแบ่งอธิบายออกเป็นสองทางตามทฤษฎีที่เสนอคือ

1) Meek และ Loeb [17] ได้เสนอเงื่อนไขการเปลี่ยนจากอิเล็กตรอนอะวาลานซ์เดี่ยวไปสู่สตรีมเมอร์ว่าจะเกิดขึ้นเมื่อสนามไฟฟ้าเนื่องจากไอออนบวกที่หัวอะวาลานซ์มีค่าประมาณเท่าๆกันกับความเครียดสนามไฟฟ้าที่ป้อนจากภายนอก

2) Rather [18] เสนอเงื่อนไขสตีมเมอร์เบรกดาวน์กำหนดด้วยสนามไฟฟ้าจากประจุค้างเช่นกัน และกำหนดว่าสตรีมเมอร์จะเกิดขึ้นเมื่ออะวาลานซ์มีจำนวนอิเล็กตรอนหรือไอออนบวกตามกระบวนการไอออไนเซชัน ประมาณ 10^8 โดยไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซหรือความดันก๊าซหรือระดับความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้า [18]

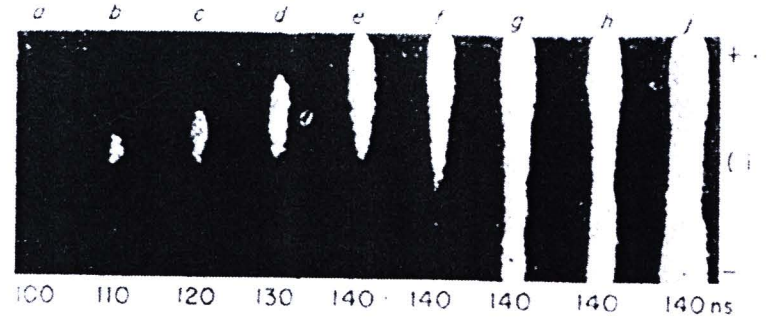


รูปที่ 2.6 การเกิดโฟโตไอออไนเซชัน

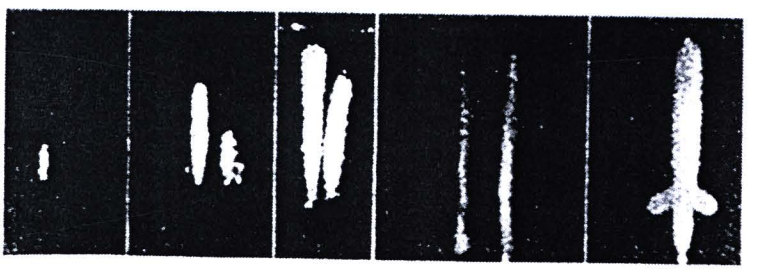
(ก) พลังงานโฟตอนเป็นผลจากการรวมตัวกันใหม่

(ข) รูปแบบความเข้มสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป

(ค) พัฒนาการของการเกิดสตรีมเมอร์



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.7 การเกิดสตรีมเมอร์ [17]

(ก) พัฒนาการการเกิดไอออไนเซชันเนื่องจากผลประจุค้างของก๊าซไนโตรเจนที่ความดัน 200 torr แรงดันเกิน 25 เปอร์เซ็นต์

(ข) การเกิดอะวาลานซ์ของกลุ่มอิเล็กตรอน และอะวาลานซ์สตรีมเมอร์ของช่องว่างอากาศ 3-6 cm. ความดัน 260 torr ความเครียดสนามไฟฟ้า 11800 V/cm.

2.5 ลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้า (Electric field configuration) [11]

การทดสอบโดยทั่วไปสามารถแบ่งชนิดของสนามไฟฟ้าตามลักษณะของแกปทดสอบออกเป็น 2 ชนิด ประกอบไปด้วย

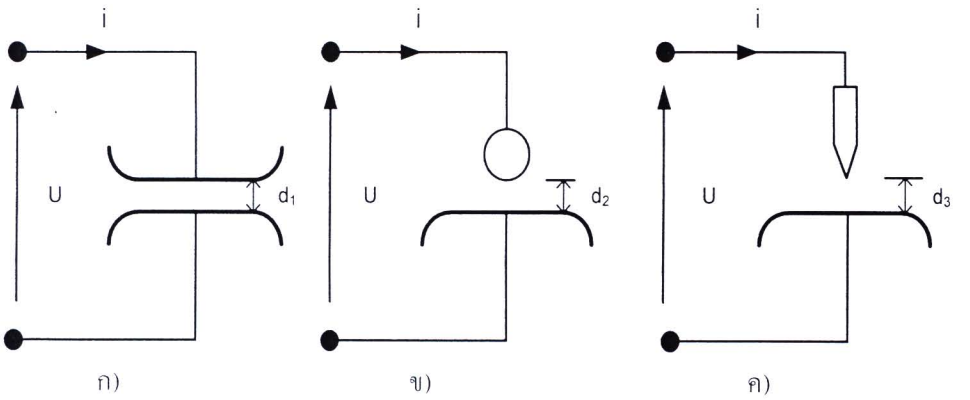
1) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform field) ได้แก่ แกปแบบระนาบ - ระนาบ

2) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform field)

2.1) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly non - uniform field) ได้แก่ แกปแบบทรงกลม - ระนาบ หรือ แกปแบบทรงกลม - ทรงกลม (ที่ระยะแกปน้อยกว่า D/2)

2.2) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (Highly non-uniform field) ได้แก่ แกปแบบแท่ง - ระนาบ แกปแบบแท่ง - แท่ง เป็นต้น

ซึ่งสนามไฟฟ้าจะเป็นแบบไหนขึ้นอยู่กับรูปร่างลักษณะของอิเล็กโตรดดังรูปที่ 2.8 [11]



รูปที่ 2.8 อิเล็กโตรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ

(ก) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform Field)

(ข) สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly non-uniform field)

(ค) สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอสูง (Highly non-uniform field)

เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับอิเล็กโตรดในลักษณะต่างๆที่วางอยู่ในอากาศดังรูปที่ 2.8 [11] พบว่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์จะไม่เท่ากัน แม้ว่าระยะ d_1, d_2 และ d_3 จะเท่ากันก็ตาม การเกิดเบรกดาวน์จะแตกต่างกันเนื่องจากองค์ประกอบหรือแฟกเตอร์ที่เกี่ยวข้องมีค่าแตกต่างกันซึ่งจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบอีกหลายประการ

2.5.1 สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform field)

สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หมายถึง สนามไฟฟ้าเท่ากันทุกจุด ดังเช่น ในช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรดระนาบ-ระนาบ ซึ่งคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$E_{max} = E = \frac{U}{d} \tag{2.8}$$

เมื่อ

U คือ แรงดันที่ป้อนระหว่างอิเล็กโตรด (V)

d คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด (cm)

E คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า ณ จุดใด ๆ ระหว่างอิเล็กโตรด (V/cm)

E_{max} คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (V/cm)

เมื่อทำการป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอจะเกิดเบรกดาวน์หรือ สปาร์กทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรด (ซึ่งเท่ากันทุกจุด) ถึงค่าที่กำหนดค่าหนึ่งโดยประมาณและกระแสเพิ่มขึ้นอย่างมากในทันทีทันใด (หรืออากาศทำตัวเป็นตัวนำไฟฟ้าชั่วขณะ) แต่โดยทั่วไป

ค่ากระแสเบรกดาวน์จะถูกจำกัดด้วยค่าอิมพีแดนซ์ที่ถูกต่อก่อนชุดทดสอบหรือวงจรภายนอกเท่านั้น ก่อนการเบรกดาวน์นั้นค่ากระแสจะวัดไม่ได้เพราะการเกิดเบรกดาวน์ลักษณะนี้จะเป็นแบบโดยตรง (ไม่ใช่การเกิดแบบบางส่วน) ทำให้กระแสไฟฟ้าจะไหลได้ก็ต่อเมื่ออากาศสามารถนำประจุไฟฟ้าข้ามช่องว่างแกปจากอิเล็กโตรดหนึ่งไปยังอิเล็กโตรดหนึ่ง และค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันขณะเกิดเบรกดาวน์ คือ ค่าความคงทนทางไฟฟ้า (Dielectric strength) หรือค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของการฉนวนนั่นเอง คำนวณได้จาก

$$E_b = \frac{U_b}{d} \tag{2.9}$$

เมื่อ

U_b คือ แรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ด้วยสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (V)

E_b คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ (V/cm)

ค่า E_b ขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่าง ๆ เช่น ความหนา หรือระยะห่าง d ที่ไม่เท่ากัน

2.5.1.1 อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform field)

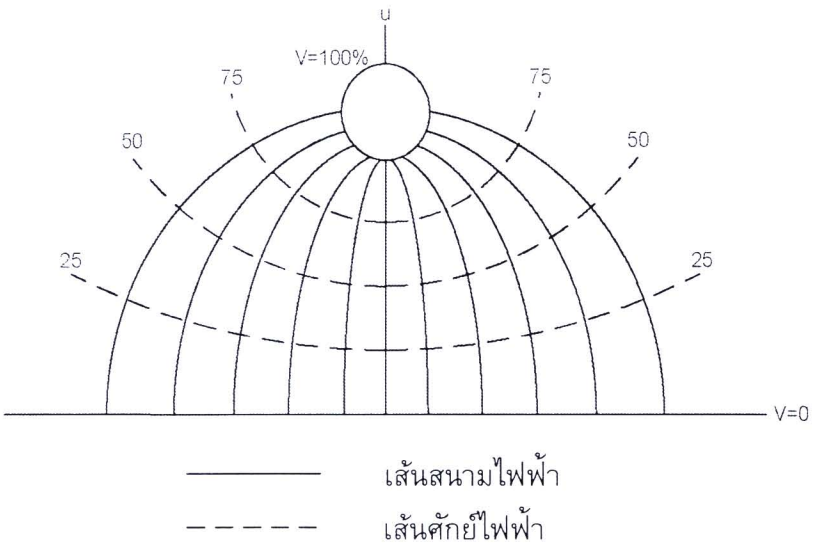
สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ คือ ความเข้มสนามไฟฟ้าแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้นความแตกต่างกัน ณ จุดต่างๆ จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิเล็กโตรดที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากหรือน้อย แต่ถ้าเขียนเส้นสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่าจะได้ดังรูปที่ 2.8 [11] จะเห็นได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโตรดทรงกลม ซึ่งอาจคำนวณได้จากสมการที่ (2.10) [11]

$$E_{max} = \frac{U}{d.\eta^*} \tag{2.10}$$

η^*: แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (Field Utilization Factor) นิยามว่า $\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{max}}$ ซึ่งโดยทั่วไปจะมีค่า ≤ 1

ดังนั้นกล่าวได้ว่า η^* คือ ดัชนีบอกให้ทราบว่าอิเล็กโตรดนั้นมีลักษณะสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากน้อยเพียงใดและโดยอาศัยแฟกเตอร์สนามไฟฟ้านี้เองจึงสามารถคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ของฉนวนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยได้คือ

$$E_b = \frac{U}{d.\eta^*} \tag{2.11}$$



รูปที่ 2.9 แสดงเส้นศักย์เท่าและเส้นสนามไฟฟ้า

จึงอาจกล่าวได้ว่า η^* ก็คือดรรชนีบอกให้ทราบว่าอิเล็กโตรดนั้นมีลักษณะสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากน้อยเพียงใดโดยอาศัยแฟกเตอร์สนามไฟฟ้านี้เองจึงคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ของฉนวนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอได้ดังสมการที่ (2.11) [11]

สมการที่ (2.11) [11] นี้ใช้ได้เฉพาะกรณีที่อิเล็กโตรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยหรือใช้กับกรณีที่ไม่มีโคโรน่า หรือ พรีดีสชาร์จ (Pre-discharge) เกิดก่อนเบรกดาวน์ (สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย) กล่าวคือ ก่อนเกิดเบรกดาวน์จะไม่ปรากฏว่ามีกระแสไหลระหว่างอิเล็กโตรดเลย และลักษณะสนามไฟฟ้าจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงจะเกิดเบรกดาวน์ทันทีที่ความเข้มสนามไฟฟ้าสูงถึงค่าหนึ่ง คือ ค่าสนามไฟฟ้าวิกฤต E_b

ในกรณีที่อิเล็กโตรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ความเครียดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงจะอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับผิวอิเล็กโตรดที่มีพื้นผิวน้อยที่สุด เมื่อระยะห่างออกไปจากผิวอิเล็กโตรดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็วดังในรูปที่ 2.10 [11] อิเล็กโตรดแบบนี้ถึงแม้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าถึงค่าวิกฤติแล้วก็ตามจะไม่เกิดเบรกดาวน์แต่จะเกิดโคโรน่าในบริเวณใกล้ๆผิวอิเล็กโตรด คือ บริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง ส่วนบริเวณอื่นๆ ยังมีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำจะไม่เกิดโคโรน่า ฉะนั้นในช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรด จะเกิดดีสชาร์จที่ไม่สมบูรณ์ (คือไม่ตลอดแนวระหว่างอิเล็กโตรด) เรียกว่า ดีสชาร์จบางส่วน (Partial discharge) ปรากฏการณ์อาจเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องหรือเป็นช่วง ๆ จึงทำให้มีกระแสไหลในวงจรที่ป้อนแรงดันให้อิเล็กโตรด กระแสนี้จะเกิดขึ้นและวัดได้ก่อนเกิดเบรกดาวน์เรียกว่ากระแสโคโรน่า หรือกระแสดีสชาร์จ การเกิดโคโรน่าจึงทำให้สนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตเปลี่ยนไปเพราะมีประจุค้าง

(Space charge) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดยังคำนวณได้จากสมการที่ (2.12) [11] แต่ η^* จะเปลี่ยนไป ดังนั้นค่าความเครียดเบรกดาวน์ของการฉนวนจะคำนวณจากสมการที่ (2.11) [11] ไม่ได้ อย่างไรก็ตามสมการที่ (2.11) [19] นี้อาจใช้คำนวณหาความเข้มสนามไฟฟ้าที่แรงดันโคโรน่าเริ่มเกิดได้ เพราะสนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตยังไม่เปลี่ยนแปลงนั่นคือ

$$E_i = \frac{U_i}{d.\eta^*} \tag{2.12}$$

เมื่อ

E_i คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มเกิด (V/cm)

U_i คือ แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนขณะเริ่มเกิดโคโรน่า (Corona Inception Voltage) (V)

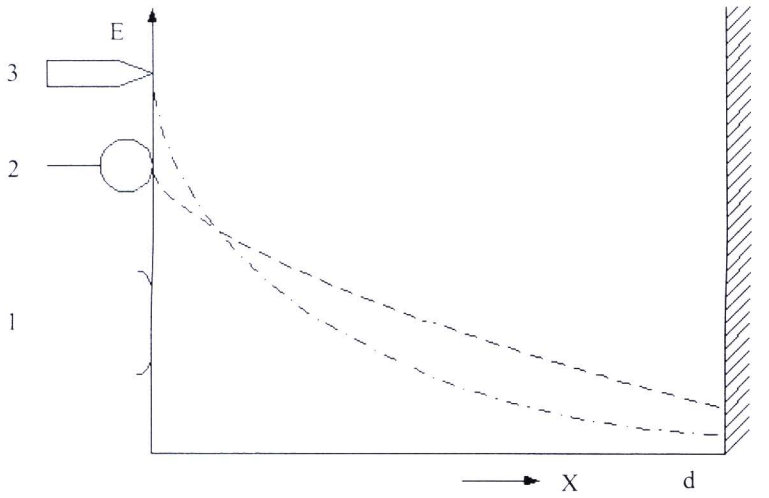
โดย E_i และ U_i เป็นค่าความเครียดสนามไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่โคโรน่าเริ่มเกิดฉะนั้นจึงใช้ได้เฉพาะกรณีที่ไม่มีประจุค้างระหว่างอิเล็กโตรดหรือกล่าวได้ว่าสมการที่ (2.12) [11] นี้ใช้สำหรับคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าหรือแรงดันเริ่มต้น (Starting Voltage, Threshold Voltage, Inception Voltage) ซึ่งหมายถึงแรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงในช่องระหว่างอิเล็กโตรดอาจจะเป็นเบรกดาวน์ต่อกัน ในกรณีที่อิเล็กโตรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ หรือไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย และอาจจะเป็นแรงดันที่โคโรน่าเริ่มเกิด ในกรณีที่เป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ซึ่งค่าแรงดันเบรกดาวน์จะมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเริ่มต้นจึงอาจเขียนให้อยู่ในรูปสมการทั่วไปว่า

$$U_i = E_i.d.\eta^* \tag{2.13}$$

เมื่อ

U_i คือ แรงดันเริ่มต้น (V)

E_i คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันเริ่มต้น U_i (V/cm)



รูปที่ 2.10 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดลักษณะต่างๆ

เมื่อ

1 คือ อิเล็กโตรดแบบระนาบ - ระนาบ สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ $\eta^* = 1$

2 คือ อิเล็กโตรดแบบทรงกลม - ระนาบ สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย $0.4 < \eta^* \leq 0.8$

3 คือ อิเล็กโตรดแบบแท่ง - ระนาบ สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง $0.1 < \eta^* \leq 0.3$

2.6 ความน่าจะเป็นในการเบรกดาวน์ [11][20][21]

ปกติแล้วในการป้อนแรงดันให้กับอุปกรณ์ทดสอบนั้น ที่ระดับแรงดันค่าหนึ่งอาจจะเกิดหรือไม่เกิดการเบรกดาวน์ก็ได้ ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับค่าแรงดันที่ป้อน สำหรับฉนวนประเภทที่คืนสภาพได้เอง โดยเฉพาะก๊าซนั้น มาตรฐานมักกำหนดค่าความคงทนต่อแรงดันไว้เป็นค่าแรงดันที่มีโอกาสทำให้เกิดการเบรกดาวน์

2.7 วิธีการทดสอบจ่ายแรงดันต่อเนื่อง (Successive discharge test)

การทดสอบด้วยวิธีนี้สามารถใช้ได้กับแรงดันกระแสตรง แรงดันกระแสสลับ รวมไปถึงแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งวิธีการทดสอบแบบนี้ทำได้โดยการป้อนแรงดันแบบต่อเนื่องเข้าไปสู่วัตถุทดสอบจนเกิดเบรกดาวน์เป็นจำนวน 10 - 20 ครั้ง ในการทดสอบจะต้องมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบให้เหมือนกัน เพื่อประโยชน์ในการได้มาซึ่งข้อมูลที่ถูกต้องจึงได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ดังนี้

- จำนวนครั้งในการทดสอบ โดยหลักความเป็นจริงแล้วการทดสอบที่มีจำนวนครั้งมากก็ยิ่งมีความแม่นยำสูง แต่หากทดสอบสอบมากเกินไปแล้วผลการการทดสอบยังเหมือนเดิมก็ถือว่าไม่มีประโยชน์อะไร ดังนั้นการทดสอบที่ดีควรมีจำนวนครั้งในการทดสอบที่เหมาะสม ซึ่งตามมาตรฐาน

IEC 60052 (2002) [22] ได้มีการกำหนดจำนวนครั้งในการทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ไฟฟ้ากระแสสลับไว้คือ ต้องมีการป้อนแรงดันทดสอบอย่างน้อย 10 ครั้ง

- **ช่วงเวลาระหว่างการทดสอบแต่ละครั้ง** เมื่อจ่ายแรงดันอย่างต่อเนื่องจนวัตถุทดสอบเกิดเบรกดาวน์ เราควรหยุดเพื่อให้ฉนวนอากาศมีเวลาในการคืนสภาพความเป็นฉนวน ช่วงเวลาดังกล่าวนี้ต้องไม่น้อยกว่า 30 วินาทีตามมาตรฐาน IEC 60052 (2002) [22]

- **อัตราการเพิ่มแรงดันทดสอบ** ในการเพิ่มแรงดันที่ป้อนให้กับวัตถุทดสอบนั้นต้องพิจารณาที่เครื่องมือที่ใช้วัดว่าสามารถวัดแรงดันได้หรือไม่ ซึ่งจะใช้ตามมาตรฐาน IEC 60-1 (1989) [20] ได้กำหนดให้การป้อนแรงดันจะค่อยๆเพิ่มอย่างช้าๆ จนกระทั่งถึง 75% ของแรงดันที่คาดว่าเบรกดาวน์ก็จะทำการเพิ่มแรงดันด้วยอัตราเร็ว 2% ของแรงดันที่คาดว่าจะเบรกดาวน์ต่อวินาที

หลังจากทำการทดสอบจนได้ข้อมูลการทดสอบสามารถหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ได้จากสมการ (2.14)

$$U_{50\%} = \frac{\sum U_i}{n} \qquad (2.14)$$

n คือ จำนวนครั้งที่ป้อนแรงดันที่ระดับ U_i

2.8 กฎความดันย่อยของดอลตัน

ก๊าซทุกชนิด ไม่ว่าจะเป็นก๊าซออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ หรือก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซเหล่านี้ต่างก็ต้องการปริมาตรและมีความดันอยู่ค่าหนึ่งตามปริมาณของก๊าซและอุณหภูมินั้นๆ แต่ถ้าเรานำก๊าซสองชนิด หรือมากกว่าสองชนิดขึ้นไปมาผสมกัน โดยก๊าซเหล่านั้นต้องไม่ทำปฏิกิริยาต่อกัน จอห์น ดอลตัน สรุปว่า ความดันรวมของก๊าซผสมจะเท่ากับผลรวมของความดันย่อยของก๊าซแต่ละชนิดที่ผสมกัน

เมื่อผสมก๊าซอุดมคติสองชนิด A และ B ซึ่งไม่ทำปฏิกิริยาเคมีต่อกันไว้ในภาชนะปริมาตร V ที่อุณหภูมิคงตัวอันหนึ่ง ก๊าซทั้งสองผสมเข้ากันดีเป็นสารผสมเอกพันธุ์ ทั้งก๊าซ A และก๊าซ B ต่างมีความดันภายในภาชนะนั้นเหมือนว่ามันอยู่ตามลำพังโดยไม่มีอีกก๊าซหนึ่งอยู่ด้วย ความดันของแต่ละก๊าซในก๊าซผสมเช่นนี้เรียกว่า ความดันย่อย

PA = ความดันย่อยของก๊าซ A (บาร์)

PB = ความดันย่อยของก๊าซ B (บาร์)

เนื่องจาก A และ B เป็นก๊าซอุดมคติ

ดังนั้น PA = nART/V (บาร์)

และ PB = nBRT/V (บาร์)

โดยมี nA และ nB เป็นจำนวนมวลของก๊าซ A และ B

ความดันย่อยของก๊าซ A + ความดันย่อยของก๊าซ B = (PA+PB)

แต่ nA + nB = nt(จำนวนมวลทั้งหมด)

ดังนั้น PA + PB = ntRT/V = Pt (บาร์)

หรือเขียนว่า Pt = PA + PB (บาร์)

โดยที่

Pt ความดันรวม หน่วยเป็นบาร์

V เป็นปริมาตรของก๊าซ หน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร

P เป็นความดันของก๊าซ หน่วยเป็นบาร์

T เป็นอุณหภูมิ หน่วยเป็นเคลวิน

n เป็นจำนวนมวลของก๊าซ หน่วยเป็นกรัมต่อโมล

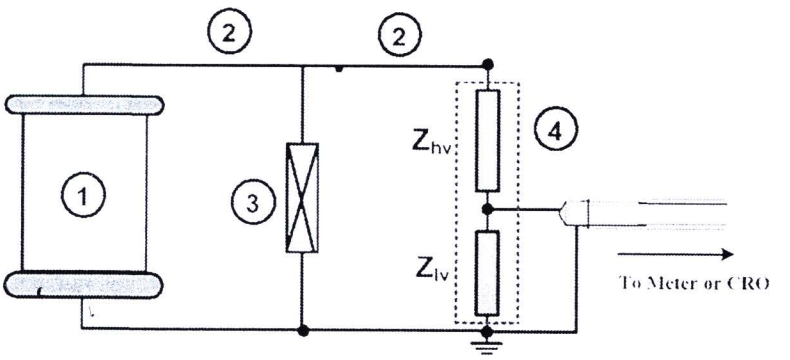
R เป็นค่าคงตัวก๊าซอุดมคติ (ประมาณ 8.3145 จูล/(โมล เคลวิน))

2.9 ก๊าซผสม $SF_6 - N_2$

ก๊าซ SF_6 เป็นก๊าซก่อสภาวะเรือนกระจกที่ดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้ดีซึ่งมีความสามารถทำให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้นมากกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ประมาณ 25,000 เท่า และก๊าซ SF_6 เป็นก๊าซที่สูญสลายในสิ่งแวดล้อมได้ยาก จึงทำให้มีปริมาณก๊าซ SF_6 สะสมขึ้นเรื่อยๆ [23] นอกจากนี้ก๊าซ SF_6 ยังมีราคาแพง และก๊าซพลอยได้ (byproduct gases) ที่เกิดจากการเบรกดาวน์ของก๊าซ SF_6 เป็นสารประกอบของกำมะถันซึ่งเป็นพิษต่อร่างกายและสิ่งแวดล้อม เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) เป็นต้น [24] ดังนั้นจึงได้มีความพยายามลดปริมาณการใช้ SF_6 ด้วยวิธีต่างๆ เช่น หาก๊าซอื่นที่ดีกว่า การนำก๊าซ SF_6 กลับมาใช้ใหม่ การหาก๊าซอื่นมาผสมเพื่อลดปริมาณการใช้ ซึ่งก๊าซที่นิยมนำมาใช้ผสมก็คือ ก๊าซไนโตรเจน (N_2) เนื่องจากเป็นก๊าซที่มีราคาถูก หาได้ง่าย และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ก๊าซไนโตรเจนยังเป็นก๊าซที่มีคุณสมบัติสามารถลดพลังงานอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นจากสนามไฟฟ้าให้ต่ำลงหรือช้าลง เพื่อให้ก๊าซ SF_6 จับอิเล็กตรอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ [25][26] และก๊าซไนโตรเจนมีความไวต่อการเกิดเบรกดาวน์ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (เช่น ผิวอิเล็กโตรดที่มีผิวขรุขระหรือมีปลายแหลม และมีฝุ่นผงปะปนอยู่ในก๊าซ) น้อยกว่าก๊าซไฟฟ้าลบอื่นๆ (Electronegative- gases) [27]

2.10 การวัดแรงดันสูงด้วยโวลเตจดิไวเดอร์ [11]

เทคนิคการวัดแรงดันสูงด้วยโวลเตจดิไวเดอร์ต่อร่วมกับอุปกรณ์วัดด้านแรงดันต่ำ แสดงดังรูปที่ 2.11 ความถูกต้องเที่ยงตรงของการวัดนอกจากจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของอุปกรณ์วัดด้านแรงดันต่ำแล้วยังขึ้นอยู่กับความเที่ยงตรงและความน่าเชื่อถือได้ของโวลเตจดิไวเดอร์ด้วย



รูปที่ 2.11 ระบบวัดแรงดันสูงไฟฟ้ากระแสสลับ

โดยที่

1 คือ แหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสสลับ (Testing transformer)

2 คือ สายตัวนำแรงดันสูง

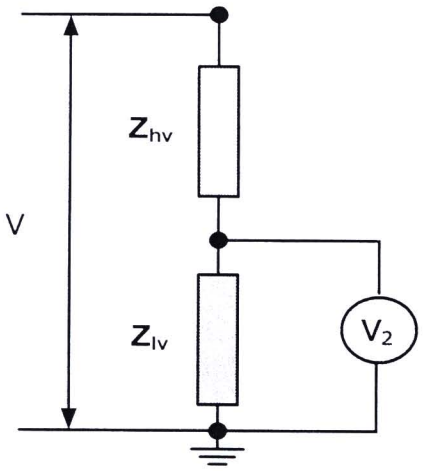
3 คือ อุปกรณ์ที่ต้องการทดสอบ

Z_{hv} คือ อิมพีแดนซ์ภาคแรงสูง

Z_{lv} คือ อิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำ

2.10.1 หลักการโวลเตจดิไวเดอร์

โวลเตจดิไวเดอร์เป็นอุปกรณ์แบบ Passive ทำหน้าที่แบ่งทอนแรงดันสูงๆ ออกเป็นส่วนแรงดันต่ำเพื่ออยู่ในเกณฑ์ที่จะสามารถใช้โวลท์มิเตอร์หรือเครื่องวัดแรงดันต่ำวัดได้ ด้วยการใช้อิมพีแดนซ์แรงสูง (Z_{hv}) ต่อร่วมกับอิมพีแดนซ์แรงต่ำ (Z_{lv}) ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ระบบวัดแรงดันสูงด้วยโวลเตจดิไวเดอร์ [11]

ขนาดแรงดันสูงจริงที่ต้องการวัด (V) จะเป็นสัดส่วนกับแรงดันขาออกทางด้านแรงต่ำที่วัดได้ (V_2) ดังสมการที่ (2.15)

$$V_2 = \frac{Z_{lv}}{Z_{hv} + Z_{lv}} V \qquad (2.15)$$

2.10.1.1 โวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ

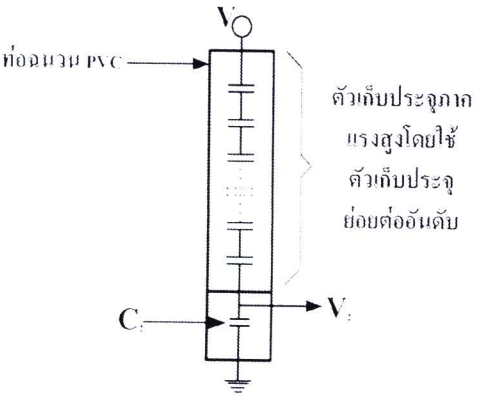
โวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุสำหรับใช้วัดแรงดันสูงกระแสสลับ ซึ่งมีไดอะแกรมดังรูปที่ 2.13 ประกอบด้วย C_1 เป็นตัวเก็บประจุภาคแรงสูง และ C_2 เป็นตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ โดยหลักการแล้วกระแสที่ไหลเข้าเครื่องวัด (i_2) จะต้องมีค่าน้อยมากจนเกือบเป็นศูนย์ นั่นคือกระแสไหลผ่านตัวเก็บประจุภาคแรงสูง และแรงต่ำจะต้องเท่ากัน ซึ่งจะได้อัตราส่วนแรงดันดังสมการที่ (2.16)

$$V_2 = \left(\frac{C_1}{C_1 + C_2}\right) V \qquad (2.16)$$

ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงที่นิยมใช้ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงโดยทั่วไปจะมีอยู่ 2 แบบคือ ตัวเก็บประจุเดี่ยวทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมแบบก๊าซอัดความดัน และแบบตัวเก็บประจุย่อยต่ออันดับแต่ละแบบมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันและยังขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน ซึ่งในที่นี้จะขอกล่าวถึงในส่วนของตัวเก็บประจุย่อยต่ออันดับ

2.10.1.2 ตัวเก็บประจุย่อยอันดับ

ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงแบบนี้ ได้จากการนำเอาตัวเก็บประจุย่อยประเภทเซรามิกส์ หรือตัวเก็บประจุแบบกระดาษชุบน้ำมันฉนวนหรือแบบอื่น ๆ จำนวนหลายๆ ตัวมาต่ออันดับกัน ตัวเก็บประจุที่ใช้ส่วนใหญ่ชนิดโพลีโพไพลีน นำมาต่ออันดับกันเป็นตัวเก็บประจุภาคแรงสูง ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงแบบใช้ตัวเก็บประจุย่อยต่ออันดับ

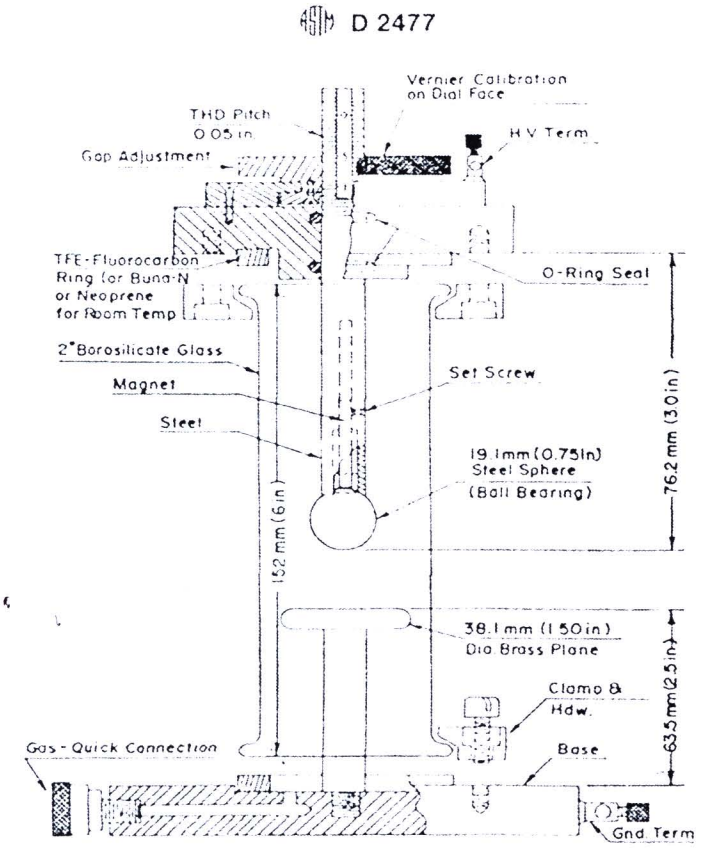
2.11 มาตรฐาน American Society for Testing and Materials (ASTM) D 2477-96 [28]

2.11.1 การดูดอากาศและอัดก๊าซตามมาตรฐาน ASTM D 2477-96

- ปั๊มสุญญากาศ จะต้องสามารถดูดอากาศภายในชุดทดสอบได้ต่ำกว่า 1 torr
- เกจวัดความดันและสุญญากาศ ต้องวัดความดันได้ต่ำกว่า 1 torr และต้องทำการปรับเทียบในหน่วย torr

2.11.2 อิเล็กโตรดและชุดทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 2477-96

อิเล็กโตรดแบบทรงกลมทำมาจากเหล็กมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.75 นิ้ว (19.1 มิลลิเมตร) และแบบระนาบทำมาจากทองเหลืองมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.50 นิ้ว (38.1 มิลลิเมตร) ตามมาตรฐาน ASTM D 2477-96 ดังแสดงในรูป 2.14 ระยะแกปที่ใช้ในการทดสอบ 0.100 ± 0.001 นิ้ว (2.54 ± 0.025 มิลลิเมตร)



รูปที่ 2.14 ชุดทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 2477-96[28]

2.11.3 การเตรียมชุดทดสอบ ASTM D 2477-96

- ทำความสะอาดชุดทดสอบยกเว้นอิเล็กโตรดด้วยสบู่หรือผงซักฟอกหลังจากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นหรือน้ำสะอาดแล้วทำให้แห้งทุกครั้งหลังจากทำการทดสอบ
- การทำความสะอาดอิเล็กโตรดจะทำการขัดด้วย ผ้าที่ย้อมด้วยสาร ferric oxide และน้ำมันหินเมื่ออิเล็กโตรดเกิดผิวขรุขระ
- ประกอบชุดทดสอบโดยว่างตำแหน่งให้ฝาตรงกับโอริง
- ปรับระยะแกปด้วยไมโครมิเตอร์

2.11.4 ขั้นตอนในการทดสอบ ASTM D 2477-96

- ดูดอากาศภายในชุดทดสอบให้มีความดันต่ำกว่า 1 torr
- เติมก๊าซที่ใช้ในการทดสอบที่ความดันบรรยากาศ
- ดูดอากาศภายในชุดทดสอบซ้ำอีกครั้งให้มีความดันต่ำกว่า 1 torr
- เติมก๊าซที่ใช้ในการทดสอบตามความดันที่ต้องการ
- ทำการป้อนแรงดันโดยการเพิ่มแรงดันจากศูนย์จนกระทั่งเกิดเบรกดาวน์ ทำการบันทึกค่าแรงดันเบรกดาวน์ 5 ค่า