บทที่ 2

ทฤษฎีการเกิดเบรคดาวน์ในก๊าซ

การเกิดเบรคดาวน์ในก๊าซ หมายถึง การเปลี่ยนสภาพการฉนวนไปสู่สภาพนำไฟฟ้า ซึ่งจะเกิดขึ้นได้ต่อเมื่อมีจำนวนอิเล็กตรอนหรือไอออนในแก๊ประหว่างอิเล็กโทรดมากพอ จนทำให้แก๊ปมีสภาพนำไฟฟ้าสูงพอ ปัจจุบันมีทฤษฎีเป็นที่ยอมรับในการอธิบายการเกิดเบรคดาวน์ในก๊าซมีอยู่ 2 ทฤษฎีด้วยกันคือ ทฤษฎีของทาวน์เซนด์ (Townsend's theory) และ ทฤษฎีสตรีมเมอร์ (Streamer theory) ทั้งสองทฤษฎีนี้อธิบายโดยอาศัยทฤษฎีจลน์ (Kinetic theory) เป็นพื้นฐาน [13, 14, 15]

2.1 ทฤษฎีของทาวน์เซนด์

ทฤษฎีนี้อธิบายการเกิดเบรคดาวน์ว่าเกิดจากการเพิ่มทวีคูณของอิเล็กตรอนซึ่งเกิดจากการชนไอออไนเซชัน (Collision ionization) ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการขั้นต้น (Primary or α-process) หมายถึง การเพิ่มทวีคูณของอิเล็กตรอนที่เกิดจากอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากแคโทดเคลื่อนที่ไปในสนามไฟฟ้าและได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าในขณะที่วิ่งเข้าหาแอโนด พลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับจะเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ ถ้าพลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับจากสนามไฟฟ้านี้มากกว่าพลังงานไอออไนเซชันของโมเลกุลของก๊าซก็จะเกิดไอออไนเซชัน ส่วนกระบวนการขั้นสอง (γ – process) อันเป็นกระบวนการที่เกิดอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มขึ้นโดยการชนของไอออนบวกที่เกิดจากกระบวนการขั้นต้นซึ่งมีทิศทางในการเคลื่อนที่วิ่งเข้าหาแคโทด และเนื่องจากไอออนบวกมีน้ำหนักมากกว่าอิเล็กตรอน 1,840 เท่า เมื่อไอออนบวกนี้วิ่งเข้าหาแคโทดจะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากแคโทด ทำให้มีอิเล็กตอรนอิสระในแก๊ปเพิ่มทวีคูณเพิ่มขึ้น เมื่อมีอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดจากกระบวนการขั้นสองก็ทำให้เกิดกระบวนการขั้นต้นต่อไปอีก นั่นก็หมายความว่าจำนวนอิเล็กตรอนอิสระในแก๊ปจะเพิ่มทวีคูณเพิ่มขึ้น ส่วนกระบวนการขั้นสองอีกกระบวนการหนึ่งคือ กระบวนการที่ไอออนบวกที่เกิดขึ้นจากกระบวนการขั้นต้นวิ่งไปชนโมเลกุลของก๊าซ ถ้าไอออนบวกนี้มีพลังงานสูงพอก็จะทำให้เกิดไอออนไนเซชันในก๊าซ เรียกว่า

กระบวนการ (β - process) อย่างไรก็ตามกระบวนการ นี้ไม่อาจนำมาอธิบายการเกิดเบรคดาวน์ในก๊าซได้ ด้วยเหตุผลพอสรุปได้คือ

1. ไอออนบวกไม่อาจทำให้เกิดไอออไนเซชันในก๊าซได้อย่างมีประสิทธิผลที่ความเครียดสนามไฟฟ้าเบรคดาวน์ เพราะจะเกิดได้ต้องใช้พลังงานตามทฤษฎีถึงสองเท่า แต่โอกาสเช่นนั้นมีน้อยมาก
2. ถ้ากลไกการไอออไนเซชันตามกระบวนการ β เป็นส่วนที่ทำให้เกิดเบรคดาวน์ โลหะผิวของแคโทดจะไม่มีผลต่อค่าแรงดันเริ่มเกิดเบรคดาวน์ แต่ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเวิร์กฟังก์ชันของโลหะที่ทำแคโทดมีผลอย่างมากต่อค่าแรงดันเบรคดาวน์
3. กลไกการเบรคดาวน์ตามกระบวนการ β ต้องใช้เวลาการเคลื่อนที่ของไอออนข้ามแก๊ปมากกว่าเวลาการเกิดเบรคดาวน์ที่วัดได้

กระบวนการที่สอง ที่เป็นกระบวนการทำให้เกิดเบรคดาวน์จึงเป็นแบบไอออนบวกวิ่งชนแคโทด หรือที่เรียกกว่ากระบวนการ γ

การเพิ่มทวีคูณของจำนวนอิเล็กตรอนโดยอาศัยกระบวนการขั้นต้นและกระบวนการขั้นสองสามารถวิเคราะห์ได้ดังต่อไปนี้

ตามกระบวนการขั้นต้น จำนวนอิเล็กตรอนในอะวาลานช์ในแก๊ปที่ระยะ x จากแคโทด คือ [15]

$$N_x = N_0 e^{\alpha x} \qquad (2.1)$$

เมื่อ N_0 = จำนวนอิเล็กตรอนที่ปล่อยจากแคโทดต่อวินาที

N_x = จำนวนอิเล็กตรอนที่ระยะ x จากแคโทด

ดังนั้น จำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งเข้าหาแอโนด ($x = d$) ต่อวินาที จะเป็น

$$N_d = N_0 e^{\alpha d} \qquad (2.2)$$

อิเล็กตรอนแต่ละตัวที่ออกจากแคโทดจะสร้างอิเล็กตรอนขึ้นใหม่ $e^{\alpha d} - 1$ จะเห็นได้ว่าจำนวนอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นเป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียล แต่ตามลำพังกระบวนการขั้นต้นนี้จะไม่สามารถทำให้เกิดเบรคดาวน์ได้ เพราะถ้าเอาต้นกำเนิดที่สร้างอิเล็กตรอนเริ่มต้น N_0 ออกแล้ว กระบวนการไอออไนเซชันจะหยุดลง ดังนั้นจึงต้องอาศัยกระบวนการที่สองจึงทำให้เกิดเบรคดาวน์

กระบวนการขั้นสองหรือกระบวนการ γ สามารถอธิบายได้ดังนี้

ถ้าให้ N_0 = จำนวนอิเล็กตรอนที่ปล่อยจากแคโทดต่อวินาที

N_0' = จำนวนอิเล็กตรอนที่ปล่อยจากกระบวนการขั้นที่สองต่อวินาทีที่แคโทด คือ $x = 0$

N_0'' = จำนวนอิเล็กตรอนรวมทั้งหมดที่ออกจากแคโทดต่อวินาที

ฉะนั้น
$$N_0'' = N_0 + N_0' \tag{2.3}$$

แต่อิเล็กตรอนแต่ละตัวที่ออกจากแคโทดจะชนไอออไนเซชันเท่ากับ $e^{\alpha d} - 1$ ครั้ง จำนวนครั้งของการชนไอออไนเซชันในแก๊ปทั้งหมดจะเป็น

$$N_0' = N_0''(e^{\alpha d} - 1) \tag{2.4}$$

จะมีอิเล็กตรอนเกิดขึ้นจากกระบวนการขั้นสองออกจากแคโทดเป็น

$$N_0' = \gamma N_0''(e^{\alpha d} - 1) \tag{2.5}$$

เมื่อ γ เป็นสัมประสิทธิ์ไอออไนเซชันที่สองของทาวน์เซนด์

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

$$N_0'' = \frac{N_0}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \tag{2.6}$$

จำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งไปถึงแอโนดจึงเป็น

$$N_d = N_0'' e^{\alpha d} \qquad (2.7)$$

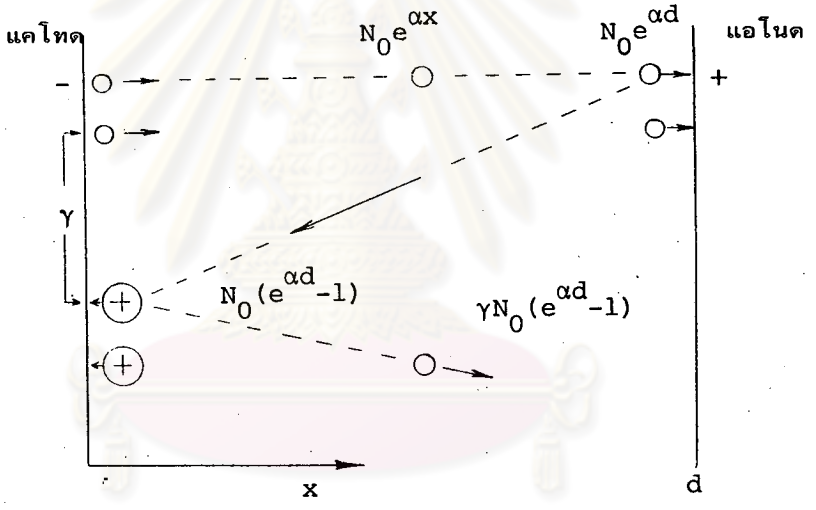
$$N_d = \frac{N_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)}$$

จะได้สมการของกระแสเป็น

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

$$\therefore \quad I = \frac{I_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \qquad (2.8)$$

รายละเอียดดังปรากฏในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงการสร้างอิเล็กตรอนอิสระโดยกระบวนการ γ

ฉะนั้นเงื่อนไขการเกิดเบรคดาวน์ของทาวน์เซนด์เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (2.8) นั่นก็คือ

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

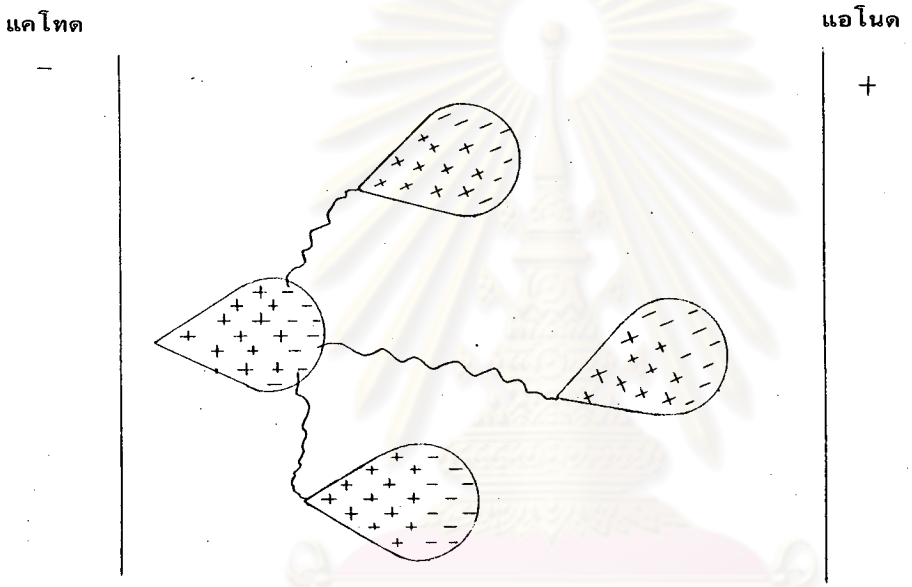
หรือ $$\gamma e^{\alpha d} = 1 \qquad (2.9)$$

2.2 ทฤษฎีสตรีมเมอร์ (Streamer theory)

เนื่องจากกลไกเบรคดาวน์ตามทฤษฎีของทาวน์เซนด์ไม่สามารถอธิบายการเกิดเบรคดาวน์ได้ทุกกรณี เช่น การเกิดเบรคดาวน์ในช่องแก๊ปกว้าง ๆ ในบรรยากาศของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าที่เกิดเบรคดาวน์ในช่วงหน้าคลื่น เวลาคลื่นตัด (Chopped time T_c) น้อยกว่า 0.1 ไมโครวินาที เป็นเวลาที่น้อยเกินไปที่ไอออนบวกจะสามารถเคลื่อนที่ไปถึงแคโทดเพื่อสร้างอิเล็กตรอนอิสระได้ เมื่อคำนวณเวลาตามกระบวนของทาวน์เซนด์ที่ใช้สร้างอะวาลานช์ของอิเล็กตรอนโดยการชน แตกตัวแล้วปล่อยอิเล็กตรอนออกจากแคโทดจะพบว่ามากกว่าเวลาคลื่นตัดที่วัดได้จากการทดลอง หรือแม้แต่คิดเวลาที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่โดยตรงจากแคโทดข้ามช่องแก๊ปไปยังแอโนดโดยไม่ชนกับโมเลกุลเลย ก็ใช้เวลานานกว่าเวลาคลื่นตัดที่ทดลองได้ อีกประการหนึ่งทฤษฎีของทาวน์เซนด์ไม่สามารถอธิบายผลของประจุค้าง (Space charge) ที่อยู่เบื้องหลังของอิเล็กตรอนอะวาลานช์ก่อน ๆ กลุ่มไอออนเหล่านี้ทำให้สนามไฟฟ้าเดิมบิดเบือนไปในทางที่มีความเครียดสูงขึ้น และอาจทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานมากพอที่จะเกิดไอออไนเซชันขึ้นได้ เช่น ในสนามไฟฟ้าที่มีความไม่สม่ำเสมอสูง

Meek และ Loeb ได้เสนอทฤษฎีสตรีมเมอร์บวกในปี 1940 [15] และในเวลาเดียวกัน Rather ก็เสนอทฤษฎีสตรีมเมอร์ลบ [16] เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ซึ่งทฤษฎีของทาวน์เซนด์อธิบายไม่ได้ หลักการของการเกิดเบรคดาวน์ตามทฤษฎีสตรีมเมอร์เป็นผลสืบเนื่องจากกระบวนการวิ่งชนไอออไนเซชัน (กระบวนการ α) ของทาวน์เซนด์ กล่าวคือจะมีการไอออไนเซชันเป็นจำนวนมากจากพลังโฟตอน ซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันใหม่ (Recombination) ระหว่างไอออนบวกกับอิเล็กตรอนแล้วจะปลดปล่อยพลังงานออกมา การเกิดไอออไนเซชันแบบนี้เรียกว่า โฟโตไอออไนเซชัน (Photo - ionization) ของก๊าซโมเลกุลที่ส่วนหน้าของสตรีมเมอร์ กลุ่มประจุค้างของไอออนที่ส่วนหัวของสตรีมเมอร์ทำให้สนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและทำให้เกิดไอออไนเซชันเพิ่มอย่างมาก ไอออนบวกเคลื่อนที่ได้ช้าเกือบจะเรียกว่าอยู่กับที่เมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่วิ่งข้ามช่องแก๊ปไปสู่แอโนด เกิดประจุค้างอิเล็กตรอนเป็นลำระหว่างอิเล็กโทรด ปล่อยให้ไอออนบวกอยู่เบื้องหลังรวมกันเป็นประจุค้าง ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ส่วนหัวและหลังอะวาลานช์เพิ่มสูงขึ้น แต่ในบริเวณระหว่างอิเล็กตรอนกับประจุค้างไอออนความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลง การเพิ่มสูงขึ้นของความเครียดสนามไฟฟ้าตามจุดต่าง ๆ

ทำให้เกิดโฟโตไอออไนเซชันขยายตัวเพิ่มขึ้น เกิดอะวาลานช์ใหม่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ประจุ-ค้างเพิ่มขึ้น ทำให้ความนำไฟฟ้าสูงขึ้นเป็นแนวมีลักษณะเป็นสตรีมเมอร์ระหว่างแอโนดกับแคโทด (ดังรูปที่ 2.2) และเกิดเบรคดาวน์ตามแนวนี้ จึงเรียกกลไกเบรคดาวน์ลักษณะนี้ว่าสตรีมเมอร์-เบรคดาวน์



รูปที่ 2.2 แสดงการเกิดสตรีมเมอร์

เงื่อนไขการเกิดสตรีมเมอร์เบรคดาวน์กำหนดด้วยช่วงต่อของการเปลี่ยนสถานภาพจากอิเล็กตรอนอะวาลานช์ไปสู่สตรีมเมอร์ ซึ่งแบ่งอธิบายออกเป็นสองทางตามทฤษฎีที่เสนอ คือ

1. Meek และ Loeb ได้เสนอเงื่อนไขการเปลี่ยนจากอิเล็กตรอนอะวาลานช์เดี่ยวไปสู่สตรีมเมอร์ว่าจะเกิดขึ้นเมื่อสนามไฟฟ้าเนื่องจากไอออนบวกที่หัวอะวาลานช์มีค่าประมาณเท่า ๆ กับความเครียดสนามไฟฟ้าที่ป้อนจากภายนอก บทพิสูจน์สามารถอ่านได้จากเอกสารอ้างอิงที่ [14, 15]

2. Rather เสนอเงื่อนไขสตรีมเมอร์เบรคดาวน์กำหนดด้วยสนามไฟฟ้าจากประจุค้างเช่นกันโดยไม่เกี่ยวข้องกับ Meek และ Loeb และกำหนดอีกว่าสตรีมเมอร์จะเกิดขึ้นเมื่อ

อะวาลานช์มีจำนวนอิเล็กตรอนหรือไอออนบวกตามกระบวนการชนไอออไนเซชัน $e^{\alpha x}$ ประมาณ 10^8 โดยไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซ หรือความดันก๊าซ หรือระดับความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้า

2.3 ลักษณะสนามไฟฟ้า

สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากอิเล็กโทรดมีลักษณะต่าง ๆ อาจแบ่งออกได้ 2 แบบ คือ

1. สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform field)
2. สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (Nouniform field)

2.3.1 อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอหมายถึง อิเล็กโทรดที่มีสนามไฟฟ้าทุก ๆ จุดในช่องระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากัน (ดังรูปที่ 2.3) ซึ่งในภาคปฏิบัติ ได้จากอิเล็กโทรดที่มีลักษณะโรกอฟสกี (Rogowski profile) [13] ซึ่งคำนวณได้จากความสัมพันธ์

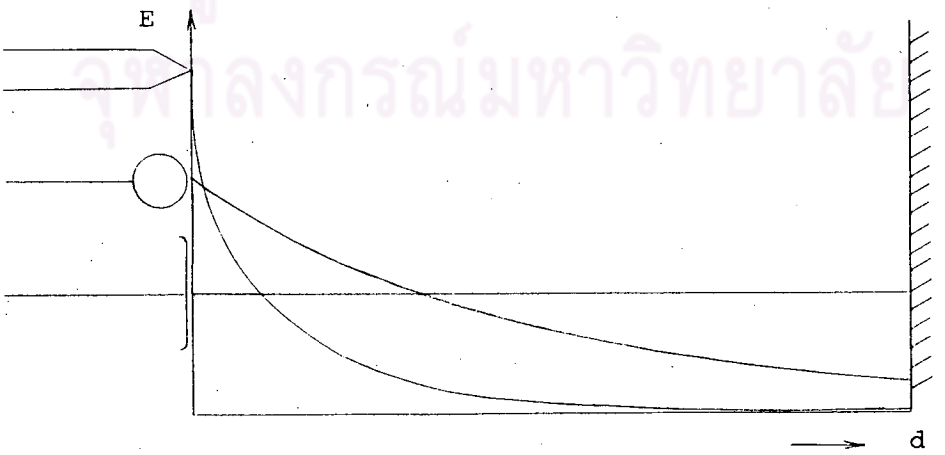
$$E_{max} = E = \frac{U}{d} \qquad (2.10)$$

เมื่อ U คือ แรงดันที่ป้อนเข้าไประหว่างอิเล็กโทรด

d คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด

E คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า ณ จุดใด ๆ ระหว่างอิเล็กโทรด

E_{max} คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด



รูปที่ 2.3 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดลักษณะต่าง ๆ

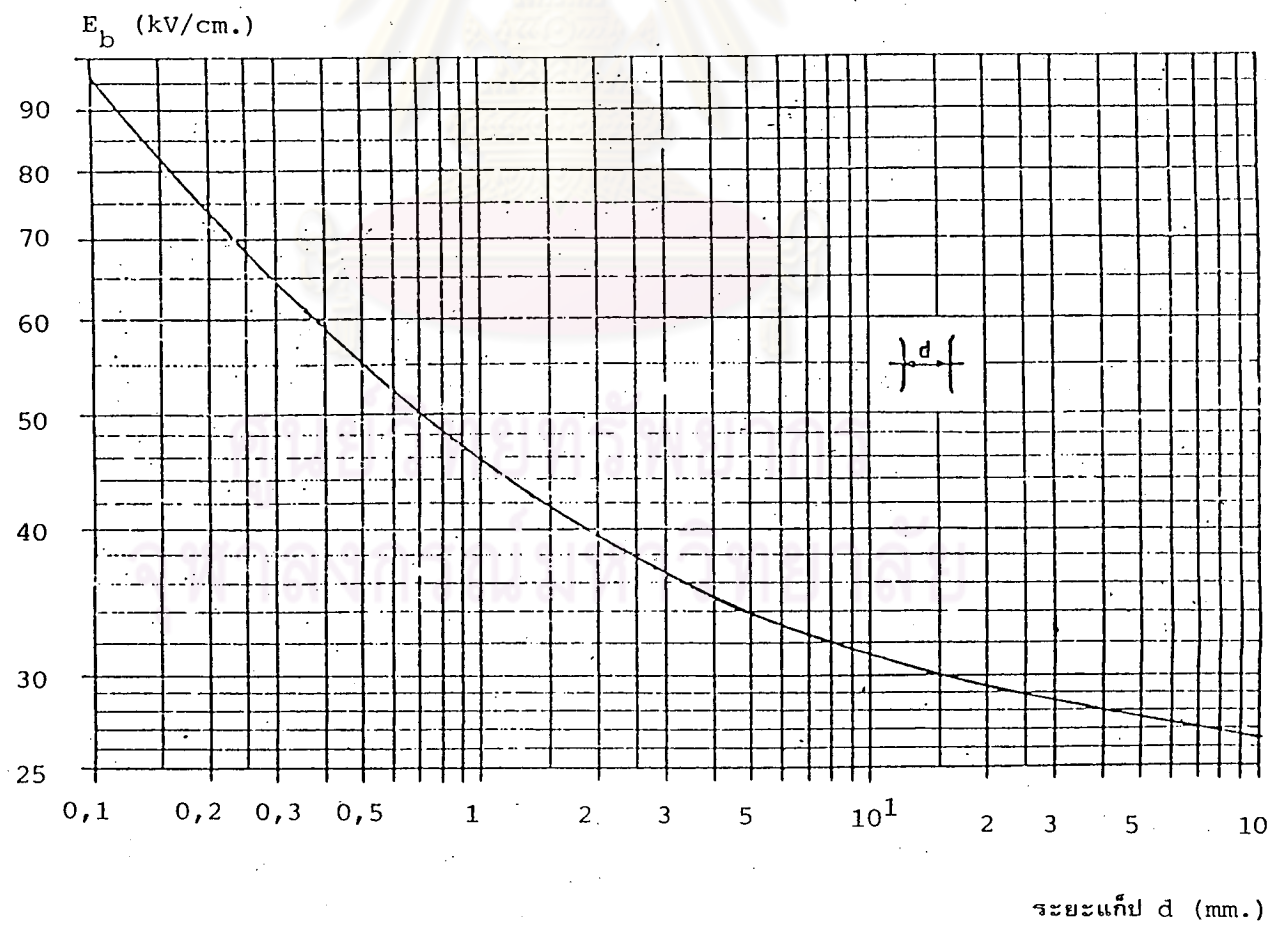
เมื่อป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอเพิ่มขึ้นจะเกิดเบรคดาวน์ทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดยิ่งค่าวิกฤต ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันขณะที่จะเกิดเบรคดาวน์นี้ก็คือ ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

$$E_b = \frac{U_b}{d} \qquad (2.11)$$

เมื่อ U_b คือ แรงดันที่ทำให้เกิดเบรคดาวน์

E_b คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรคดาวน์

กราฟในรูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเบรคดาวน์ของอากาศในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอกับระยะแก็ปที่ได้จากอิเล็กโทรดลักษณะโรกอฟสกีสภาวะมาตรฐาน 760 มม.ปรอท 20 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.4 ความเครียดสนามไฟฟ้าเบรคดาวน์ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

การคำนวณหาค่าแรงดันเบรคดาวน์ของอากาศในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอได้โดยอาศัยเงื่อนไขการเกิดเบรคดาวน์ของทาวน์เซนด์ คือ

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

$$\alpha d = \ln(\frac{1}{\gamma} + 1)$$

$$\alpha d = K$$

หารตลอดด้วย Pd จะได้

$$\frac{\alpha}{P} = \frac{K}{Pd} \qquad (2.12)$$

โดยที่ K คือ จำนวนของอิเล็กตรอนหรือไอออนบวกในอะวาลานช์เมื่อได้เงื่อนไขสตรีมเมอร์มีค่าเท่ากับ 18

และ P คือ ความดันก๊าซ

และอาศัยสมการของชูมันท์ (Schumann's equation) [13] คือ

$$\frac{\alpha}{P} = C[\frac{E}{P} - (\frac{E}{P})_c]^2 \qquad (2.13)$$

แทนค่าสมการ (2.12) ในสมการ (2.13) จะได้

$$\frac{K}{Pd} = C[\frac{E}{P} - (\frac{E}{P})_c]^2$$

หรือ $$\frac{E}{P} = (\frac{E}{P})_c + \sqrt{\frac{K/C}{Pd}} \qquad (2.14)$$

โดยอาศัยสมการที่ (2.11) แทนค่าในสมการที่ (2.14) จะได้

$$U_b = (\frac{E}{P})_c Pd + \sqrt{K/C}\ \sqrt{Pd} \qquad (2.15)$$

Sohst และ Schroeder ได้หาค่า $(\frac{E}{P})_c$ และ K/C [13] เป็น

$$(\frac{E}{P})_c = 24.36 \quad kV/cm.$$

$$\frac{K}{C} = 45.16 \quad (kV)^2/cm.$$

โดยที่ $(\frac{E}{P})_c$ คือ ค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตต่อความดัน[1]

และ C คือ ค่าคงตัวของก๊าซ

ดังนั้นสมการที่ (2.15) จะเขียนได้ คือ

$$U_b = 24.36\ Pd + 6.72\ \sqrt{Pd} \qquad (2.16)$$

2.3.2 <u>อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ</u>

อิเล็กโทรดชนิดนี้แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ อิเล็กโทรดที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly nonuniform field) อีกชนิดหนึ่ง คือ สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (Highly nonuniform field)

กรณีอิเล็กโทรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย คือ กรณีที่ไม่มีโคโรนาเกิดก่อนเบรคดาวน์ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะคำนวณได้ ดังนี้

$$E_{max} = \frac{U}{d}\eta^* \qquad (2.17)$$

เมื่อ η^* คือ แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (Field utilization factor) [13]

$$\eta^* = \frac{E_{ave.}}{E_{max.}} \leq 1$$

โดยที่ $E_{ave.}$ คือ ค่าเฉลี่ยของสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ U/d

และ $E_{max.}$ คือ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดของอิเล็กโทรดนั้น ขณะที่ป้อนแรงดันเท่าเดิม

โดยอาศัยแฟกเตอร์สนามไฟฟ้านี้ทำให้เราคำนวณค่าความเครียดเบรคดาวน์ของสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยได้ คือ

$$E_b = \frac{U_b}{d\eta^*} \qquad (2.18)$$

กรณีอิเล็กโทรดที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะอยู่ในบริเวณที่อิเล็กโทรดมีพื้นที่ผิวน้อยที่สุด เมื่อระยะห่างออกไปจากผิวอิเล็กโทรด ค่าความเครียด

---

(1) สนามไฟฟ้าวิกฤตต่อความดันหรือความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤต หมายถึง ค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของก๊าซ

สนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็ว (ดังรูปที่ 2.3) อิเล็กโทรดแบบนี้ถึงแม้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าถึงค่าวิกฤตแล้วก็ตาม จะไม่เกิดเบรคดาวน์เนื่องจากพลังงานที่ได้จากสนามไฟฟ้าไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดไอออนไนเซชัน แต่จะเกิดโคโรนาบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ส่วนบริเวณอื่น ๆ ยังมีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำจะไม่เกิดโคโรนา ฉะนั้นช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดจะเกิดดิสชาร์จที่ไม่สมบูรณ์ ทำให้มีกระแสไหลในวงจรเรียกว่ากระแสโคโรนา (Corona current) การเกิดโคโรนาทำให้ลักษณะของสนามไฟฟ้าเปลี่ยนไป เพราะมีประจุค้างเกิดขึ้น การคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าจึงหาได้ที่แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดเท่านั้น เพราะขณะนั้นยังไม่มีผลของประจุค้างซึ่งทำให้ลักษณะของสนามไฟฟ้าเปลี่ยนไป ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มเกิดหาได้ดังนี้คือ

$$E_i = \frac{U_i}{d\eta^*} \qquad (2.19)$$

เมื่อ E_i คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่โคโรนาเริ่มเกิด

U_i คือ แรงดันป้อนที่โคโรนาเริ่มเกิด

ดังนั้น ค่าแรงดันเริ่มต้น (Starting voltage)[1] อาจเขียนในสมการทั่วไป คือ

$$U_i = E_i d\eta^* \qquad (2.20)$$

เมื่อ U_i คือ แรงดันเริ่มต้น

E_i คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันเริ่มต้น U_i

ในกรณีอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอหรือสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ค่า U_i คือ U_b และ E_i คือ E_b ถ้าเป็นอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง เราจะพบว่าค่าแรงดันเบรคดาวน์จะสูงกว่าค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด ($U_b > U_i$) [17] ซึ่งค่าแรงดันเบรคดาวน์นี้ไม่อาจจะคำนวณได้ง่าย ๆ ทั้งนี้เพราะไม่ทราบถึงการกระจายของประจุค้างว่าเป็นอย่างไร จะคำนวณได้แต่ค่าแรงดันเริ่มต้นเท่านั้น

---

(1) Starting voltage, threshold voltage, inception voltage หมายถึง แรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงในช่องระหว่างอิเล็กโทรด อาจจะเป็นเบรคดาวน์ (ในกรณีอิเล็กโทรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย) หรือเป็นแรงดันที่โคโรนาเริ่มเกิด (ในกรณีที่อิเล็กโทรดเป็นสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ค่าแรงดันเบรคดาวน์จะมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเริ่มต้น)

013207

2.4 วิธีการคำนวณแรงดันเริ่มต้นในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

แรงดันเริ่มต้นในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมออาจคำนวณได้โดยใช้ทฤษฎีสตรีมเมอร์ ตามที่ Rather ได้เสนอเงื่อนไขไว้ดังที่กล่าวข้างต้น อะวาลานช์ของอิเล็กตรอนหาได้จากการอินทิเกรต $\int \alpha dx$ ซึ่งขอบเขตของการอินทิเกรตจะเท่ากับความยาวของอะวาลานช์วิกฤต x_c [1] นั่นคือ

$$\int_0^{x_c} \alpha \, dx = \ln N_c = K \qquad (2.21)$$

เมื่อ α คือ สัมประสิทธิ์การไอออไนเซชันที่ 1 ของทาวน์เซนด์ [15]

N_c คือ จำนวนอิเล็กตรอนวิกฤตเท่ากับ 10^8 [16]

เนื่องจาก α ขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้า $E(x)$ และความดันก๊าซ P นั่นคือ

$$\frac{\alpha}{P} = F\left(\frac{E}{P}\right)$$

ก๊าซแต่ละชนิดจะมีฟังก์ชันต่างกัน ในกรณีของอากาศและก๊าซซันเฟอร์เฮกซาฟลูออไรด์ (SF_6) [17] จะเขียนฟังก์ชัน $\frac{\alpha}{P}$ แบบทั่วไปได้ว่า [14]

$$\frac{\alpha}{P} = C\left[\frac{E(x)}{P} - \left(\frac{E}{P}\right)_c\right]^n \qquad (2.22)$$

เมื่อ C เป็น ค่าคงตัวของก๊าซ

$\left(\frac{E}{P}\right)_c$ เป็น ค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตต่อความดัน

n เป็น เลขยกกำลังขึ้นกับชนิดของก๊าซ

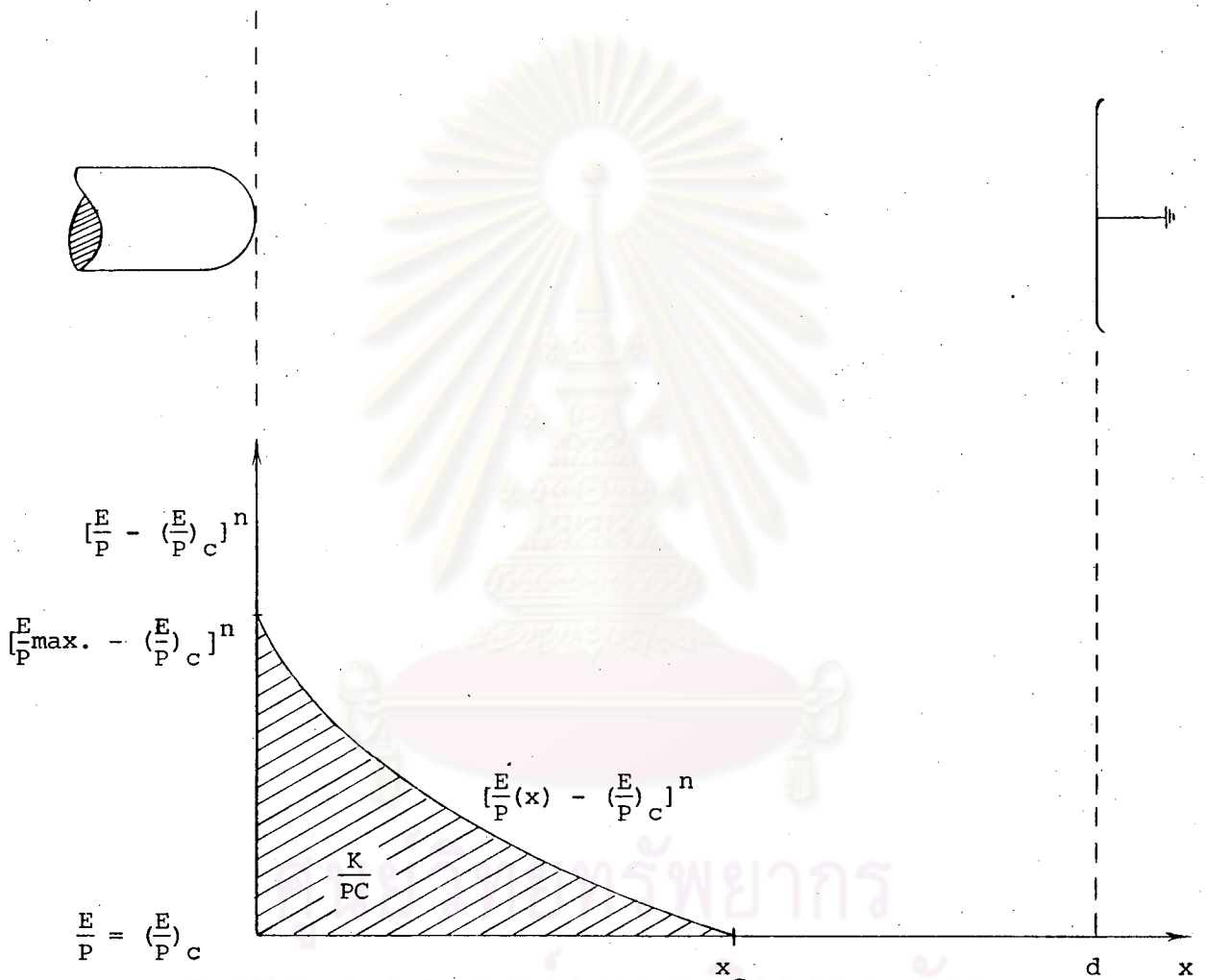
จากสมการ (2.22) แทนค่า $\frac{\alpha}{P}$ ลงในสมการที่ (2.21) จะเขียนสมการได้ดังนี้

$$\int_0^{x_c} \left[\frac{E(x)}{P} - \left(\frac{E}{P}\right)_c\right]^n dx = \frac{K}{PC} \qquad (2.23)$$

---

(1) อะวาลานช์วิกฤต x_c หมายถึง ความยาวของอะวาลานช์ที่มีจำนวนของอิเล็กตรอนหรือไอออนบวกเมื่อได้เงื่อนไขสตรีมเมอร์

จากสมการ (2.23) ถ้าแสดงเป็นรูปกราฟก็จะได้ดังในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงเงื่อนไขของสตรีมเมอร์เบรคดาวน์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากสมการ (2.23) นี้จะสามารถคำนวณหาค่าแรงดันเริ่มต้นหรือแรงดันเบรคดาวน์โดยตรงได้ ถ้าหากทราบค่าการกระจายของความเครียดสนามไฟฟ้าต่อความดัน ในกรณีของอิเล็กโทรดทรงเรขาคณิตง่าย ๆ เช่น ทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม หรือทรงกลมซ้อนศูนย์กลางร่วม จะมีสมการการกระจายของความเครียดสนามไฟฟ้าต่อความดันในรูปสมการคณิตศาสตร์วิเคราะห์ ทำให้สามารถคำนวณได้ด้วยวิธีคณิตศาสตร์วิเคราะห์ ในกรณีของอิเล็กโทรดแท่งกลมปลายมนกับระนาบไม่อาจเขียนสนามไฟฟ้ากระจายในแก๊ปด้วยคณิตศาสตร์วิเคราะห์ได้ต้องหาสนามไฟฟ้าด้วยวิธีอื่น ซึ่งในที่นี้จะใช้วิธีจำลองแบบประจุในการหาสนามไฟฟ้ากระจายในแก๊ปของอิเล็กโทรดดังกล่าว ดังจะได้กล่าวถึงรายละเอียดต่อไปในบทที่ 3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย