

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐาน

ความเข้าใจในเรื่องกระจายของสนามไฟฟ้าแรงสูงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการออกแบบและหาสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้นระบบพลาสมาความดันบรรยากาศ โดยทั่วไปแล้วการกระจายของสนามไฟฟ้าแต่ละรูปแบบขึ้นอยู่กับรูปร่าง ลักษณะของอิเล็กโทรดและไดอิเล็กตริกที่รองรับ มีการพัฒนากระบวนการผลิตไดอิเล็กตริก เพื่อรองรับการใช้งานกับระบบไฟฟ้าแรงสูงเป็นอย่างมาก การผลิตไดอิเล็กตริกแรงดันสูงด้วยสารที่มีคุณสมบัติทางด้านทานไฟฟ้าแรงสูงได้ดี ไม่เกิดการเจาะ ทะลุของไฟฟ้า ส่วนใหญ่นิยมใช้เซรามิกส์ที่มีส่วนผสมของ อะลูมินา(Alumina) (ไพจิตร อังศิริวัฒน์, 2547) งานวิจัยนี้ได้เลือกแผ่นอะลูมินาเพื่อศึกษาการปล่อยประจุที่ผิว (surface discharge) ของอิเล็กโทรด ทำการทดลองเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ใช้โปรแกรม Maxwell SV คำนวณหารูปแบบการกระจายของสนามไฟฟ้าของรูปทรงอิเล็กโทรดแบบต่าง ๆ

2.1 แร่อะลูมินาและอะลูมินาเซรามิก

อะลูมินา มีชื่อทางเคมีคือ Aluminum Oxide มีสูตรทางเคมีเป็น Al_2O_3 อะลูมินาบริสุทธิ์ในธรรมชาติจัดเป็นแร่ธาตุที่พบในรูปของ Corundum (Al_2O_3) diaspore($Al_2O_3 \cdot H_2O$) gibbsite ($Al_2O_3 \cdot 3H_2O$) และ bauxite($Al_2O_3 \cdot H_2O$) โดยแร่ Corundum ที่พบจะเป็นรัตนชาติเช่น ทับทิม (ruby) ไพฑลิน(sapphire) นุษราคัม(yellow sapphire) เป็นรูปแบบของ Corundum ที่มีมลทิน ในขณะที่ Corundum ที่ไม่มีมลทินจะไม่มีสี สามารถสกัดอะลูมินาบริสุทธิ์ได้จากแร่ bauxite และดินลูกรัง โดยวิธีของ Bayer (Bayer process) คือนำแร่มาบดแล้วหลอมด้วยโซดาไฟ (Causticsoda) จากนั้นแยกตะกอนที่ได้ออกมาแล้วเผา อะลูมินาพบได้ใน 3 รูปแบบ คือ แอลฟา (α) แกมมา (γ) และเบต้า (β) โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของแอลฟาและแกมมา ในช่วงอุณหภูมิไม่เกิน 500 องศาเซลเซียสอะลูมินาจะอยู่ในรูปแกมมา ถ้าหากนำไปเผาให้อุณหภูมิสูงถึง 1,150 - 1,200 องศาเซลเซียสจะเปลี่ยนอยู่ในรูปของแอลฟา ส่วนเบต้าอะลูมินาจะอยู่ในรูปของสารประกอบไฮเดรียมคือ Sodium Aluminate($Na_2O \cdot 11Al_2O_3$) (ไพจิตร อังศิริวัฒน์, 2547)

ปัจจุบันมีการเตรียมวัตถุดิบอะลูมินาโดยวิธีสังเคราะห์ให้มีความสูงถึง 99.5% โดยมีแร่เหล็กเจือปนอยู่ในอัตราส่วนต่ำมากประมาณ 0.03% วัตถุดิบอะลูมินาสังเคราะห์แบ่งได้ 3 ประเภท คือ

- คัลไซน์อะลูมินา(Calcined alumina) ใช้ทำผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความแข็งแรงสูงทนต่อการกัดกร่อน

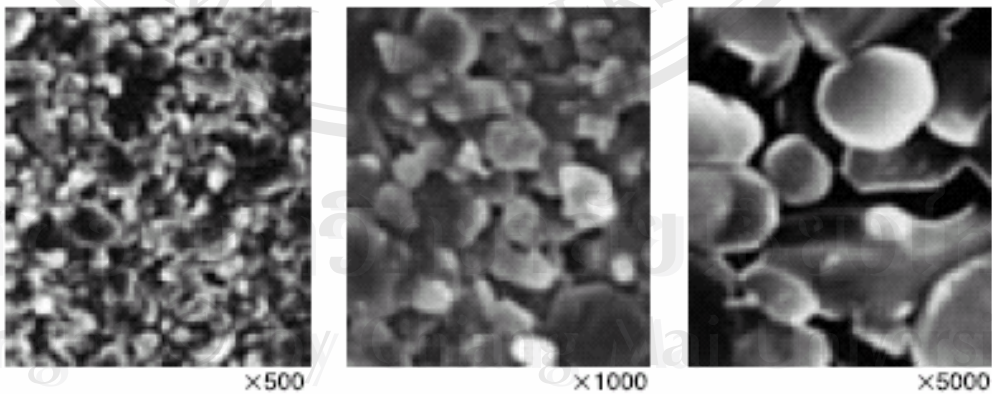
- อะลูมินาที่มีโซเดียมต่ำ(Low-soda alumina) ใช้ทำผลิตภัณฑ์ทางไฟฟ้าซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวน

- แทบรูลาอะลูมินา(Tabular alumina) ใช้ทำวัตถุดิบไฟและวัตถุดิบต่อการกัดกร่อน

โดยทั่วไป อะลูมินามีสมบัติทางกายภาพดังนี้ (กุลจิรา สุจิโรจน์, 2545)

- ความถ่วงจำเพาะ	4.1 - 3.9
- ความแข็ง	9 โมห์สเกล
- จุดหลอมละลาย	2,050 องศาเซลเซียส
- จุดสุกตัว	1,600-1,900 องศาเซลเซียส

ในอุตสาหกรรมเซรามิกสมัยใหม่ สามารถนำอะลูมินาที่ได้จากการสังเคราะห์มาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ทางไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ตลอดจน อุปกรณ์กึ่งตัวนำไฟฟ้า อุปกรณ์ฉนวนไฟฟ้า (ตารางที่ 2.1) ทั้งนี้ผงอะลูมินาที่นำมาใช้ ต้องมีความบริสุทธิ์สูงและมีความละเอียดมากเพราะสมบัติทางฟิสิกส์และเชิงกลของอะลูมินาสามารถเพิ่มขึ้นได้โดยการกำจัดมลทินต่างๆออกไป เช่น ซิลิกาที่ปนเปื้อนจะมีผลต่อจุลโครงสร้าง (Microstructure) มีผลต่ออัตราการสึกกร่อน ของอะลูมินา รวมทั้งมีผลต่อการเผาอบผนึก (Sintering) (รูปที่ 2.1) และแคลเซียมที่ปนเปื้อนก็มีผลทำให้สมบัติเชิงกลของอะลูมินาลดลง



รูปที่ 2.1 ภาพถ่ายอะลูมินาด้วยกล้อง Electron Microcope ที่กำลังขยายต่างกัน (Maruwa, 2004)

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของอะลูมินาเซรามิก(ไพจิตร อิงศิริวัฒน์, 2547)

ความบริสุทธิ์อะลูมินา (%)	85	95	96	99.5	99.9
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก(ϵ_r) ที่ 1MHz	8.2	8.8	9.0-9.3	9.7	10.1-9.8
ค่าสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan \delta / 10^{-4}$) ที่ 1 MHz	9	4	1-3	3	0.4 - 2
สภาพต้านทาน (Resistivity) (Ωm) ที่ 300 °C	4.6×10^8	1.4×10^9	3.1×10^9	2.0×10^9	1.0×10^{13}
สภาพนำความร้อน (Thermal conductivity) ($Wm^{-1} K^{-1}$) ที่ 20 °C	14	16	24 - 35	35	40

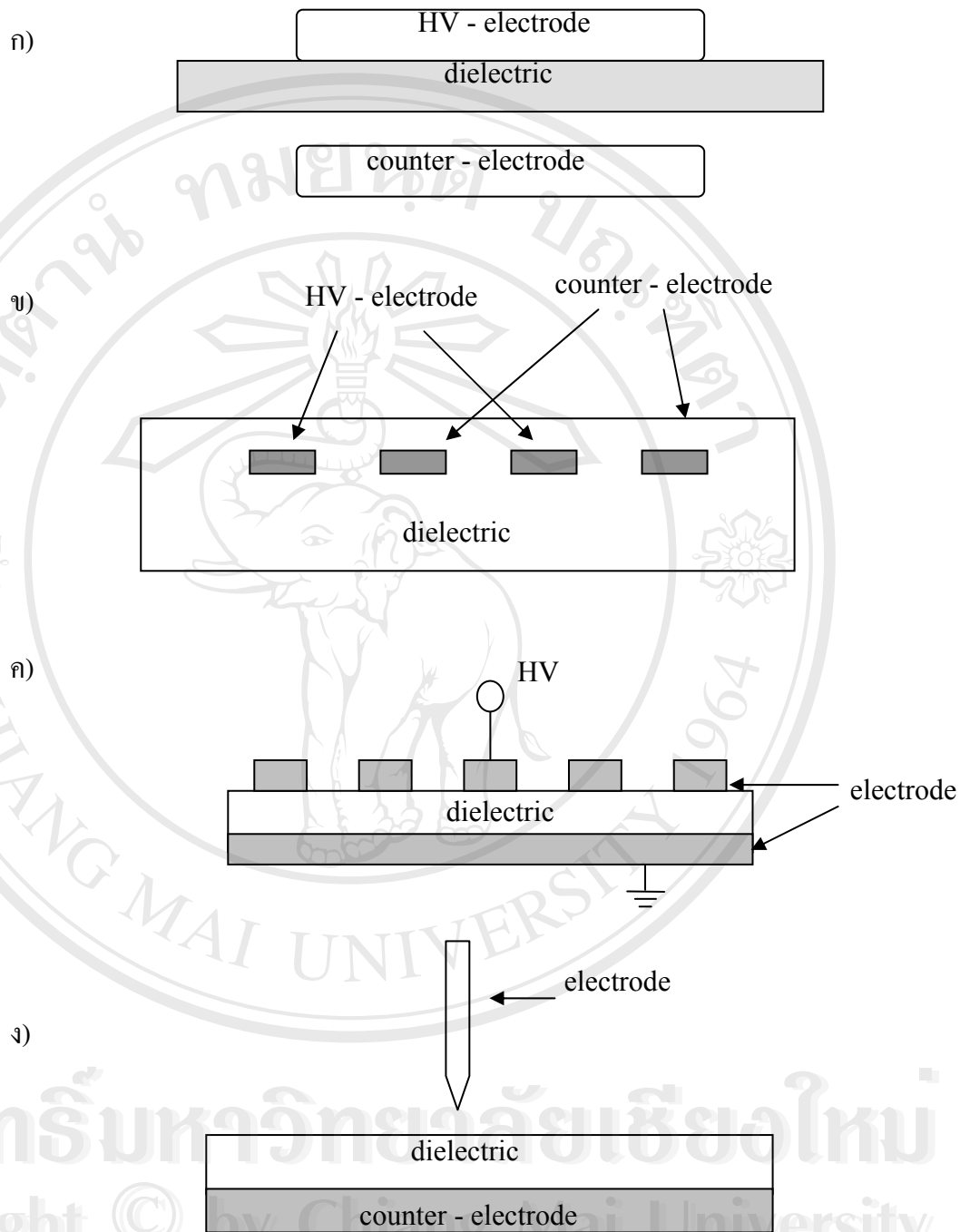
2.2 การกระจายของสนามไฟฟ้า และความคงทนต่อการเบรคความถี่ของไดอิเล็กตริก

ระบบผลิตพลาสมาความดันบรรยากาศเป็นระบบที่มีการปล่อยประจุแบบต่าง ๆ ได้แก่ corona, glow, hollow cathode, surface, coplanar และ dielectric barrier ซึ่งต่างมีจุดเด่น จุดด้อยต่างกันไป (Roth, 2001) ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ระบบผลิตพลาสมาแบบ coplanar discharge และแบบ surface discharge เนื่องจากมีศักยภาพที่จะประยุกต์กับงานในระดับอุตสาหกรรมได้ เป็นระบบไม่ซับซ้อนมาก ใช้แผ่นอะลูมินา เป็น ไดอิเล็กตริกแรงสูง

การศึกษาเกี่ยวกับสมบัติทางไฟฟ้าและกลไกการเบรคความถี่ในไดอิเล็กตริกมีความสำคัญมากในการสร้างระบบพลาสมาความดันบรรยากาศ ดังรายละเอียดที่กล่าวในหัวข้อต่อไป

2.2.1 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า

ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า หมายถึง ความเครียดสนามไฟฟ้า(Electric field stress) สูงสุดที่ไดอิเล็กตริกนั้นสามารถทนอยู่ได้ โดยไม่เกิดความเสียหายหรือเกิดการเบรคความถี่ มีหน่วยเป็น V/cm หรือ kV/cm คือ มีหน่วยเป็นแรงดันต่อหน่วยความหนาของไดอิเล็กตริกหรือระยะห่างของอิเล็กโทรด ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กตริกขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ลักษณะรูปร่างของอิเล็กโทรด สมบัติของไดอิเล็กตริกและเวลาที่จ่ายแรงดัน ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ใช้กำหนดค่าความคงทนต่อแรงดัน โดยคำนวณจากสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ(uniform electric field) ซึ่งขึ้นอยู่กับการจัดวางอิเล็กโทรด (รูปที่ 2.3)



รูปที่ 2.2 การจัดวางอิเล็กโทรดที่ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ (กิริติ ชยะกุลศิริ, 2538)

ก) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

ข) สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย

ค) สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมออย่างมาก

ถ้าป้อนแรงดันให้กับอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ที่วางอยู่ในอากาศดังรูปข้างต้น จากข้อมูลงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ไม่เท่ากัน ถึงแม้ว่าจะจัดระยะห่างของอิเล็กทรอนิกส์เท่ากันก็ตาม ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ของ ไดอิเล็กทรอนิกส์แต่ละชนิดจะมีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ามิใช่ค่าคงที่ค่าใดค่าหนึ่ง ส่วนใหญ่เป็นค่าสถิติ หรือค่าโดยประมาณนิยมกำหนดหรือระบุด้วยค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้น ณ จุดใดจุดหนึ่งระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ ในขณะที่เบรกดาวน์เริ่มเกิดขึ้น

การวิเคราะห์และคำนวณหาจุดวิกฤตของไดอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นก๊าซและของแข็งต้องพิจารณาถึงความสัมพันธ์เกี่ยวกับไฟฟ้าสถิต การกระจายของสนามไฟฟ้า ค่าความคงทนของไดอิเล็กทรอนิกส์ และรูปร่าง ลักษณะของอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น

2.2.2 อิเล็กทรอนิกส์สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

อิเล็กทรอนิกส์สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หมายถึง อิเล็กทรอนิกส์ที่มีสนามไฟฟ้าทุกๆ จุดในช่องระหว่างอิเล็กทรอนิกส์เท่ากัน คำนวณค่าสนามไฟฟ้าได้จากสมการ (ตำรวจ สังข์สะอาด, 2528)

$$E_b = \frac{U}{d} \quad (2.1)$$

เมื่อ U คือ แรงดันที่ป้อนเข้าไประหว่างอิเล็กทรอนิกส์
 d คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กทรอนิกส์
 E_b คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด

เมื่อป้อนแรงดันให้กับอิเล็กทรอนิกส์สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ จนเกิดเบรกดาวน์และกระแสเพิ่มขึ้นอย่างมากในทันทีทันใด และค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันขณะจะเกิดเบรกดาวน์นี้ เรียกว่า ค่าความคงทนทางไฟฟ้า (E_b) นั่นเอง อย่างไรก็ตามค่าความคงทนต่อแรงไฟฟ้าของไดอิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่งก็มีค่าไม่คงตัวเสมอไปเพราะขึ้นอยู่กับ ความหนาหรือระยะห่างระหว่างอิเล็กทรอนิกส์

2.2.3 อิเล็กทรอนิกส์สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

อิเล็กทรอนิกส์สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้น ความแตกต่างกันที่จุดต่างๆ จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของอิเล็กทรอนิกส์ที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากหรือน้อย ถ้าเขียนเส้นสนามไฟฟ้าและเส้น

สมสัคย์ ดังรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด เกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโทรดทรงกลม อาจคำนวณได้จากสมการ (สำรวจ สังข์สะอาด, 2528)

$$E_{max} = \frac{U}{d\eta^*} \quad (2.2)$$

เมื่อ η^* คือ แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (Field utilization factor) มีค่านิยามว่า

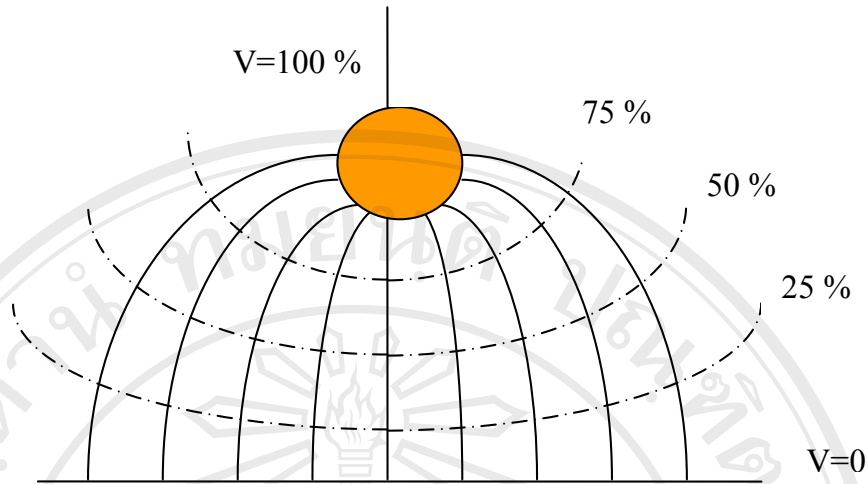
$$\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{max}} \leq 1 \quad (2.3)$$

โดยที่ E_{av} คือ เฉลี่ยของสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ $\frac{U}{d}$

จึงอาจกล่าวได้ว่า η^* ก็คือ दरชนีบอกให้ทราบว่าอิเล็กโทรดนั้น มีลักษณะสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากน้อยเพียงใด และโดยอาศัยแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า ในการคำนวณหาความเครียดเบรกดาวน์ของไดอิเล็กตริกในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอได้คือ

$$E_b = \frac{U_b}{d.\eta^*} \quad (2.4)$$

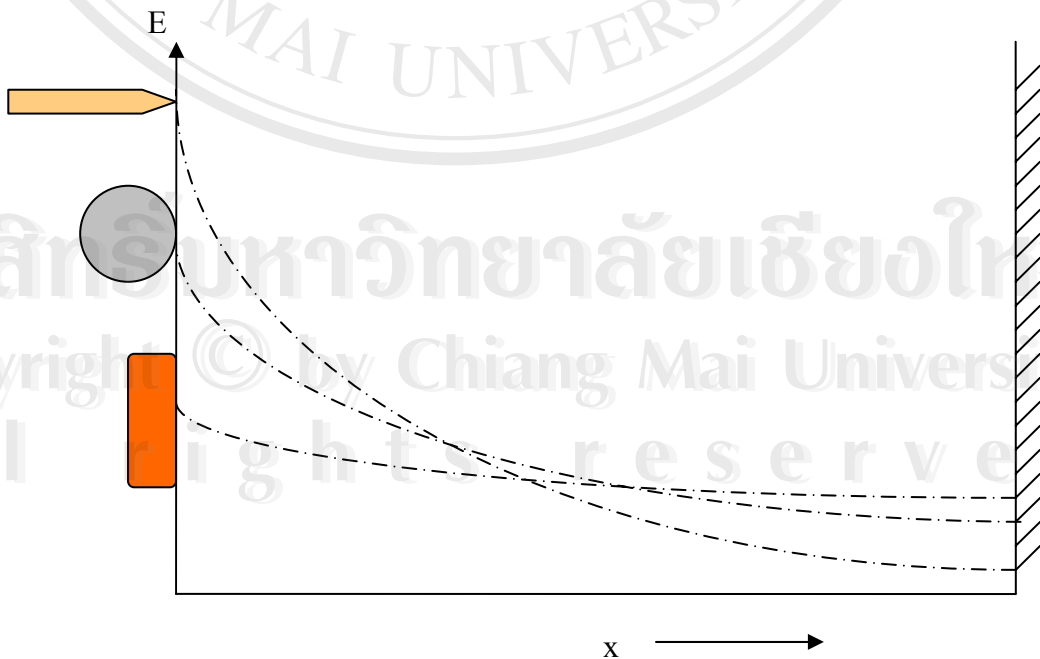
สมการนี้ใช้ได้เฉพาะกรณีทีอิเล็กโทรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย หรือใช้กับกรณีที่ไม่มีความเครียดหรือเกิดก่อนเบรกดาวน์ กล่าวคือก่อนเกิดเบรกดาวน์จะไม่ปรากฏว่ามีกระแสไฟไหลระหว่างอิเล็กโทรด และลักษณะสนามไฟฟ้าจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง จะเกิดเบรกดาวน์ทันที ที่ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงถึงค่าหนึ่ง คือ ค่าสนามไฟฟ้าวิกฤติ (E_b)



รูปที่ 2.3 สนามไฟฟ้าและเส้นสมศักย์

— สนามไฟฟ้า
 - - - - - เส้นสมศักย์

ในกรณีที้อิเล็กโตรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมออย่างมาก ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงจะอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับผิวอิเล็กโตรดที่มีพื้นผิวที่น้อยสุด จากรูปที่ 2.4 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าจากอิเล็กโตรดรูปร่างต่างๆ จะเห็นว่า สำหรับอิเล็กโตรดแบบมีปลายแหลม เมื่อระยะห่างออกไปจากผิวอิเล็กโตรดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็วอิเล็กโตรดแบบนี้ถึงแม้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าถึงค่าวิกฤตแล้วก็ตาม จะไม่เกิดเบรกดาวน์แต่จะเกิดโคโรนา



รูปที่ 2.4 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดลักษณะต่างๆ (สำรวจ สังข์สะอาด, 2528)

ในบริเวณผิวอิเล็กโทรดคือ บริเวณที่มีความเครียดไฟฟ้าสูงสุด ส่วนบริเวณอื่นๆ ยังมีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำจะไม่เกิดโคโรนา ฉะนั้นในช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดจะเกิดปล่อยประจุไฟฟ้าที่ไม่สมบูรณ์ เรียกว่า การปล่อยประจุไฟฟ้าบางส่วน(Partial discharge) ทำให้มีกระแสไหลในวงจรที่ป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรด กระแสที่เกิดขึ้นและวัดได้ก่อนเกิดเบรกดาวน์ เรียกว่า กระแสโคโรนา (Corona current) การเกิดโคโรนาทำให้แนวของสนามไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลง เพราะมีประจุค้าง ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดยังคำนวณได้ แต่ค่า η^* จะเปลี่ยนไป ดังนั้นค่าความเครียดเบรกดาวน์ของไดอิเล็กตริกจะคำนวณด้วยสมการ $E_b = \frac{U_b}{d\eta^*}$ ไม่ได้ อย่างไรก็ตามสมการนี้อาจใช้คำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดได้ เพราะความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้ายังไม่เปลี่ยนแปลง นั่นคือ

$$E_i = \frac{U_i}{d\eta^*} \quad (2.5)$$

เมื่อ E_i คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าโคโรนาเริ่มเกิด
 U_i คือ แรงดันป้อนที่โคโรนาเริ่มเกิด(Corona inception voltage)
 โดยที่ E_i และ U_i เป็นค่าความเครียดสนามไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่โคโรนาเริ่มเกิด

ในกรณีที่อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอหรือสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ค่า U_i คือ U_b และ E_i คือ E_b ถ้าเป็นอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง $U_b > U_i$ ค่าแรงดันเบรกดาวน์นี้ไม่อาจจะคำนวณได้ง่ายๆ ทั้งนี้เพราะไม่ทราบถึงการกระจายของประจุค้างว่าเป็นอย่างไร ฉะนั้นการคำนวณความทนต่อแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กตริกที่อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง จะกำหนดด้วยค่าแรงดันเริ่มต้น หรือความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มต้น เป็นตัวบอกถึงความทนต่อแรงดันไฟฟ้า อย่างไรก็ตามความทนต่อแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กตริกนี้จะขึ้นอยู่กับรูปร่าง ลักษณะของอิเล็กโทรด เช่น ระยะห่างของอิเล็กโทรด รัศมีความโค้งของอิเล็กโทรด และลักษณะพื้นผิวของอิเล็กโทรด เป็นต้น

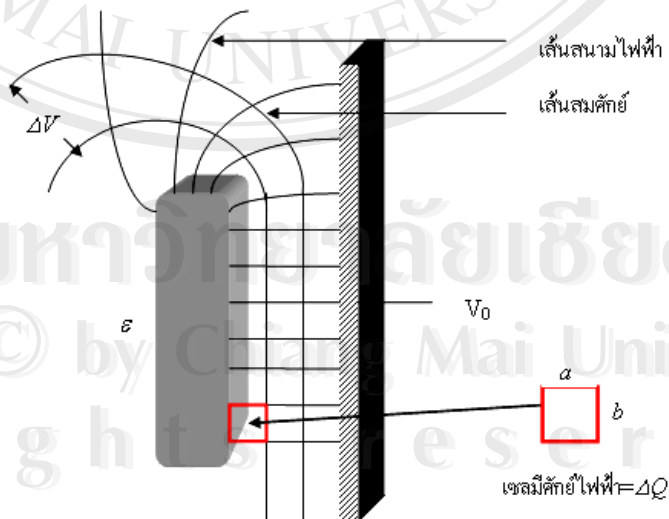
2.2.4 การวิเคราะห์และคำนวณสนามไฟฟ้า

ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปประกอบด้วยสามขั้นตอนด้วยกันคือ ขั้นที่หนึ่ง สร้างแบบจำลองของสนามไฟฟ้า ขั้นที่สอง วิเคราะห์ปัญหาโดยใช้แบบจำลองที่ได้ และ ขั้นที่สาม แปลผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองกลับมาในเทอมของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริง จุดประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า ช่วยลดข้อผิดพลาดในการออกแบบ และสร้างระบบจริง สามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภทคือ (สุรพล คำรงกิตติกุล, 2535)

- ก) วิถีลากเส้นสนามไฟฟ้าหรือโดยใช้สูตรคำนวณ
- ข) แบบจำลองทางวงจรไฟฟ้าและการทดลองวัด
- ค) วิธีคำนวณเชิงตัวเลขและจำลองการเกิดสนามไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

ก) การหาสนามไฟฟ้าโดยวิธีการลากเส้นสนามไฟฟ้า

การหาสนามไฟฟ้าที่ใช้วิธีอย่างง่าย โดยการลากเส้นกระทำได้อย่างประมาณ โดยใช้หลักของทฤษฎีของสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับเส้นสมศักย์(Equipotential line) และให้อิเล็กโตรดเป็นแนวของเส้นสมศักย์เริ่มแรก(รูปที่ 2.5) วิธีนี้สามารถหาค่าของสนามไฟฟ้าได้โดยง่ายแต่เนื่องจากต้องใช้การวัดระยะในรูปแบบเป็นจำนวนมากจึงไม่ละเอียด การลากเส้นสนามไฟฟ้าและเส้นสมศักย์เริ่มจากบริเวณที่คาดคะเนเส้นสนามไฟฟ้าได้เช่น บริเวณที่อิเล็กโตรดวางขนานกัน เส้นสนามไฟฟ้าจะตั้งฉากกับผิวอิเล็กโตรดทั้งคู่ วิธีทำเริ่มจากการเขียนช่องสี่เหลี่ยม เรียกว่า เซลล์ แต่ละส่วนมีความต่างศักย์เป็น ΔV ดังนั้นสนามไฟฟ้าที่จุดใดๆจะเท่ากับ $\frac{\Delta V}{a}$

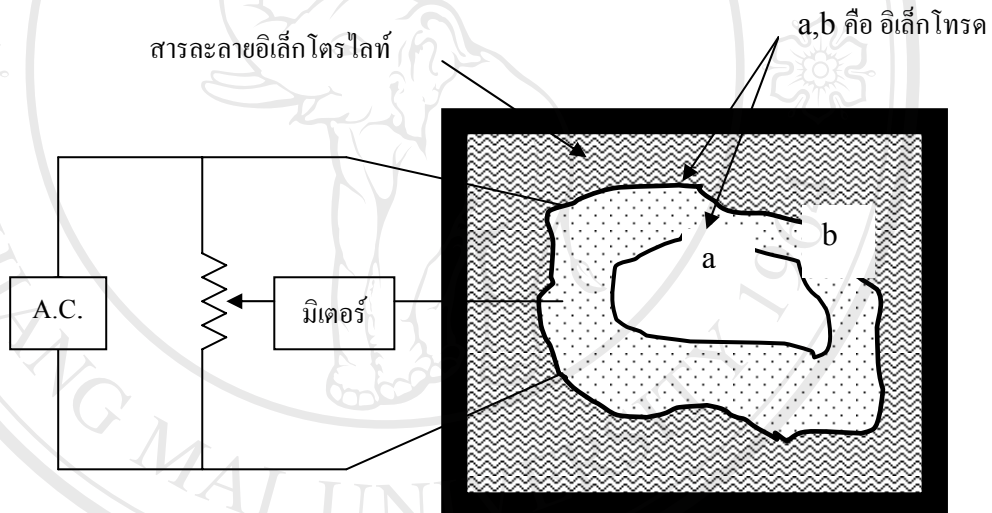


รูปที่ 2.5 การลากเส้นสนามไฟฟ้าและเส้นสมศักย์

ข) แบบจำลองทางวงจรไฟฟ้าและการทดลองวัด

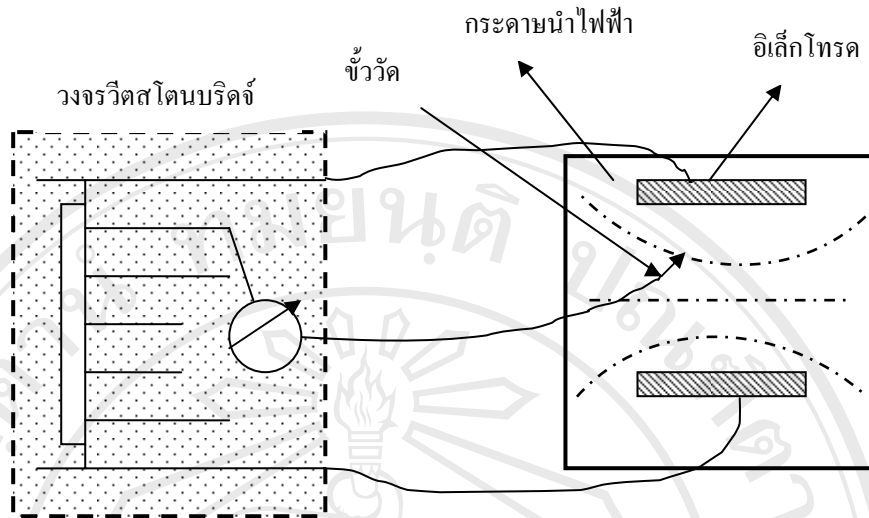
ในการหาค่าสนามไฟฟ้าด้วยวิธีสร้างแบบจำลองขึ้นมาแทนอิเล็กโทรดและไดอิเล็กตริก แล้วทำการทดลองวัดหาเส้นสมศักย์แล้วจึงลากเส้นตั้งฉากเป็นเส้นสนามไฟฟ้า การวัดค่าแรงดันที่จุดต่างๆ โมเดลที่นำมาใช้โดยทั่วไป 2 แบบได้แก่ แบบแท็งค์อิเล็กโทรไลต์ (electrolytic tank) และ แบบแผ่นนำไฟฟ้า (Conducting paper)

แบบแท็งค์อิเล็กโทรไลต์ (รูปที่ 2.6) เป็นวิธีสร้างแบบจำลองของอิเล็กโทรดและใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ เช่น น้ำ หรือน้ำมัน แทนไดอิเล็กตริกแท็งค์ต้องใหญ่พอที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสนามไฟฟ้าและควรใช้แท็งค์ที่เป็นไม่นำไฟฟ้า แรงดันที่ใช้ควรเป็นแรงดันกระแสสลับไม่เกิน 50 โวลต์ และขนาดกำลังประมาณ 10 วัตต์ เพื่อความปลอดภัยในการวัดค่าแรงดันที่จุดต่างๆ ซึ่งอาจใช้วงจรวัดสโตนบริดจ์ (สุรพล ดำรงกิตติกุล, 2535)



รูปที่ 2.6 แบบจำลองการเกิดสนามไฟฟ้าแบบแท็งค์อิเล็กโทรไลต์

แบบจำลองแบบแผ่นนำไฟฟ้า อาจเลือกใช้แผ่นกระดาษนำไฟฟ้าแทนไดอิเล็กตริกและติดอิเล็กโทรดจำลองขึ้น (รูปที่ 2.7) วิธีการวาดเส้นสนามไฟฟ้าใช้หลักการวัดเพื่อหาเส้นสมศักย์ก่อน เช่นเดียวกับแบบแท็งค์อิเล็กโทรไลต์ กระดาษที่นิยมใช้ได้แก่ กระดาษแกรไฟต์



รูปที่ 2.7 แบบจำลองการเกิดสนามไฟฟ้าแบบแผ่นนำไฟฟ้า

ค) วิธีคำนวณเชิงตัวเลขและจำลองการเกิดสนามไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

ปัจจุบันคอมพิวเตอร์ได้เข้ามามีบทบาทในการช่วยแก้ปัญหาในการสร้างแบบจำลองการเกิดสนามไฟฟ้า ทำให้การแก้ปัญหาเหล่านั้นได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ โปรแกรมซอฟต์แวร์สำเร็จรูป (Software package) ที่นิยมใช้การจำลองการเกิดสนามไฟฟ้า ในปัจจุบันก็มีอยู่หลายโปรแกรมเช่น PSpice MATLAB และ MathCAD เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้โปรแกรม Maxwell SV ในการคำนวณหาสนามไฟฟ้า เริ่มจากการแก้สมการของ Poisson หรือ Laplace แล้วแต่กรณี ลักษณะทั่วไปของสมการเป็นดังนี้

$$\text{div}(-\epsilon \cdot \text{grad}V) = \text{div}D = \rho \tag{2.6}$$

เมื่อ D คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้าเป็นปริมาณเวกเตอร์

ρ คือ ความหนาแน่นของประจุ

V คือ แรงดันที่ตำแหน่งนั้นเทียบกับจุดอ้างอิง

ถ้า ρ เท่ากับศูนย์ สมการข้างบนก็จะเป็นสมการ Laplace ถ้า ρ ไม่เท่ากับศูนย์จะเรียกว่า สมการ Poisson สำหรับไดอิเล็กทริกที่ไม่มีประจุค้างอยู่ จะมีค่า $\text{div}.D$ เป็นศูนย์

วิธีแก้สมการ Poisson หรือ Laplace นั้นสามารถใช้วิธีเชิงตัวเลขได้หลายวิธี วิธีที่นิยมใช้มี 2 แบบ แบบแรกได้แก่วิธี finite difference สร้างสมการความแตกต่างพีชคณิต(algebraic difference equation) ของสมการขึ้น เพื่อหาค่าแรงดันที่ตำแหน่งต่างๆ ในสนามไฟฟ้า แบบที่สอง ได้แก่ วิธี finite element ใช้หลักการมีสภาวะที่พลังงานมีค่าต่ำที่สุดภายในพื้นที่ที่ต้องการหาสนามไฟฟ้า เพื่อสร้างสมการที่ใช้หาค่าตัวแปรแรงดันที่ตำแหน่งต่างๆ ในพื้นที่ที่จะหาสนามไฟฟ้าต่อไป ทั้งสองวิธีนี้สามารถใช้ในการหาสนามไฟฟ้าที่มีไดอิเล็กตริกมากกว่าหนึ่งชนิด นอกจากนี้วิธีคำนวณเชิงตัวเลขทั้งสองวิธีที่กล่าวถึงแล้ว ยังมี charge simulation ใช้เปลี่ยนสมการให้อยู่ในรูปสมการอินทิเกรต ซึ่งเป็นสมการของเกาส์ (Gauss' Law) ดังต่อไปนี้

$$\oiint_A D dA = \int_V \rho dV \quad (2.7)$$

เมื่อ A เป็นพื้นที่ปิด (พื้นที่บนผิว), V เป็นปริมาตรภายในพื้นที่ปิด

แรงดันที่ตำแหน่งต่างๆ ในสนามไฟฟ้า หาได้จากการแทนค่า D ในสมการ โดยวิธีการใช้ประจุอิสระที่สมมติขึ้นและนำไปวางไว้ในตำแหน่งต่างๆ ที่สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างประจุและแรงดันของอิเล็กโทรดและให้หาค่าสนามไฟฟ้าได้

อิเล็กโทรดทุกชนิดย่อมมีขอบริมซึ่งอาจให้สนามไฟฟ้าที่มีความเครียดสูงเกินกว่าสนามไฟฟ้าค่าเฉลี่ย ในการคำนวณหาความโค้งที่เหมาะสมสำหรับขอบของอิเล็กโทรดนั้น ใช้วิธี Rogowski profile อิเล็กโทรดที่สร้างขึ้นตามเส้นสมสัณฐานนี้เรียกว่า อิเล็กโทรดแบบ Rogowski (สำรวย สังข์สะอาด, 2528) ศึกษาขั้นตอนการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Maxwell SV ได้จากภาคผนวก ก

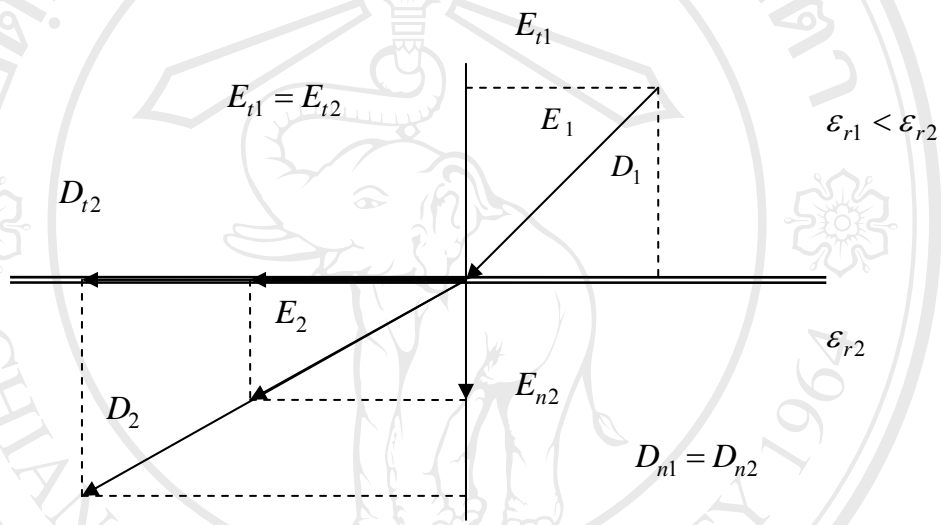
2.3 สนามไฟฟ้าในไดอิเล็กตริกต่างชนิดซ้อนกัน

ในระบบที่มีไดอิเล็กตริกที่ใช้ต่างชนิดกันที่ซ้อนกันย่อมมีค่าเปอร์มิตติวิตี (Permittivity, ϵ) และค่าความต้านทานจำเพาะต่างกัน อันเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือหักเหของเส้นทางสนามไฟฟ้าและความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวรอยต่อ การใช้ไดอิเล็กตริกมากกว่าหนึ่งชนิดต้องพิจารณารูปร่างลักษณะและความหนาของไดอิเล็กตริก

2.3.1 การหักเหของสนามไฟฟ้าที่รอยต่อของไดอิเล็กตริก

ความเครียดสนามไฟฟ้าในแนวแทนเจนต์ E_t ของรอยต่อไดอิเล็กตริกต่างชนิดกัน มีค่าคงตัว และมีความหนาแน่นของเส้นฟลักซ์ไฟฟ้า D_n ในแนวตั้งฉากกับรอยต่อมีค่าคงตัว กล่าวคือ

$$E_{t1} = E_{t2} \quad \text{และ} \quad D_{n1} = D_{n2} \quad (2.8)$$



รูปที่ 2.8 การหักเหของสนามไฟฟ้าที่รอยต่อของไดอิเล็กตริก

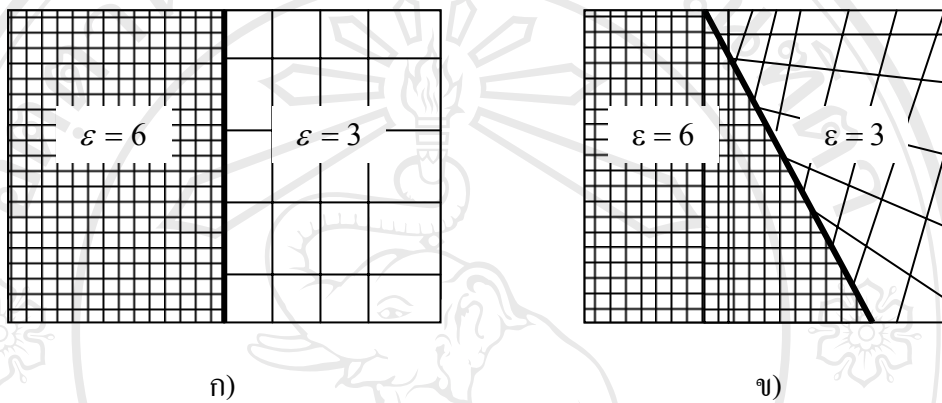
จากความสัมพันธ์ $D = \epsilon E$ จะได้ความสัมพันธ์

$$\frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2} = \frac{E_{n2}}{E_{n1}} = \frac{D_{t1}}{D_{t2}} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \quad (2.9)$$

สรุปได้ว่า สนามไฟฟ้า \vec{E} และ \vec{D} ในไดอิเล็กตริกที่มีค่า ϵ_r ที่มีค่ามากกว่าจะหักเหห่างออกจากแนวตั้งฉากหรือหักเหเข้าหารอยต่อนั่นเอง แต่เส้นสมศักย์ในส่วนที่มี ϵ_r สูงจะหักเหเข้าหาแนวตั้งฉาก การหักเหของสนามไฟฟ้ามีผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้า และเส้นแรงดันสมศักย์ แสดงให้เห็นว่ามีแนวรอยต่อมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

ตัวอย่างแสดงเส้นสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรมดแผ่นระนาบขนานของไดอิเล็กตริกที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีต่างกันดังรูปที่ 2.9 ก) แสดงถึงรอยต่อของไดอิเล็กตริกตั้งฉากกับระนาบของ

อิเล็กโทรด ส่วนในรูป ข) แสดงถึงรอยต่อไดอิเล็กตริกทำมุมเฉียงกับระนาบของอิเล็กโทรด และพบว่าที่บริเวณมุมของไดอิเล็กตริกที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีต่ำจะมีเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าหนาแน่นกว่าบริเวณอื่นๆ แสดงให้เห็นว่า บริเวณจุดตัดระหว่างผิวระนาบของอิเล็กโทรดกับแนวรอยต่อของไดอิเล็กตริกมีค่าสูงมากและเป็นจุดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าค่าของสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน์ก่อน และทำให้เกิดการปล่อยประจุไฟฟ้าขึ้นได้ (สุรพล ดำรงกิตติกุล, 2535)

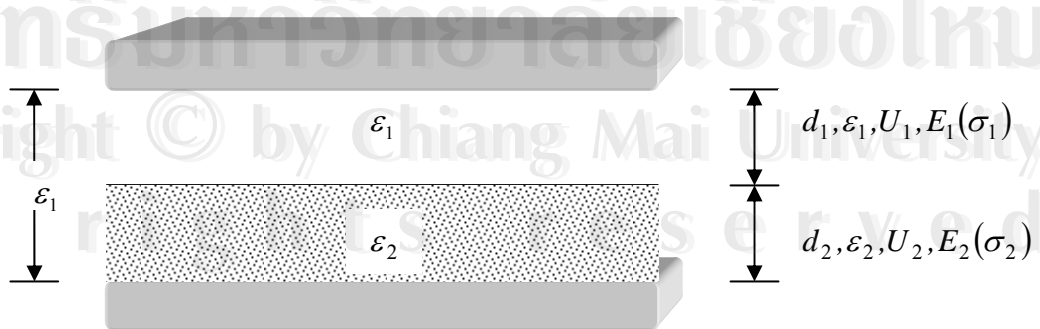


รูปที่ 2.9 ไดอิเล็กตริกต่างชนิดซ้อนกันในสนามไฟฟ้า

- ก) แสดงถึงรอยต่อที่แนวตั้งฉาก กับระนาบของอิเล็กโทรด
- ข) แสดงถึงรอยต่อที่ทำมุมเฉียงกับระนาบของอิเล็กโทรด

2.3.2 ชั้นไดอิเล็กตริกซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

การจัดวางชั้นไดอิเล็กตริกระหว่างผิวอิเล็กโทรดที่ดี คือ การวางไม่ให้เกิดการหักเหของเส้นสนามไฟฟ้าหรือเส้นสมศักย์ นั่นคือวางให้รอยต่อของไดอิเล็กตริกอยู่บน เส้นสมศักย์เพื่อหลีกเลี่ยงโอกาสที่จะเกิดสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ



รูปที่ 2.10 ไดอิเล็กตริกวางซ้อนกันในสนามไฟฟ้า

สนามไฟฟ้าและแรงดันกระจายในไดอิเล็กตริกทั้งสอง(รูป2.10)คำนวณได้จากความสัมพันธ์ $D = \epsilon E$ เมื่อสนามไฟฟ้าเป็นแบบไฟฟ้ากระแสสลับ ฉะนั้น D จะมีค่าคงตัว และลักษณะการวางของไดอิเล็กตริกอยู่ในสนามไฟฟ้าเสมือน เป็นกะแปซิเตอร์ต่อกัน และประจุในกะแปซิเตอร์แต่ละชั้นมีค่าเท่ากัน

$$Q = C_1 U_1 = C_2 U_2 \quad (2.10)$$

เมื่อ C_1 และ C_2 เป็นค่าความจุไฟฟ้าของไดอิเล็กตริกชั้นที่มี ϵ_1 และ ϵ_2 ตามลำดับ แต่เนื่องจาก

$$C_1 \sim \frac{\epsilon_1}{d_1} \quad \text{และ} \quad C_2 \sim \frac{\epsilon_2}{d_2} \quad (2.11)$$

ฉะนั้นอัตราส่วนของแรงดันเท่ากับ

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \cdot \frac{d_1}{d_2} \quad (2.12)$$

จาก

$$U = U_1 + U_2 \quad (2.13)$$

ดังนั้น

$$U_1 = \frac{U}{\left(1 + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \cdot \frac{d_2}{d_1}\right)} \quad (2.14)$$

$$U_2 = \frac{\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \cdot \frac{d_2}{d_1} \cdot U}{\left(1 + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \cdot \frac{d_2}{d_1}\right)} \quad (2.15)$$

ความเครียดสนามไฟฟ้าในไดอิเล็กตริกทั้งสอง เท่ากับ

$$E_1 = \frac{U}{d} \cdot \left[\frac{\epsilon_2 / \epsilon_1}{\frac{d_1}{d} \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - 1 \right) + 1} \right] \quad (2.16)$$

$$E_2 = \frac{U}{d} \cdot \left[\frac{1}{\frac{d_1}{d} (\epsilon_2 - 1) + 1} \right] \quad (2.17)$$

2.3.3 ชั้นไดอิเล็กตริกที่เป็นก๊าซกับของแข็ง

ในระบบพลาสมาความดันบรรยากาศ ชั้นอากาศบางๆ มักจะเกิดขึ้นในระบบอิเล็กโทรด ที่อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ด้วยเหตุผลทางเทคนิคที่ทำให้ต้องมีโครงสร้างในลักษณะเช่นนั้น และเป็นเหตุให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าในส่วนที่เป็นชั้นอากาศบางๆ มีค่าสูงเกินค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซ เพอร์มิตติวิตีของก๊าซ ($\epsilon_r \cong 1$) เพอร์มิตติวิตีของของแข็ง ($\epsilon_r \geq 2$) (สำรวจ สังข์สะอาด, 2528)

ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นที่แรงดันที่แรงดันต่ำๆ และมีกระแสไหลผ่านระหว่างอิเล็กโทรดน้อยมาก และไดอิเล็กตริกยังคงสภาพทางไฟฟ้าได้ แต่เมื่อจ่ายแรงดันสูงขึ้นมากๆ การเบรกดาวนจะเกิดขึ้น จนกระทั่งเกิดการเสียดสภาพฉับพลันในที่สุด การกลายเป็นตัวนำในรูปแบบของการเกิดประกายข้ามอย่างรุนแรง ในช่วงเวลาของการเสียดสภาพฉับพลันทำให้เกิดการลัดวงจรระหว่างอิเล็กโทรด

2.4 กลไกการเกิดเบรกดาวนในก๊าซ (Breakdown Mechanism in Gas)

การเกิดเบรกดาวนในก๊าซ หมายถึงการเปลี่ยนแปลงสภาพการต้านทานไฟฟ้าไปสู่สภาพนำไฟฟ้าของก๊าซ ปัจจุบันมีทฤษฎีที่เป็นที่ยอมรับในการอธิบายการเกิดเบรกดาวนในก๊าซมีอยู่ 2 ทฤษฎีด้วยกันคือ ทฤษฎีของทาวเซนต์ (Townsend's theory) และทฤษฎีสตรีมเมอร์ (Streamer theory) ทั้งสองทฤษฎีนี้อธิบายโดยอาศัยทฤษฎีจลน์ (Kinetic theory) เป็นพื้นฐาน

2.4.1 ทฤษฎีของทาวเซนต์ (Townsend's theory)

ทฤษฎีนี้อธิบายการเกิดเบรกดาวนว่าเกิดจากเพิ่มทวีคูณของอิเล็กตรอนซึ่งเกิดจากการชนไอออไนเซชัน (Collision ionization) ประกอบด้วยกระบวนการขั้นต้น (α -process) หมายถึงการเพิ่มทวีคูณของอิเล็กตรอนที่เกิดจากอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากแคโทดเคลื่อนที่ไปในสนามไฟฟ้าและได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าในขณะที่วิ่งเข้าหาแอโนดพลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับจะเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ ถ้าพลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับจากสนามไฟฟ้านี้มากกว่าพลังงานไอออไนเซชันของโมเลกุลของก๊าซจะทำให้เกิดไอออไนเซชัน ในกระบวนการขั้นที่สอง (γ -process) เป็นผลต่อเนื่องจากกระบวนการขั้นต้น ที่เกิดจากอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มขึ้นโดยการ

ชนของไอออนบวกและมีทิศทางในการเคลื่อนที่วิ่งเข้าหาแคโทดและเนื่องจากไอออนบวกมีน้ำหนักมากกว่าอิเล็กตรอนมาก ทำให้เมื่อไอออนบวกนี้วิ่งเข้าหาแคโทดและทำให้อิเล็กตรอน หลุดออกจากแคโทดเกิดอิเล็กตรอนอิสระมากขึ้น ถ้าไอออนบวกในกระบวนการขั้นต้น มีพลังงานสูงมาก ก็จะทำให้เกิดกระบวนการขั้นต่อไป (β - process) ที่ทำให้เกิดไอออนในเซชันของก๊าซ อย่างไรก็ตาม ทฤษฎีของทาวเซนต์ ไม่สามารถจะอธิบายการเกิดเบรกดาวน์ได้ทุกกรณี ด้วยเหตุผลดังต่อไปนี้ คือ

- 1) ไอออนบวกไม่อาจทำให้เกิดไอออนในเซชันในก๊าซได้อย่างสมบูรณ์ที่ความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์เพราะต้องใช้พลังงานเป็นสองเท่าของพลังงานที่ทำให้เกิดไอออนในเซชัน
- 2) กลไกการเกิดไอออนในเซชันตามกระบวนการ β เป็นส่วนที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน์ของอิเล็กโทรด จะไม่มีผลต่อค่าแรงดันเริ่มเกิดเบรกดาวน์แต่จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เวิร์กฟังก์ชันของโลหะที่ทำให้แคโทดกลับมีผลอย่างมากต่อค่าแรงดันเบรกดาวน์
- 3) กลไกการเบรกดาวน์ตามกระบวนการ β ต้องใช้เวลาการเคลื่อนที่ของไอออนช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดมากกว่าเวลาการเกิดเบรกดาวน์ที่วัดได้

ในกระบวนการ α จำนวนอิเล็กตรอนในอะวาลานซ์ (Avalanche) ที่เกิดการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้า ถูกเร่งให้วิ่งไปหาแอโนด พลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ ทำให้เกิดไอออนในเซชัน อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากโมเลกุลก็จะวิ่งชนโมเลกุล เกิดอิเล็กตรอนตัวใหม่เพิ่มขึ้น มีลักษณะเป็นกลุ่มของอิเล็กตรอนและไอออน ที่อยู่ระหว่างแคโทดและแอโนด เป็นระยะ X ดังสมการ

$$N_x = N_0 e^{\alpha x} \quad (2.18)$$

เมื่อ N_0 เท่ากับ จำนวนอิเล็กตรอนที่ปล่อยจากแคโทดต่อวินาที

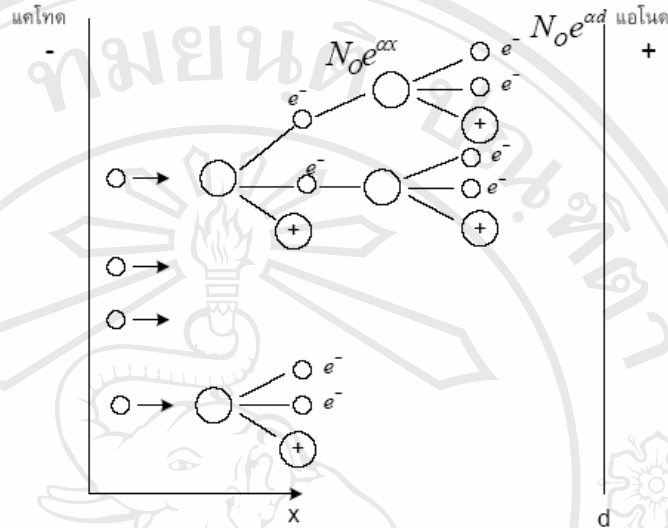
N_x เท่ากับ จำนวนอิเล็กตรอนที่ระยะ X จากแคโทด

ดังนั้น จำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งเข้าหาแอโนด ($X = d$) ต่อวินาที จะเป็น

$$N_d = N_0 e^{\alpha d} \quad (2.19)$$

อิเล็กตรอนแต่ละตัวที่ออกจากแคโทดจะสร้างอิเล็กตรอนขึ้นใหม่เป็นจำนวน $e^{\alpha d} - 1$ ตัวจะเห็นได้ว่า จำนวนอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นเป็นเอกซ์โปเนนเชียล แต่เฉพาะกระบวนการ α นี้จะไม่

สามารถทำให้เกิดเบรกควานี้ได้ เพราะ ถ้าหยุดจ่ายแรงดันกระบวนกรไอออนไนเซชันก็จะหยุดลง ดังนั้นต้องอาศัยกระบวนการ γ ทำให้เกิดเบรกควานี้



รูปที่ 2.11 การสร้างอิเล็กตรอนอิสระโดยกระบวนการ α

ในกระบวนการ γ สามารถอธิบายได้ดังนี้

ให้ N_0 เท่ากับ จำนวนอิเล็กตรอนที่ปล่อยจากแคโทดต่อวินาที

N'_0 เท่ากับ จำนวนอิเล็กตรอนที่ปล่อยจากแคโทดในกระบวนการ γ ต่อ วินาที ที่ตำแหน่ง $x=0$

N''_0 เท่ากับ จำนวนอิเล็กตรอนรวมทั้งหมดที่ออกจากแคโทดต่อวินาที

จะได้
$$N''_0 = N_0 + N'_0 \tag{2.20}$$

แต่อิเล็กตรอนแต่ละตัวที่ออกจากแคโทดจะชนไอออนไนเซชันเท่ากับ $e^{\alpha d - 1}$ ครั้ง จำนวนครั้งของการชนไอออนไนเซชันในช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดทั้งหมดจะเป็น

$$N'_0 = N_0(e^{\alpha d} - 1) \tag{2.21}$$

จะมีอิเล็กตรอนเกิดขึ้นจากกระบวนการนี้ที่ออกจากแคโทด เป็น

$$N'_0 = \gamma N''_0(e^{\alpha d} - 1) \tag{2.22}$$

เมื่อ γ เป็นสัมประสิทธิ์ไอออนไนเซชันในกระบวนการ γ แทนค่าสมการที่ (2.22) ใน (2.20) จะได้

$$N_0'' = \frac{N_0}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \tag{2.23}$$

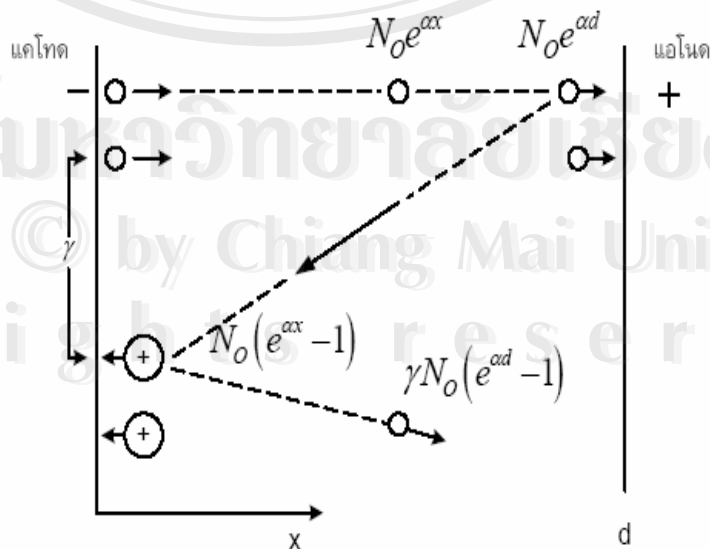
จาก สมการที่ (2.19) จำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งไปถึงแอโนด เท่ากับ

$$N_d = \frac{N_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \tag{2.24}$$

จากความสัมพันธ์ $\frac{N_d}{N_0} = \frac{I}{I_0}$ จะได้

$$I = \frac{I_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \tag{2.25}$$

จากสมการที่(2.25) แสดงว่าในขณะที่สนามไฟฟ้ามีค่าไม่สูงนัก $\gamma(e^{\alpha d} - 1) \ll 1$ ค่าของกระแสเท่ากับ $I = I_0 e^{\alpha d}$ แต่เมื่อสนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น $\gamma(e^{\alpha d} - 1)$ จะมีค่าเข้าใกล้ 1 กระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อ $\gamma(e^{\alpha d} - 1)$ มีค่าเท่ากับ 1 กระแสจะมีค่าเป็นเข้าใกล้อนันต์ ($I \rightarrow \infty$) เรียกเงื่อนไขนี้ว่า การเบรกดาวน์ของทาวเซนต์ ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การสร้างอิเล็กตรอนอิสระโดยกระบวนการ γ

2.4.1.1 กฎของพาสเชน (Paschen 's law)

จากกระบวนการ γ ที่กล่าวมาแล้วพบว่ามีเงื่อนไขที่เกิดเบรกดาวน์คล้ายกัน คือ อิเล็กตรอนอิสระถูกสร้างขึ้นในช่องว่างระหว่างอิเล็กโทโรด และอาจมีกระบวนการอื่นๆ เสริมการเบรกดาวน์ เช่น ไอออนไนเซชันจากพลังงานโฟตอนที่ปล่อยออกมาจากโมเลกุลในสภาพที่ถูกกระตุ้นกลับสู่สภาพปกติ หรือเกิดอิเล็กตรอนอิสระจากโมเลกุลในสถานะภาพกึ่งเสถียรแพร่กระจายไปยังแคโทดที่เงื่อนไขเดียวกันในการเกิดเบรกดาวน์ ดังนั้นจึงอาจเขียนเงื่อนไขทั่วไปในการเกิดเบรกดาวน์เพื่อแทนกระบวนการ γ ทั้งหมดด้วย แฟกเตอร์หนึ่งคือ Γ เงื่อนไขทั่วไปจึงเขียนได้ว่า

$$\Gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (2.26)$$

$$\text{เมื่อ } \Gamma = \frac{\beta}{\alpha} + \gamma_i + \gamma_{ph} + \gamma_m + \dots$$

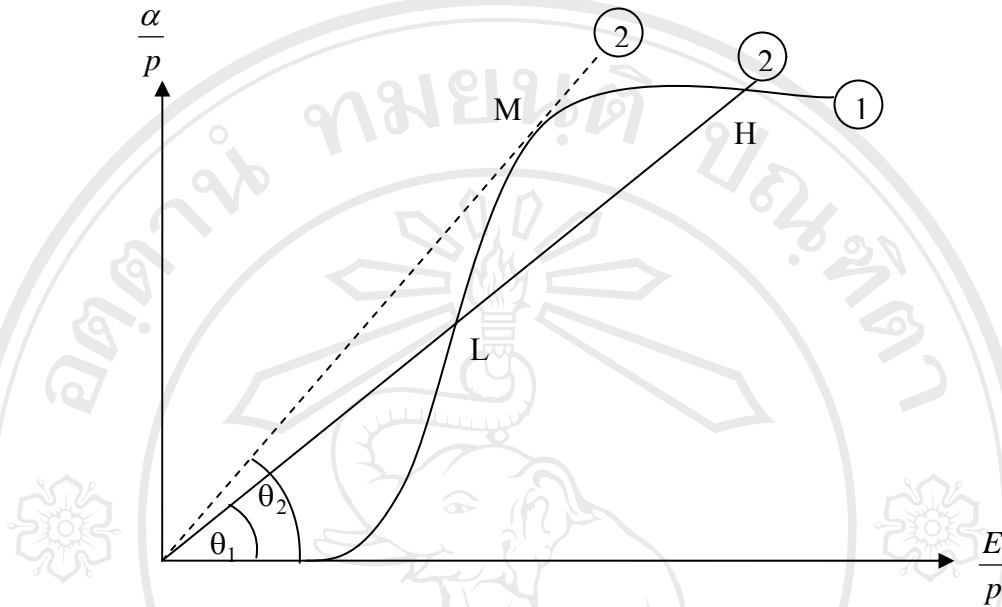
จาก สัมประสิทธิ์การไอออนไนเซชัน (α) มีความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้า (E) ที่สม่ำเสมอ (Naidu, 1995)

$$\frac{\alpha}{p} = f\left(\frac{E}{p}\right) \quad (2.27)$$

$$\alpha d = p.d.f\left(\frac{U}{p.d}\right) = K \quad (2.28)$$

ถ้า U เป็นค่าแรงดันเบรกดาวน์ จะพบว่า U_b นี้จะอยู่ในฟังก์ชันของ $p.d$ เท่านั้น หรือ U_i เป็นค่าแรงดันเริ่มต้น จะพบว่า U_i นี้จะอยู่ในฟังก์ชันของ $p.d$ เท่านั้นเช่นกัน

จากสมการ (2.28) สามารถหาความสัมพันธ์ของพาสเซนโดยวิธีการเขียนกราฟ



รูปที่ 2.13 การหาความสัมพันธ์ของพาสเซนจากกราฟ

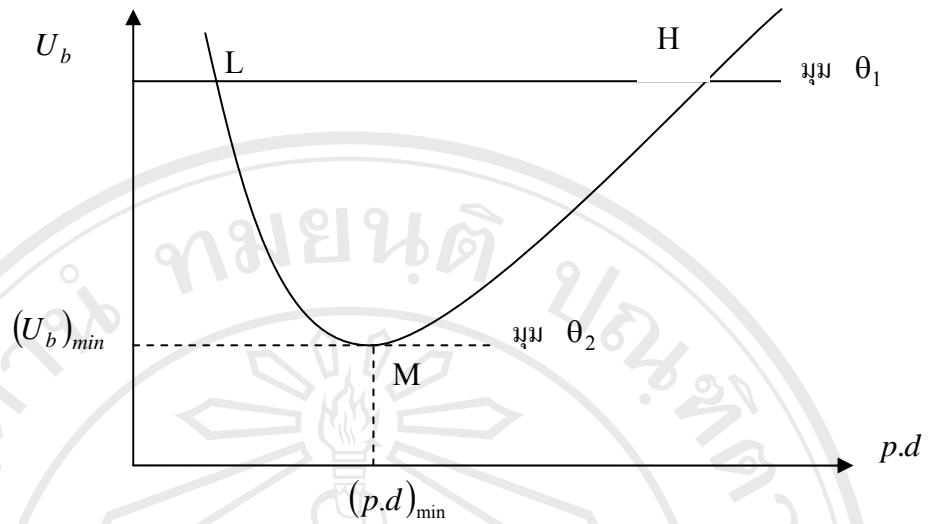
จากกราฟ

$$\tan \theta = \frac{\alpha \cdot d}{U}$$

(2.29)

จะได้เส้นตรงที่มีความชันเป็น $\tan \theta$ (เส้นที่ 2) จะมีความชันมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าแรงดัน (U) ที่มีแรงดันต่ำๆ จะได้ความชันที่มากจนไม่ตัดเส้นโค้งใดเลย หมายความว่า ไม่มีการเกิดเบรกควาน์เกิดขึ้น และที่แรงดันสูงๆ จะได้จุดตัดสองจุดแสดงว่า มีค่าแรงดันเบรกควาน์สองค่า

ที่จุด M เป็นจุดที่เส้นตรงสัมผัสเส้นโค้ง แสดงถึงค่าแรงดันต่ำสุดที่จะทำให้เกิดเบรกควาน์ได้ที่จุดตัด L เกิดเบรกควาน์กรณีที่มีอิเล็กโทรดห่างกันมากๆ ค่าของ E/P มีค่าน้อย เมื่อความดันลงที่ แต่ถ้า E/P มีค่าสูง เมื่อหาค่าหลายๆ จุดจะได้เส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของ U_b และ $p \cdot d$ ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 เส้นโค้งของพาสเชน (Paschen's Curve)

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.27) เขียนได้ว่า

$$\alpha = pAe^{\frac{-Bpd}{U}} \tag{2.30}$$

จากเงื่อนไขการเบรกควาน์สมการที่ (2.26) เขียนได้ว่า

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{1}{\Gamma} + 1\right) \tag{2.31}$$

จากสมการที่ (2.28) และ (2.28) จะได้

$$e^{\frac{-Bpd}{U}} = \frac{Apd}{\ln\left(\frac{1}{\Gamma} + 1\right)} \tag{2.32}$$

ให้ $U = U_b$ จะได้

$$U_b = \frac{Bpd}{\ln\left(\frac{1}{\Gamma} + 1\right)} \tag{2.33}$$

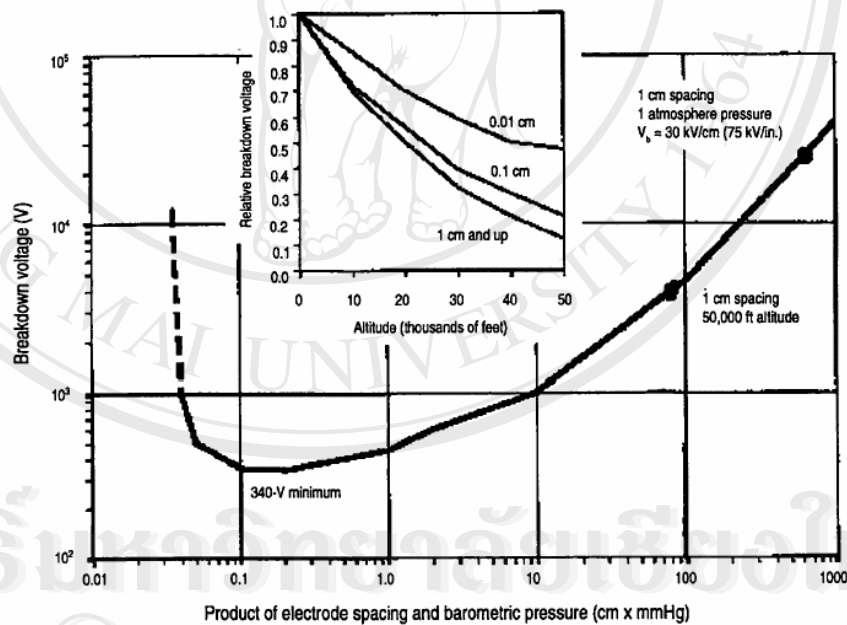
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 Copyright © by Chiang Mai University
 All rights reserved

โดยที่ A และ B เป็นค่าคงตัวขึ้นอยู่กับ ชนิดของก๊าซการคำนวณหาค่า U_b ต้องทราบค่า Γ ที่มีค่าอยู่ระหว่าง $10^{-2} - 10^{-3}$ และค่า U_b จึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ $p.d$ แต่ที่ค่า $p.d$ ต่ำ หรือเข้าใกล้ศูนย์ ค่าของ U_b จะเพิ่มขึ้นอีก แสดงว่า มีค่าแรงดันต่ำสุด $(U_b)_{min}$ ที่สามารถคำนวณได้จากเส้นโค้งพาสเชน

$$(p.d)_{min} = \frac{e}{A} \ln\left(\frac{1}{\Gamma} + 1\right) \tag{2.34}$$

$$(U_b)_{min} = 2.718 \frac{B}{A} \ln\left(\frac{1}{\Gamma} + 1\right) \tag{2.35}$$

ในระบบพลาสมาความดันบรรยากาศ ข้อมูลของ $(p.d)_{min}$ และ $(U_b)_{min}$ ของอากาศที่ จากเส้นโค้งพาสเชน (รูปที่ 2.14) มีความสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบระบบ ให้มีประสิทธิภาพ



รูปที่ 2.15 เส้นโค้งพาสเชน (Paschen's curve) ของอากาศที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

2.4.2 ทฤษฎีสตรีมเมอร์ (Streamer theory)

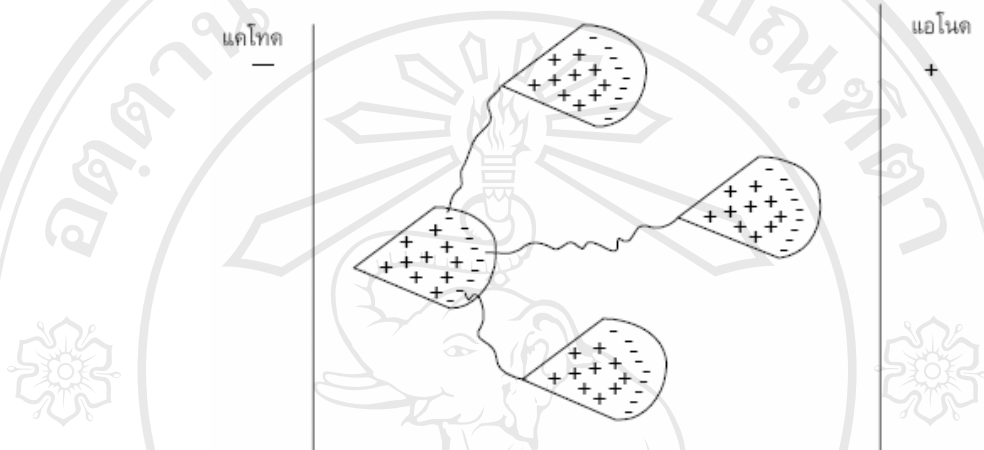
เนื่องจากกลไกเบรกดาวน์ตามทฤษฎีของทาวน์เซนต์ ไม่สามารถอธิบายการเกิดเบรกดาวน์ได้ทุกกรณี เช่น การเกิดเบรกดาวน์ในระยะกว้าง ๆ ในบรรยากาศของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าที่เกิดเบรกดาวน์ในช่วงหน้าคลื่น เวลาคลื่นตัด (Chopped time, T_c) น้อยกว่า 0.1 ไมโครวินาที ไอออนบวกไม่สามารถเคลื่อนที่ไปถึงแคโทดเพื่อสร้างอิเล็กตรอนอิสระได้ และเวลาที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากแอโนดไปแคโทด อีกกรณีหนึ่งที่ไม่สามารถใช้ทฤษฎีทาวน์เซนต์อธิบายผลของประจุค้าง (Space charge) ที่อยู่เหลือจากอิเล็กตรอนอะวาลานซ์ ทำให้สนามไฟฟ้าเดิมบิดเบือนไปในทางที่มีความเครียดของสนามไฟฟ้าสูง และอาจทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานมากพอที่จะเกิดไอออนไนเซชันขึ้นได้

Meek และ Loeb ได้เสนอทฤษฎีสตรีมเมอร์บวกในปี 1940 เวลาเดียวกัน Rather เสนอทฤษฎีสตรีมเมอร์ลบ เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ที่ทฤษฎีของทาวน์เซนต์ อธิบายไม่ได้ หลักการของการเกิดเบรกดาวน์ตามทฤษฎีสตรีมเมอร์เป็นผลสืบเนื่องจากกระบวนการวังชนไอออนไนเซชัน ในกระบวนการ α ของทาวน์เซนต์ กล่าวคือจะมีไอออนไนเซชันเป็นจำนวนมากหลังโฟตอนที่เกิดจากการรวมตัวกันใหม่ (Recombination) ระหว่างไอออนบวกกับอิเล็กตรอนแล้วปลดปล่อยพลังงานออกมา การเกิดไอออนไนเซชันแบบนี้เรียกว่า โฟโตไอออนไนเซชัน (Photo-ionization) ของก๊าซโมเลกุลที่ส่วนหน้าของสตรีมเมอร์ กลุ่มของประจุค้างของไอออนที่ส่วนหัวของสตรีมเมอร์ทำให้สนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่วิ่งข้างช่องว่างไปสู่แอโนดเกิดประจุค้างของอิเล็กตรอนเป็นลําระหว่างอิเล็กโทรดปล่อยให้ไอออนบวกรวมกันเป็นประจุค้างอยู่ด้านหลัง ความเครียดของสนามไฟฟ้าที่ส่วนที่หัวและหางของแต่ละกลุ่มเพิ่มขึ้น แต่ในบริเวณระหว่างอิเล็กตรอนกับไอออนบวก จะมีความเครียดสนามไฟฟ้าลดลง การเพิ่มขึ้นของความเครียดสนามไฟฟ้าตามจุดต่างๆ ทำให้เกิดโฟโตไอออนไนเซชันขยายตัวเพิ่มขึ้นเกิดอะวาลานซ์ใหม่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ประจุค้างเพิ่มขึ้นทำให้ความนำไฟฟ้าสูงขึ้นเป็นแนวมีลักษณะเป็นสตรีมเมอร์ระหว่างแอโนดและแคโทด (รูปที่ 2.15) เรียก กลไกเบรกดาวน์ลักษณะนี้ว่า สตรีมเมอร์เบรกดาวน์

เงื่อนไขการเกิดสตรีมเมอร์เบรกดาวน์กำหนดด้วยช่วงต่อของการเปลี่ยนแปลงสถานะภาพจากอิเล็กตรอนอะวาลานซ์ไปสู่สตรีมเมอร์ สามารถพิจารณาได้ใน 2 ลักษณะดังนี้

1. ทฤษฎีสตรีมเมอร์บวก (Meek and Loeb, 1940) ได้เสนอเงื่อนไขการเปลี่ยนจากอิเล็กตรอนอะวาลานซ์เดี่ยวไปสู่สตรีมเมอร์ว่าจะเกิดขึ้นเมื่อสนามไฟฟ้าเนื่องจากไอออนบวกที่ส่วนหัวอะวาลานซ์มีค่าประมาณเท่ากับความเครียดสนามไฟฟ้าที่ป้อนจากภายนอก

2. ทฤษฎีสติมเมอร์ลอป(Rather, 1940) ได้เสนอเงื่อนไขสตริมเมอร์เบรกดาวน์กำหนดด้วยสนามไฟฟ้าจากประจุต่างเช่นกัน โดยกำหนดให้สตริมเมอร์จะเกิดขึ้นเมื่ออเวลาานซ์มีจำนวนอิเล็กตรอนหรือไอออนบวกตามกระบวนการชนไอออนไนเซชันเป็นจำนวน e^{α} ประมาณ 10^8 ตัว โดยไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซหรือความดันก๊าซ หรือระดับความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้า



รูปที่ 2.16 การเกิดสตริมเมอร์เบรกดาวน์

2.5 กลไกการเกิดเบรกดาวน์ในของแข็ง (Breakdown Mechanism in solid)

การเกิดเบรกดาวน์ในไดอิเล็กตริกที่เป็นของแข็งนั้น ในทางปฏิบัติไม่ได้เกิดในรูปแบบที่แน่นอน แต่มักจะเกิดจากการใช้งานเป็นระยะเวลานาน เช่น การเกิดเบรกดาวน์อันเนื่องมาจากร่องรอยบนผิวไดอิเล็กตริก โดยรอยบนผิวนี้อาจเป็นส่วนที่นำกระแสไฟฟ้าและนำไปสู่การเบรกดาวน์ที่เรียกว่า การวาวไฟ(flash over) ของไดอิเล็กตริก การเกิดเบรกดาวน์ในแบบอื่นๆ เช่น การเบรกดาวน์ทางไฟฟ้าเคมี เช่น เกิดอิเล็กโตรไลซิส หรือ การเกิดการรวมตัวของไอโซน เป็นต้น นอกจากนี้ยังอาจเกิดจากการที่มีโพรงภายในไดอิเล็กตริกและทำให้เกิดการปล่อยประจุไฟฟ้าบางส่วนภายในที่มีต่อการกระจายของสนามไฟฟ้า

2.5.1 การเสื่อมสภาพทางไดอิเล็กตริก และการเบรกดาวน์อันเนื่องมาจากผลทางเคมี

เมื่อไดอิเล็กตริกอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลาหนึ่ง อาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี โดยอาจเกิดปฏิกิริยากับอากาศหรือก๊าซอื่นๆ ตัวอย่างปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้น ได้แก่

- ปฏิกิริยาออกซิเดชัน(oxidation) เกิดในวัสดุจำพวกยาง และโพลีเอทีลีน ทำปฏิกิริยากับอากาศ หรือ ออกซิเจน ทำให้เกิดการขยายตัวของรอยแตกที่ผิว

- ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) เกิดจากการทำปฏิกิริยากับความชื้นหรือไอน้ำในอากาศที่บริเวณผิวของไดอิเล็กตริก ทำให้สูญเสียคุณสมบัติทางไฟฟ้า และทางกล

การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีเป็นการเสื่อมสภาพทางด้านทานไฟฟ้าของไดอิเล็กตริก ซึ่งเกิดได้จากหลายกระบวนการ และสามารถเกิดขึ้นได้แม้ว่าจะไม่อยู่ในสนามไฟฟ้าก็ตาม จากสาเหตุต่างๆ ดังนี้ การขาดเสถียรภาพทางไฟฟ้าในอุณหภูมิสูงๆ รอยแตกอันเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาในอากาศ และ โอโซนและการเกิดไฮโดรไลซิสอันเนื่องมาจากความชื้น และความร้อน ในทางปฏิบัติมีการใช้งาน ไดอิเล็กตริกหลายชนิดร่วมกัน ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างกันเป็นการเพิ่มอัตราการเบรกดาวน์

2.5.2 การเกิดการเบรกดาวน์จากรอยที่ผิวและการรั่วในไดอิเล็กตริก (Tracking and Treeing)

โดยปกติเมื่อไดอิเล็กตริกอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าเป็นเวลานานพอ โดยปกติการเกิด Tracking เกิดขึ้นได้แม้ว่าจะใช้แรงดันต่ำ ในขณะที่การเกิด Treeing ต้องใช้แรงดันสูง มีเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะ คือ

1) การเกิดกระแสผ่านตามผิวของไดอิเล็กตริก หรือ การวาบไฟ ตามผิว เกิดเป็นร่องรอยบนผิว (Tracking)

2) การเกิดสปาร์ค(spark) เนื่องจากกระแสไหลผ่านภายในไดอิเล็กตริก โดยตรงและทำให้สูญเสียสภาพความต้านทานไป เกิดรอยแตกเป็นร่องภายใน มีรูปร่างเป็นแขนงออกไปคล้ายต้นไม้(Treeing)



รูปที่ 2.17 การเกิด Treeing ใน Polymethyl methacrylate

2.6 การเกิดไอออนและอิเล็กตรอนอิสระ

ในสถานะที่ก๊าซอยู่ในสนามไฟฟ้าเนื่องจากการป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทโรด จะทำให้เกิดการบังคับทิศทางในการเคลื่อนที่ของประจุต่างๆ โดยอาศัยแรงคูลอมบ์ของสนามไฟฟ้าและเกิด ความเร่งของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าขึ้น ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงการเกิดไอออนบวก ไอออนลบ และอิเล็กตรอนอิสระ ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการเสียดสีของไดอิเล็กตริก

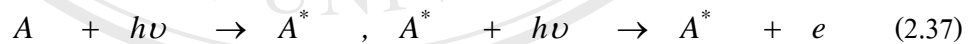
2.6.1 กระบวนการเกิดไอออนในก๊าซ

กระบวนการเกิดไอออนภายในก๊าซที่สำคัญมีอยู่ 3 กระบวนการ ได้แก่

ก) Photoionisation เป็นการเกิดประจุจากแสงหรือรังสีต่างๆ ในธรรมชาติซึ่งมีพลังงานโฟตอน เท่ากับ $h\nu$ เมื่อ h คือ Planck's constant (6.625×10^{-34} จูล-วินาที) และ ν คือความถี่ของโฟตอน ถ้าพลังงานโฟตอนมีค่ามากกว่า W_i ของโมเลกุลทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนได้



แต่ถ้า $h\nu < W_i$ อาจทำให้โมเลกุลไปอยู่ใน excited state และเมื่อได้รับพลังงานโฟตอนเพิ่มขึ้นอีกครั้งก็อาจแตกตัวเป็นไอออน ดังนี้



ขบวนการเกิดไอออนประเภทนี้มีผลเล็กน้อย ในกรณีการเสียดสีจذبคลื่นแบบทาวน์ เซนต์ แต่จะมีความสำคัญในกรณีการเสียดสีจذبคลื่นแบบสตีมเมอร์และโคโรนา

ข) Thermal ionization โมเลกุลของก๊าซจะมีพลังงานจลน์เป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับอุณหภูมิ แม้ว่าไม่มีการป้อนแรงดันเพื่อสร้างสนามไฟฟ้า เมื่ออุณหภูมิของก๊าซสูงขึ้นก็สามารถเกิดการแตกตัวเป็นไอออนได้ เรียกว่า การแตกตัวเป็นไอออนด้วยความร้อน

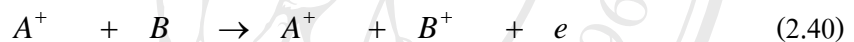
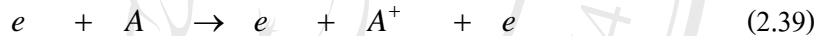
การแตกตัวเป็นไอออนด้วยความร้อนนั้นสามารถเขียนเป็นสมการของ Saha ได้ดังนี้

$$\frac{n_i^2}{n_o} \cong 4.82 \times 10^{15} \sqrt{T^3} \exp\left(\frac{-11600V_i}{T}\right) \quad (2.38)$$

เมื่อ n_0 เป็นความหนาแน่นของโมเลกุลที่เป็นกลาง ณ อุณหภูมิ T
 n_i เป็นค่าความหนาแน่นของโมเลกุลที่แตกตัวเป็นไอออน
 V_i เป็นระดับพลังงานของการแตกตัวเป็นไอออน

ค) การเกิดประจุเนื่องจากการชนกันระหว่างอนุภาค (Ionisation by collision)

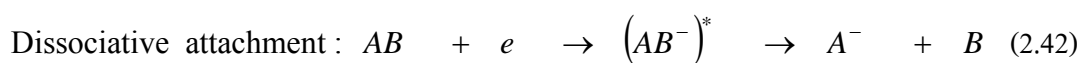
เป็นการเกิดประจุ เนื่องจากการชนของอิเล็กตรอนอิสระหรืออนุภาคขนาดเล็กๆ กับอนุภาคที่เป็นกลาง อิเล็กตรอนอิสระที่อาจเกิดขึ้นในก๊าซเนื่องจากขบวนการแรกเริ่มในข้อ ก) และข้อ ข) และถูกเร่งความเร็วยิ่งขึ้นในสนามไฟฟ้า จนทำให้พลังงานจลน์สูงกว่า W_i ก็จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มขึ้นในการชนครั้งถัดๆ มา แต่สำหรับก๊าซที่มีอิเล็กตรอนในโมเลกุลที่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้น(Excited) ให้ไปอยู่ที่ระดับพลังงานที่เรียกว่า metastable energy state โมเลกุลของก๊าซนี้อาจก่อให้เกิดไอออนได้ โดยการชนกับโมเลกุลที่เป็นกลางตัวอื่นๆ



โดย A และ B เป็นโมเลกุลของก๊าซ

2.6.2 การเกิดไอออนลบและอิเล็กตรอนอิสระของก๊าซ

โมเลกุลหรืออะตอมที่เป็นกลาง สามารถรับอิเล็กตรอนเข้ามา และทำให้เกิดเป็นไอออนลบได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าเป็นก๊าซไฟฟ้าลบ(electronegative gas) ต้องการรับอิเล็กตรอนหนึ่งหรือสองตัว พลังงานที่ต้องคายออกมาในการรับอิเล็กตรอนนี้แตกต่างกันตามชนิดของก๊าซ และบ่งบอกด้วยค่า electron affinity(W_{af}) การเกิดไอออนลบอาจเกิดได้ด้วยขบวนการต่อไปนี้



2.6.3 การปล่อยอิเล็กตรอนจากขั้วไฟฟ้า (Electron Emission)

ในการปล่อยประจุในก๊าซ นอกจากอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากการแตกตัวเป็นไอออนของโมเลกุลในก๊าซด้วยกระบวนการต่างๆ ที่ได้กล่าวมาแล้ว กระบวนการปล่อยอิเล็กตรอนออกจากขั้วไฟฟ้าสามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่ออะตอมวาเลนซ์อิเล็กตรอนของขั้วโลหะมีพลังงานสูงมากกว่าค่า work function ขึ้นอยู่กับชนิดขั้วโลหะ ก็จะสามารถเคลื่อนที่ไปมาได้โดยอิสระภายในโลหะ เกิดเป็นอิเล็กตรอนอิสระที่ผิวของโลหะที่มีกำแพงพลังงานศักย์ (Potential Energy Barrier) กั้นอยู่ อิเล็กตรอนจะไม่สามารถหลุดออกมานอกผิวของโลหะได้จนกว่าจะได้พลังงานจากภายนอก จากกระบวนการดังต่อไปนี้

ก) การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากขั้วไฟฟ้าโดยใช้ความร้อน (Thermionic Emission)

การที่อิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวโลหะโดยได้รับพลังงานในรูปของพลังงานความร้อน เช่น การเผาขั้วแคโทดโดยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ถ้าอุณหภูมิสูงพอจะทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงจนหลุดออกจากผิวโลหะได้

ข) การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากขั้วไฟฟ้าโดยใช้แสง (Photo Emission)

การที่อิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวโลหะโดยได้รับพลังงานโฟตอนจากการแผ่รังสี เช่น อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ตกกระทบขั้วแคโทด

ค) การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากขั้วไฟฟ้าโดยสนามไฟฟ้า (Field Emission)

การที่อิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวโลหะได้โดยได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าภายนอก กำแพงพลังงานศักย์จะลดลง ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากขั้วไฟฟ้าด้วยพลังงานความร้อนได้ง่ายขึ้น ทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากผิวของขั้วโลหะ

ง) การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากขั้วไฟฟ้าโดยการชนของอนุภาค (Secondary Emission)

การที่อิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวโลหะโดยได้รับพลังงานจากการชนกันของอนุภาค เช่น การชนของไอออนในกระบวนการ γ ทำให้อิเล็กตรอนอิสระเพิ่มมากขึ้น