บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1 สนามไฟฟ้า[1],[2],[3]

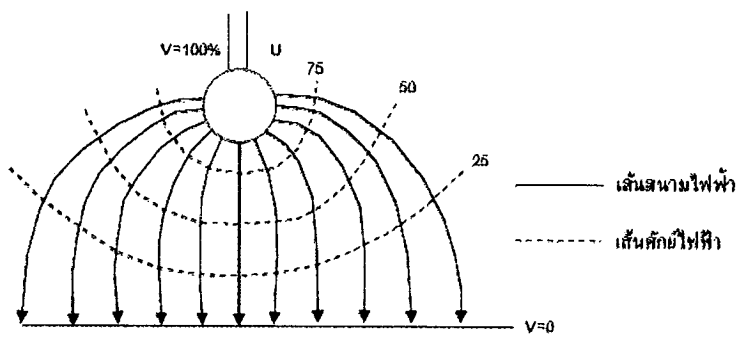
สนามไฟฟ้า หมายถึงความเข้มของสนามไฟฟ้าเกิดจากอำนาจของประจุที่มีอยู่ในรูปแบบต่างๆ กันในลักษณะสนามไฟฟ้าที่ต่างกัน การวิเคราะห์ผลของสนามไฟฟ้าต่อพฤติกรรมของ Dielectric materials เป็นประโยชน์มากเพื่อนำมาออกแบบอุปกรณ์ เครื่องมือให้ใช้งานอย่างถูกต้องปลอดภัย

สนามไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภท คือ สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (uniform field) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (slightly nonuniform field) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (highly nonuniform field) สำหรับสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ (uniform field) เมื่อทำการป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรด สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอจะเกิดการเบรกดาวน์ หรือสปาร์คทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรด (ซึ่งเท่ากันทุกจุด) ถึงค่าที่กำหนดค่าหนึ่งโดยประมาณ และกระแสเพิ่มขึ้นอย่างมากในทันทีทันใด ส่วนสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (nonuniform field) อิเล็กโตรดแบบนี้ความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้นความแตกต่างกัน ณ จุดต่างๆ จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิเล็กโตรด ที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากหรือน้อย แต่ถ้าเขียนเส้นสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่าจะได้ ดังภาพที่ 2-1 จะเห็นได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโตรดทรงกลม ซึ่งอาจจะคำนวณได้จากสมการ

$$E_{max} = \frac{U}{d\eta^*} \tag{2.1}$$

เมื่อ η^* คือ แฟคเตอร์สนามไฟฟ้า (field utilization factor) มีคำนิยามว่า

$$\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{max}} \qquad 0 < \eta^* \leq 1 \tag{2.2}$$



ภาพที่ 2-1 เส้นสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่าของอิเล็กโทรดทรงกลม

ภาพที่ 2-1 อิเล็กโตรดแบบนี้ถึงแม้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าถึงค่าวิกฤตแล้วก็ตาม จะไม่เกิดเบรกดาวน์แต่จะเกิดโคโรน่าในบริเวณที่ใกล้ๆผิวอิเล็กโตรดคือ บริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง ส่วนบริเวณอื่นๆ ยังมีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำจะไม่เกิดโคโรน่า ฉะนั้นในช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรดจะเกิดดิสชาร์จที่ไม่สมบูรณ์ (คือไม่ตลอดแนวระหว่างอิเล็กโตรด) เรียกว่า ดิสชาร์จบางส่วน (partial discharge) ปรากฏการณ์นี้อาจจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องหรือเป็นช่วงๆ จึงทำให้มีกระแสไหลในวงจรที่ป้อนแรงดันให้อิเล็กโตรด กระแสนี้จะเกิดขึ้นและวัดได้ก่อนเกิดการเบรกดาวน์ เรียกว่า "กระแสโคโรน่า (corona current) หรือกระแสดิสชาร์จ" การเกิดโคโรน่าจึงทำให้สนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตเปลี่ยนไป เพราะมีประจุค้าง (space charge) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดยังคำนวณได้จากสมการ(2.10) แต่ η^* จะเปลี่ยนไป ดังนั้นค่าความเครียดเบรกดาวน์ของฉนวนจะคำนวณจากสมการ (2.10) ไม่ได้ อย่างไรก็ตาม สมการ (2.10) นี้อาจใช้คำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันโคโรน่าเริ่มเกิดได้ เพราะสนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตยังไม่เปลี่ยนแปลง นั่นคือ

$$\mathrm{E}_{\max} = \frac{U_i}{d\eta^*} \tag{2.3}$$

เมื่อ $\mathrm{E}_{\max}$ คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าโคโรน่าเริ่มเกิด

U_i คือ แรงดันป้อนที่โคโรน่าเริ่มเกิด (corona inception voltage)

โดยที่ $\mathrm{E}_{\max}$ และ U_i เป็นค่าความเครียดสนามไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าที่ โคโรน่าเริ่มเกิด ฉะนั้นสมการ (2.3) จึงใช้ได้เฉพาะกรณีที่ไม่มีประจุค้างระหว่างอิเล็กโตรด (free of space charge) หรือกล่าวคือ สมการ (2.3) นี้ใช้สำหรับการคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าหรือแรงดันเริ่มต้น (starting voltage *, threshold voltage, inception voltage) หมายถึง แรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงในช่องระหว่างอิเล็กโตรด อาจจะเป็นแรงดันเบรกดาวน์ (ในกรณีที่มีอิเล็กโตรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หรือไม่สม่ำเสมอเพียง เล็กน้อย) หรือเป็นแรงดันที่โคโรน่าเริ่มเกิด (ในกรณีที่มีอิเล็กโตรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ค่าแรงดันเบรกดาวน์จะมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเริ่มต้น) ค่าแรงดันเริ่มต้นจึงอาจเขียนในรูปสมการทั่วไปได้ว่า

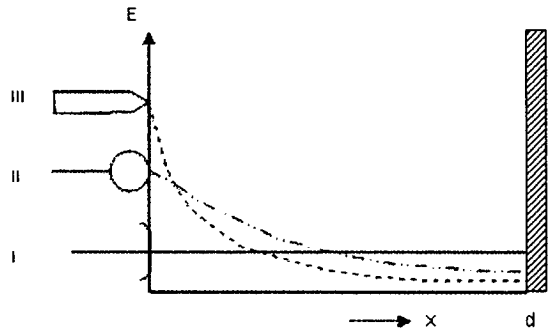
$$U_i = \mathrm{E}_i \cdot d\eta^* \tag{2.4}$$

เมื่อ U_i คือ แรงดันเริ่มต้น

E_i คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันเริ่มต้น U_i

ในกรณีที่อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หรือสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ค่า U_i คือ U_b และ E_i คือ E_b ถ้าเป็นอิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง $U_b > U_i$ ค่าแรงดันเบรกดาวน์นี้อาจจะคำนวณได้ง่ายๆ ทั้งนี้เพราะไม่ทราบถึงการกระจายของประจุค้างว่าเป็นอย่างไร ฉะนั้นการคำนวณความคงทนต่อแรงดันทางไฟฟ้าของการฉนวนที่อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงมักจะกำหนดด้วยค่าแรงดันเริ่มต้น หรือความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มต้นเป็นตัวบอกถึงค่าความคงทนการฉนวนต่อแรงดันทางไฟฟ้า อย่างไรก็ตามความคงทนการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้านี้นอกจากจะขึ้นอยู่

กับลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิเล็กโตรด เช่น ระยะห่างของอิเล็กโตรด, รัศมีความโค้งของอิเล็กโตรด, ลักษณะพื้นผิวของอิเล็กโตรดแล้วยังขึ้นอยู่กับแฟคเตอร์อื่นๆ อีกหลายประการ



ภาพที่ 2-2 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดลักษณะต่างๆ

2 การเบรกดาวน์ [1],[2],[3]

การเบรกดาวน์ หมายถึงการที่เราป้อนแรงดันไฟฟ้าที่ค่าๆหนึ่งให้กับฉนวน ซึ่งมีค่าเกินความสามารถของฉนวนที่จะทนแรงดันไฟฟ้านั้นๆได้ จึงจะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านฉนวนอย่างรุนแรงจนกระทั่งฉนวนนั้นๆทนไม่ไหว จึงเกิดการเบรกดาวน์ไปในที่สุด การเบรกดาวน์นั้นขึ้นอยู่กับชนิดหรือฉนวนที่ใช้ทำเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้า ดังนั้นถ้าแบ่งการเบรกดาวน์ตามชนิดของฉนวนทางไฟฟ้าแล้ว จะแบ่งออกได้ 3 แบบคือ

1. การเบรกดาวน์ในก๊าซ (Breakdown in gas)
2. การเบรกดาวน์ในของเหลว (Breakdown in Liquid)
3. การเบรคดาวน์ในของแข็ง (Breakdown in solid)

2.1 การเบรคดาวน์ในก๊าซ (Breakdown in gas)

ก๊าซเป็นฉนวนชนิดหนึ่งสภาพการเป็นฉนวนของก๊าซจะเสียไปเมื่อมีการดิสชาร์เกิดขึ้นซึ่งก็คือการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านก๊าซโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุ (อิเล็คตรอน,ไอออน) ที่เกิดจากการไอออไนเซชัน โดยการไอออไนเซชันจะเกิดขึ้นได้ต้องมีสนามไฟฟ้ามากระตุ้นให้อนุภาคประจุมีพลังงานมากพอทำให้อิเล็คตรอนหลุดออกมาเป็นประจุอิสระ และเมื่ออิเล็คตรอนอิสระมีพลังงานจลน์มากพอที่จะชนกับโมเลกุลจนเกิดกระบวนการแตกตัวของอิเล็คตรอนออกจากโมเลกุลของก๊าซรวมกับอิเล็คตรอนที่ปล่อยออกจากผิวอิเล็คโตรดเมื่อได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าสูง จนกระทั่งอิเล็คตรอนอิสระมีจำนวนมากพอที่จะทำให้ก๊าซมีสภาพนำไฟฟ้าและเกิดเบรคดาวน์ การดิสชาร์จเบรคดาวน์ในช่องว่างแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ

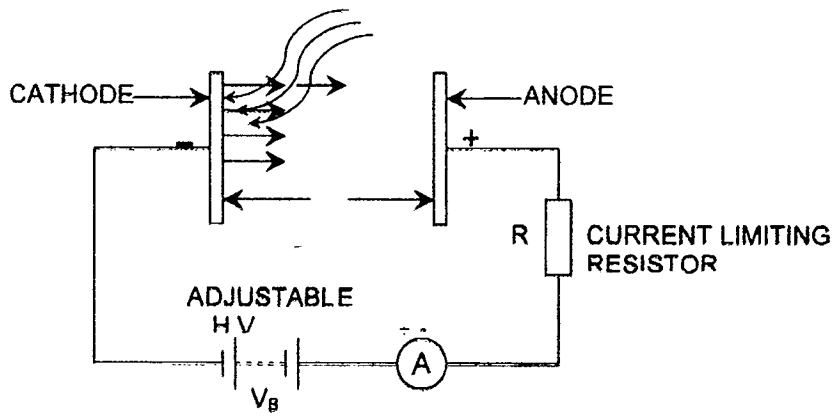
1.เบรกดาวน์สมบูรณ์ Complete Breakdown คือการเกิดเบรคดาวน์ตลอดแกปเชื่อมโยงระหว่างอิเล็คโตรด เรียกแรงดันที่ทำให้เกิดการเบรคดาวน์สมบูรณ์นี้ว่า แรงดันเบรคดาวน์ U_b (Breakdown Voltage)

2.เบรคดาวน์เพียงบางส่วน (Partial Breakdown) คือ การเกิดเบรคดาวน์ไม่สมบูรณ์ จะเกิดขึ้นในกรณีที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง จะเกิดก่อนเบรคดาวน์แบบสมบูรณ์เรียกแรงดันนี้ว่า แรงดันเริ่มเกิด U_i (Inception Voltage)

2.2 กลไกการเบรกดาวน์ มีอยู่ 2 วิธี คือ

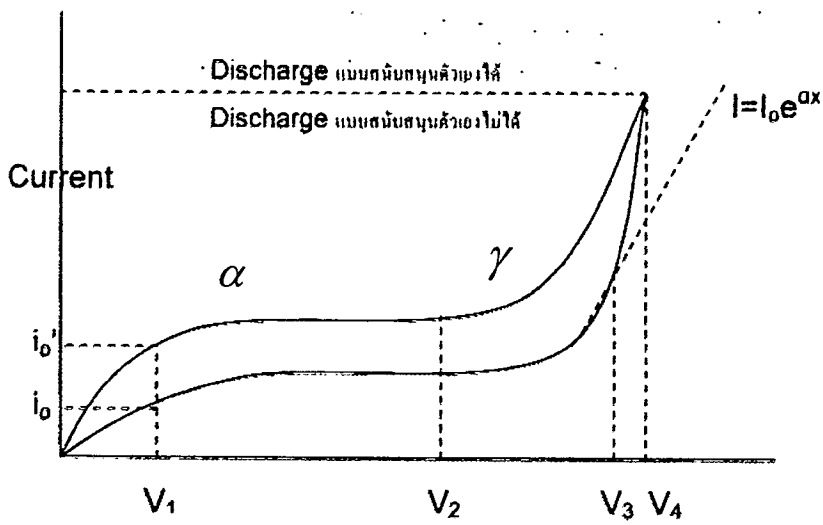
1.กลไกการเบรคดาวน์ของ Townsend

Townsend ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของกระแสระหว่าง Electrode แบบระนาบวางขนานกัน ดังภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 วงจรศึกษาการทดลองของ Townsend

จากการทดลองของTownsend เมื่อทำการเพิ่มแรงดัน V_B ซึ่งตกคร่อมอิเล็กโตรดทั้งสอง จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดจากนั้นทำการยิงรังสี UV เข้าไปที่ อิเล็กโตรดขั้วลบจน อิเล็กตรอนหลุดออกจากอิเล็กโตรดขั้วลบแล้วเคลื่อนที่ไปหาขั้วบวกจากนั้นเกิดการชนกับโมเลกุล ของก๊าซทำให้อิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นอย่างมากจนกระทั่งเกิดการเบรกดาวน์ในที่สุด



ภาพที่ 2-4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ดาไฟฟ้า V_B กับกระแสก่อนเกิดการเบรกดาวน์

จากกราฟจะพบว่าในช่วงแรก กระแสจะเพิ่มเป็นสัดส่วนกับแรงดัน V_B เมื่อทำการเพิ่ม V_B ขึ้นจาก V_1 ถึง V_2 กระแสจะอิ่มตัวเนื่องจากอิเล็กตรอนวิ่งไปอะโนดหมด ถ้าเพิ่มแรงดันจนถึง V_3 กระแสจะเพิ่มขึ้นแบบ Exponential เมื่อเพิ่มแรงดันจนถึง V_4 จะเกิดเบรกดาวน์ เนื่องจากการไอออไนเซชันของก๊าซชนกัน และเส้นกราฟ 2 เส้นเกิดจากการป้อนรังสี UV ที่มีความเข้มไม่เท่ากัน

จะได้สมการกระแสที่ไหลผ่าน อากาศระหว่างอิเล็กโตรดเป็น

$$I = \frac{I_0 e^{\alpha d}}{1-\gamma(e^{\alpha d}-1)} \tag{2.5}$$

เงื่อนไขของการเกิดเบรคดาวน์ในก๊าซของ Townsend เมื่อมีกระแสเพิ่มขึ้นเป็นอนันต์

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

2. กลไกการเบรคดาวน์แบบ Streamer

เนื่องจากกลไกเบรกดาวน์ตามทฤษฎีของทาวน์เซนด์ไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์การเกิดเบรกดาวน์ได้ทุกกรณี โดยเฉพาะเกี่ยวกับเวลาที่ใช้ในการก่อตัวของอะวาลานช์ (formative time) ของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าที่เกิดเบรกดาวน์ในช่วงหน้าคลื่น เวลาคลื่นตัด Tc เป็นเวลาที่น้อยเกินไปที่ไอออนบวกจะสามารถเคลื่อนที่ไปถึงคะโถดเพื่อสร้างอิเล็กตรอนอิสระได้ หรือแม้แต่คิดเวลาที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากคะโถดไปอะโนด โดยไม่ชนกับโมเลกุลใดเลย ก็ยังใช้เวลานานกว่าเวลาคลื่นตัด ต่อมา Meek, Loeb และ Rather ได้เสนอ ทฤษฎีกลไกการเบรกดาวน์แบบ Streamer ขึ้น โดย Meek กับ Loeb ได้เสนอทฤษฎีสตรีมเมอร์บวก (positive streamer) ส่วน Rather ได้เสนอทฤษฎีสตรีมเมอร์ลบ (negative streamer)

1) Meek, Loeb กล่าวว่า สตรีมเมอร์ จะเกิดขึ้นเมื่อสนามไฟฟ้าจากประจุค้างไอออนบวกที่หัวอะวาลานช์ มีค่าประมาณเท่าๆ กับความเครียดสนามไฟฟ้าที่ป้อนจากภายนอก

2) Rather กล่าวว่าสตรีมเมอร์จะเกิดขึ้นเมื่ออะวาลานช์มีจำนวนอิเล็กตรอนหรือไอออนบวกตามกระบวนการชนไอออไนเซชัน $e^{\alpha d}$ ประมาณ 10^8 โดยไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซ หรือความดันก๊าซ หรือระดับความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้า

3. การคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ในก๊าซ [1],[2],[3]

การเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซมี 2 แบบคือ เบรกดาวน์โดยตรง กับ เบรกดาวน์แบบโคโรนา การเบรกดาวน์โดยตรงจะเกิดในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หรือไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ส่วนการเกิดเบรกดาวน์แบบโคโรนา จะมีโคโรนาเกิดขึ้นก่อนเกิดเบรกดาวน์ ซึ่งเป็นลักษณะเบรกดาวน์ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ค่าแรงดันเบรกดาวน์คำนวณไม่ได้ แต่คำนวณค่าแรงดันเริ่มเกิดได้ การคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ในก๊าซ จะอาศัยเงื่อนไขเบรกดาวน์ตามทฤษฎีทาวน์เซนด์ หรือ ทฤษฎีสตรีมเมอร์ ซึ่งกล่าวรวมได้ว่า การจะเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซได้นั้นจะต้องมีจำนวนอิเล็กตรอน หรือไอออนบวกในอะวาลานช์ถึงค่าวิกฤต อะวาลานช์อิเล็กตรอนได้จากการอินทีเกรท $\int \alpha dx$

3.1 กรณีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

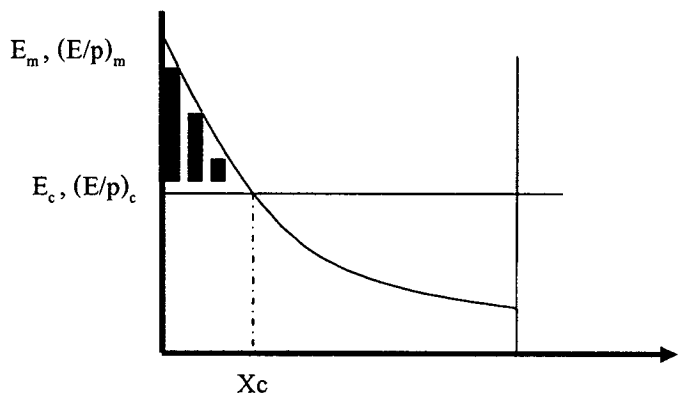
ตามเงื่อนไขของทาวน์เซนต์ คือ $\gamma(e^{\alpha d}-1)=1$ และเงื่อนไขของ Rather คือ จำนวนอิเล็กตรอนในอะวาลานช์ วิกฤตเท่ากับ Nc จะได้อะวาลานช์วิกฤตเป็น

$$\int_0^d \alpha dx = \alpha d = \ln(\frac{1}{\gamma}+1) = \ln Nc = K \qquad (2.7)$$

3.2 กรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

เมื่อ α เป็นฟังก์ชันของ E(x) และความดัน P จึงเขียนสมการได้ใหม่เป็น

$$\int_0^{x_c} \alpha[E(x),p]dx = \ln Nc = K \qquad (2.8)$$



ภาพที่ 2-5 แสดงระยะอะวาลานช์วิกฤตในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

3.3 กรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (α)

ค่า α มีความสัมพันธ์กับความดันก๊าซ p และสนามไฟฟ้า E คือ α / p = f(E/p) ซึ่งก๊าซแต่ละชนิดจะมีฟังก์ชันต่างกัน กรณี อากาศ คือ

$$\frac{\bar{\alpha}}{P} = C[\frac{E}{P}-(\frac{E}{P})_M]^2 - A \qquad (2.9)$$

โดยที่ C = 1.6053 mm.bar/kV^2

$(E/P)_M$ = 2.165 kV / mm.bar

P = 1.013 bar (ที่สภาวะมาตรฐาน)

ค่า K (streamer constant) = 9.15

จากนั้นแทนค่า $\bar{\alpha}$ ลงในสมการ $\int_0^s \alpha dx = K$ (2.10)

ค่า K (streamer constant) = 9.15

จากนั้นแทนค่า $\bar{\alpha}$ ลงในสมการ $\int_0^s \alpha dx = K$ (2.11)

จะได้ $$\int_0^s \left[PC \times \left[\frac{TE_n}{P} - \left(\frac{E}{P} \right)_M \right]^2 - AP \right] dx = K \quad (2.12)$$

$$PC \sum_{n=1}^{1499} B_n \left[\frac{TE_n}{P} - \left(\frac{E}{P} \right)_M \right]^2 - AP \sum_{n=1}^{1499} B_n = K \quad (2.13)$$

$$U_i = U_0 \times T \quad (2.14)$$

โดยที่ $$E_n = \begin{cases} E_n, TE_n \geq 2.588 \times 1.013 \\ 0, TE_n \langle 2.588 \times 1.013 \end{cases}$$

$$B_n = \begin{cases} \frac{s}{1499}, TE_n \geq 2.588 \times 1.013 \\ 0, TE_n \langle 2.588 \times 1.013 \end{cases}$$

E_n = ความเครียดสนามไฟฟ้า (kV/mm)

T = ค่าคงที่

C = 1.6053 mm.bar/kV^2 (ค่าคงที่ชูมันน์)

$(E/P)_M$ = 2.165 kV/mm.bar

A = 0.2873 /mm.bar

P = ความดันชั้นบรรยากาศ (1.013 mm.bar)

S = ระยะห่าง

K = 9.15

U_i = แรงดันเริ่มเกิด (V)

4 โคโรนา (CORONA) [1]

โคโรนา เป็นชื่อปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าแรงสูงที่เกิดขึ้นบนตัวนำไฟฟ้าหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง การเกิดโคโรนาเป็นการสูญเสียกำลังไฟฟ้าอย่างหนึ่งของระบบโดยกำลังไฟฟ้าจะถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อน แสง เสียง เคมี และแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นการเกิดปรากฏการณ์โคโรนาจะส่งผลเสียที่เห็นได้ชัดเจน 2 ประการ คือ สูญเสียกำลังไฟฟ้าของระบบไปโดยเปล่าประโยชน์ การเกิดคลื่นแทรกและรบกวนสัญญาณคลื่นวิทยุ

4.1 ปรากฏการโคโรนา

เมื่อความต่างศักดิ์ระหว่างอิเล็กโตรด มีค่ามากเพิ่มขึ้นกว่าขีดจำกัดค่าหนึ่งจะได้ยินเสียงความถี่สูงปรากฏออกมา ซึ่งเป็นการแตกตัวของอากาศที่เรียกว่าขบวนการแตกตัวของก๊าซ (ionization of gases) ซึ่งจะมีโอโซนและกรดไนตรัสเกิดออกมา เมื่อความต่างศักดิ์มีขนาดเพิ่มมากขึ้นไปอีก เราจะเห็นปรากฏการณ์ แสงสีม่วงเรืองแสงรอบๆตัวนำเป็นจุดๆตลอดความยาว แสงเรือง

นี้จะปรากฏให้เห็นชัดเจนบริเวณที่มีความขรุขระหรือสกปรกมาก พร้อมกันนั้นจะเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่กระจายออกไปรบกวนสัญญาณคลื่นวิทยุด้วย และถ้าแรงดันนั้นมีขนาดมากขึ้นไปอีก จะเกิดการสปาร์ค (spark)หรือเกิดการวาบไฟตามผิว (flashover) ขึ้นทั้งหมดนี้ เรียกว่า "ปรากฏการณ์โคโรนา" ระดับแรงดันไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปรากฏการณ์โคโรนา มีอยู่ 2 อย่าง คือ

1. แรงดันไฟฟ้าวิกฤติแตกตัว (disruptive critical voltage)

2. แรงดันไฟฟ้าวิกฤติมองเห็น (visual critical voltage)

4.2 แรงดันไฟฟ้าวิกฤติแตกตัว (disruptive critical voltage)

เป็นค่าระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ทำให้เริ่มเกิดขบวนการแตกตัวของอากาศ อันเนื่องมาจากมีอิเล็กตรอนอิสระ (free electron) ในอากาศได้รับผลจากความเข้มสนานไฟฟ้า ทำให้เกิดพลังงานจลน์วิ่งเข้าชนโมเลกุลของก๊าซ ปลดปล่อยอิเล็กตรอนอิสระและไอออนขึ้น ทำให้เกิดปรากฏการณ์ทางเสียงโดยยังไม่มีแสงให้เห็น

4.3 แรงดันไฟฟ้าวิกฤติมองเห็น (visual critical voltage) เป็นค่าระดับหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าวิกฤติที่สูงกว่าค่าแรก และทำให้อากาศชั้นรอบนอกออกไปแตกตัวต่อไป ด้วยผลจากการที่โมเลกุลได้รับพลังงานจลน์จากการชนของอิเล็กตรอนอิสระ จะทำให้อิเล็กตรอนของโมเลกุลแตกตัวหลุดออกไป และวิ่งไปชนโมเลกุลอื่นๆ แต่ถ้าอิเล็กตรอนบางตัวของโมเลกุลไม่สามารถแตกตัวออกไปได้ โมเลกุลนั้นก็จะอยู่ในสภาวะไม่เสถียร (meta stable state) และเมื่ออิเล็กตรอนคืนกลับสู่วงโครจรในสภาวะเดิม โมเลกุลก็จะปลดปล่อยพลังงานที่ได้รับคืนกลับมาในรูปพลังงานโฟตอน (photon) ที่เป็นพลังงานแสง ซึ่งกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นต่อเนื่องตลอดเวลาในสภาวะที่อำนวย ดังนั้นเราจะมองเห็นแสงเรืองรอบสายตัวนำ

ถ้าระดับแรงดันไฟฟ้านี้มีค่ามากกว่าระดับแรงดันไฟฟ้าวิกฤติมองเห็นนี้ขึ้นไปอีก อาจทำให้อากาศรอบตัวนำแตกตัวได้หมดต่อเนื่อง เป็นผลให้อากาศบริเวณนั้นเปลี่ยนสภาพจากการเป็นฉนวนกลายเป็นตัวนำไฟฟ้าทำให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านข้ามอากาศได้ ซึ้งอาจจะเป็นลำแสงสว่างมากเรียกว่า การวาบไฟตามผิวนั่นเอง

4.4 การเบรกดาวน์ที่ผิว เบรกดาวน์ที่ผิวเป็นลักษณะการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า จากอิเล็กโทรดหนึ่งไปยังอีกอิเล็กโทรดหนึ่งไปตามผิวของฉนวนไฟฟ้าที่กั้นระหว่างอิเล็กโทรด ค่าแรงดันไฟฟ้าที่จะทำให้เกิดการเบรกดาวน์ที่ผิวฉนวนไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับความยาวและลักษณะของผิว เช่น ความสกปรก การเกาะตัวของเกลือ และความชื้นของผิว ซึ่งจะเป็นผลให้ค่าแรงดันเบรกดาวน์ลดลง

5 วิธีลดการเกิดปรากฏการณ์ โคโรนา

5.1 ชนิดของวัสดุที่ใช้ในการสร้างโคโรนาชีลด์ ต้องศึกษาคุณสมบัติของวัสดุแต่ละชนิดเพื่อหาชนิดที่เหมาะสม นำมาสร้างเป็นเป็นโคโรนาชีลด์โดยคุณสมบัติที่ต้องพิจารณา เช่น ค่าความนำไฟฟ้า, ค่าความเป็นฉนวน เป็นต้น

5.2 รูปทรงต่างๆ ของโคโรนาชีลด์ ที่สามารถกระจายความเข้มสนามไฟฟ้าให้มีความสม่ำเสมอ เพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้าไม่ให้ไปเกิดที่จุดๆเดียว

5.3 ลักษณะของพื้นที่ผิวของโคโรนาซีลด์ พื้นที่ผิวที่ขรุขระจะทำให้เกิดโคโรนาได้ง่ายกว่าผิวเรียบ

5.4 ตำแหน่งการวางของโคโรนาซีลด์ การวางตำแหน่งที่เหมาะสมจะช่วยลดการเกิด โคโรนาได้อย่างมาก ควรวางไว้ใกล้กับจุดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด เช่นบริเวณขอบคม หรือปลายแหลม เป็นต้น

6 ทฤษฎีการเผาไหม้ [4],[5],[7]

6.1 การเผาไหม้ (Combustion)

การสันดาปหรือการเผาไหม้ (combustion) การเผาไหม้ คือ ปฏิกิริยาทางเคมีซึ่งเชื้อเพลิงได้รวมตัวกับออกซิเจน จากอากาศและปล่อยพลังงานความร้อนและแสงสว่าง องค์ประกอบของไฟ (fire triangle) การที่จะเกิดไฟขึ้นได้นั้นต้องมีองค์ประกอบ 3 อย่าง คือ เชื้อเพลิง (fuel) ซึ่งจะอยู่ในสภาพของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส ออกซิเจน (oxygen) ซึ่งจะมีอยู่ในอากาศประมาน 21% โดยปริมาณ ความร้อน (heat) พอเพียงที่จะติดไฟได้ เมื่อมีองค์ประกอบทั้ง 3 ครบแล้วไฟจะเกิดลุกไหม้ขึ้นและเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ ดังนั้นองค์ประกอบในการเผาไหม้มีอยู่ 4 องค์ประกอบคือ

6.1.1 เชื้อเพลิง (Fuel) คือวัตถุใดๆ ก็ตามที่สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้อย่างรวดเร็วในการเผาไหม้ เช่น ก๊าซ ไม้ กระดาษ น้ำมัน โลหะ พลาสติก เป็นต้น เชื้อเพลิงที่อยู่ในสถานะก๊าซจะสามารถลุกไหม้ไฟได้ แต่เชื้อเพลิงที่อยู่ในสถานะของแข็งและของเหลวจะไม่สามารถลุกไหม้ไฟได้ ถ้าโมเลกุลที่ผิวของเชื้อเพลิงไม่อยู่ในสภาพที่เป็นก๊าซ การที่โมเลกุลของของแข็งหรือของเหลวนั้นจะสามารถแปรสภาพ กลายเป็นก๊าซได้นั้นจะต้องอาศัยความร้อนที่แตกต่างกันตามชนิดของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด ความแตกต่างของลักษณะการติดไฟของเชื้อเพลิงดังกล่าวขึ้นอยู่กับคุณสมบัติ 4 ประการ ดังนี้

1 ความสามารถในการติดไฟของสาร(Flamablility Limitts) เป็นปริมาณไอของสารที่เป็นเชื้อเพลิงในอากาศที่มีคุณสมบัติซึ่งพร้อมจะติดไฟได้ในการเผาไหม้นั้นปริมาณไอเชื้อเพลิงที่ผสมกับอากาศนั้นจะต้องมีปริมาณพอเหมาะจึงจะติดไฟได้ โดยปริมาณต่ำสุดของไอเชื้อเพลิงที่เป็น % ในอากาศ ซึ่งสามารถจุดติดไฟได้เรียกว่า “ ค่าต่ำสุดของไอเชื้อเพลิง (Lower Flammable Limit) ” และปริมาณสูงสุดของไอเชื้อเพลิงที่เป็น % ในอากาศซึ่งสามารถจุดติดไฟได้เรียกว่า “ ค่าสูงสุดของไอเชื้อเพลิง (Upper Flammable Limit)” ซึ่งสารเชื้อเพลิงแต่ละชนิดจะมีค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของไอเชื้อเพลิงแตกต่างกันไป

2 จุดวาบไฟ (Flash Point) คืออุณหภูมิที่ต่ำที่สุด ที่สามารถทำให้เชื้อเพลิงคายไอออกมาผสมกับอากาศในอัตราส่วน ที่เหมาะสมถึงจุดที่มีค่าต่ำสุดถึงค่าสูงสุดของไอเชื้อเพลิง เมื่อมีประกายไฟก็จะเกิดการติดไฟ เป็นไฟวาบขึ้นและก็ดับ

3 จุดติดไฟ (Fire Point) คืออุณหภูมิของสารที่เป็นเชื้อเพลิงได้รับความร้อนจนถึงจุดที่จะติดไฟได้แต่การติดไฟนั้นจะต้องต่อเนื่องกันไป โดยปกติความร้อนของ Fire Point จะสูงกว่า Flash Point ประมาณ 7 องศาเซลเซียส

4 ความหนาแน่นไอ (Vapor Density) คืออัตราส่วนของน้ำหนักของสารเคมีในสถานะก๊าซต่อน้ำหนักของอากาศเมื่อมีปริมาณเท่ากัน ความหนาแน่นไอ ใช้เป็นสิ่งบ่งบอกให้ทราบว่าก๊าซนั้นจะหนักหรือเบากว่าอากาศซึ่งใช้เป็นข้อมูลในการควบคุมอัคคีภัย

6.1.2 ออกซิเจน (Oxygen) อากาศที่อยู่รอบ ๆ ตัวเรานั้นมีก๊าซออกซิเจนเป็นองค์ประกอบประมาณ 21 % แต่การเผาไหม้แต่ละครั้งนั้นจะต้องการออกซิเจนประมาณ 16 % เท่านั้น ดังนั้นจะเห็นว่าเชื้อเพลิงทุกชนิดที่อยู่ในบรรยากาศรอบ ๆ ตัวเรานั้นจะถูกล้อมรอบด้วยออกซิเจน ซึ่งมีปริมาณเพียงพอสำหรับการเผาไหม้ยิ่งถ้าปริมาณออกซิเจนยิ่งมากเชื้อเพลิงก็ยิ่งติดไฟได้ดีขึ้น และเชื้อเพลิงบางประเภทจะมีออกซิเจนในตัวเองอย่างเพียงพอที่จะทำให้ตัวเองไหม้ได้โดยไม่ต้องใช้ออกซิเจนที่อยู่โดยรอบเลย

6.1.3 ความร้อน (Heat) ความร้อน คือ พลังงานที่ทำให้เชื้อเพลิงแต่ละชนิดเกิดการคายไอออกมา

6.1.4 ปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain Reaction) หรือการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง คือ กระบวนการเผาไหม้ที่เริ่มตั้งแต่เชื้อเพลิงได้รับความร้อนจนติดไฟเมื่อเกิดไฟขึ้น หมายถึง การเกิดปฏิกิริยากล่าวคืออะตอมจะถูกเหวี่ยงออกจากโมเลกุลของเชื้อเพลิง กลายเป็นอนุมูลอิสระ และอนุมูลอิสระเหล่านี้จะกลับไปอยู่ที่ฐานของไฟอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดเปลวไฟ

6.2 ประเภทของเชื้อเพลิงชีวมวล

เชื้อเพลิงชีวมวลสามารถแยกประเภทได้เป็น 4 ประเภท คือ

6.2.1 เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากไม้ (Forest Biomass) ซึ่งสามารถแยกออกเป็นไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง ในเชื้อเพลิงประเภทนี้จะมีปริมาณลิกนิน อยู่ประมาณ 40% ตัวอย่างเชื้อเพลิงประเภทนี้ได้แก่ เศษไม้ เปลือกไม้ และขี้เลื่อย

6.2.2 เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากการเกษตร (Agriculture Biomass) ส่วนใหญ่จะเป็นของเหลือใช้จากการเกษตร เช่น ข้าว ฟางข้าว ซึ่งเชื้อเพลิงประเภทนี้จะมีปริมาณลิกนินต่ำ 0 – 20 %

6.2.3 เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากอุตสาหกรรม (Industrial Biomass) เช่น เชื้อเพลิงที่ได้จากการผลิตน้ำตาล คือ ชานอ้อย กากสับปะรด เชื้อเพลิงประเภทนี้จะมีปริมาณความชื้นสูงมาก

6.2.4 เชื้อเพลิงที่ได้จากของเหลือใช้จากคน (Domestic Waste) ได้แก่ เชื้อเพลิงจากขยะเทศบาล

6.3 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวล

เชื้อเพลิงชีวมวลจะมีปริมาณความชื้น และองค์ประกอบที่แตกต่างกัน จึงทำให้มีค่าความร้อนของเชื้อเพลิงมีค่าแตกต่างกันด้วย ซึ่งค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากการวิเคราะห์หาค่าความร้อนสูงสุดสามารถแสดงได้ตามตารางที่ 1

ตัวอย่างการทดสอบก๊าซ จากการทดสอบระบบผลิตก๊าซโดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงเป็นระยะเวลา140ชั่วโมง พบว่าระบบสามารถผลิตก๊าซเชื้อเพลิงได้ตามต้องการ เช่น ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เท่ากับ 14.45% ก๊าซไฮโดรเจน (H2) 5.75 % และก๊าซมีเทน (CH4) เท่ากับ 3.03 % ได้แสดงองค์ประกอบของก๊าซชีวมวลที่เกิดขึ้น ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 แสดงค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวล

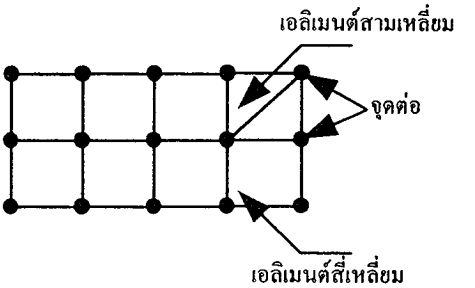
ประเภทของเชื้อเพลิงชีวมวล (กิโลกรัม)	ความร้อนของเชื้อเพลิง	
	กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม	กิโลจูลต่อกิโลกรัม
ฟืน	3,820	15,989
ถ่าน	6,900	28,881
กากอ้อย	1,800	7,534
แกลบ	3,440	14,398
ขี้เลื่อย	4,000	16,742

ตารางที่ 2 องค์ประกอบของก๊าซชีวมวลที่เกิดขึ้น

องค์ประกอบของก๊าซชีวมวลที่เกิดขึ้น	ปริมาณ
คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	14.45 %
ไฮโดรเจน (H2)	5.75 %
มีเทน (CH4)	3.03 %
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO2)	15.98 %
ไนโตรเจน (N)	59.34 %
อัตราการไหลของก๊าซ	240 m^3/hr
ค่าความร้อนเฉลี่ยของก๊าซที่เกิดจากระบบ	4,454.02 kJ/m^3

7 ทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์เบื้องต้น [6]

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นหนึ่งในหลายวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้สำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equations) และเป็นวิธีที่นิยมใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์อย่างกว้างขวาง ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาปัญหาเรื่องการถ่ายเทความร้อน ปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของของแข็ง ทั้งทางด้านสถิตศาสตร์ ทางด้านพลศาสตร์ และสนามไฟฟ้า รวมทั้งยังสามารถใช้วิเคราะห์การไหลของของไหลได้ หลักการของไฟไนต์เอลิเมนต์คือ การแบ่งสิ่งที่ต้องการวิเคราะห์ (Domain) ออกเป็นส่วนย่อยเล็กๆ เรียกว่าเอลิเมนต์ (Element) ซึ่งมักจะอยู่ในรูปสี่เหลี่ยมหรือสามเหลี่ยม ดังแสดงในภาพที่ 2-6 ที่จุดตัดของเส้นกรอบเอลิเมนต์เรียกว่า “จุดต่อ” (Node) ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีการสร้างฟังก์ชั้นทางคณิตศาสตร์เพื่อหาคำตอบ (อุณหภูมิ ความเค้น ความเร็ว ฯลฯ) ที่จุดต่อเหล่านั้นพร้อม ๆ กันโดยอาศัยเครื่องคอมพิวเตอร์ แทนที่จะแก้สมการเชิงอนุพันธ์ซึ่งต้องใช้เวลามากกว่าจะหาคำตอบได้ครบทุกจุด



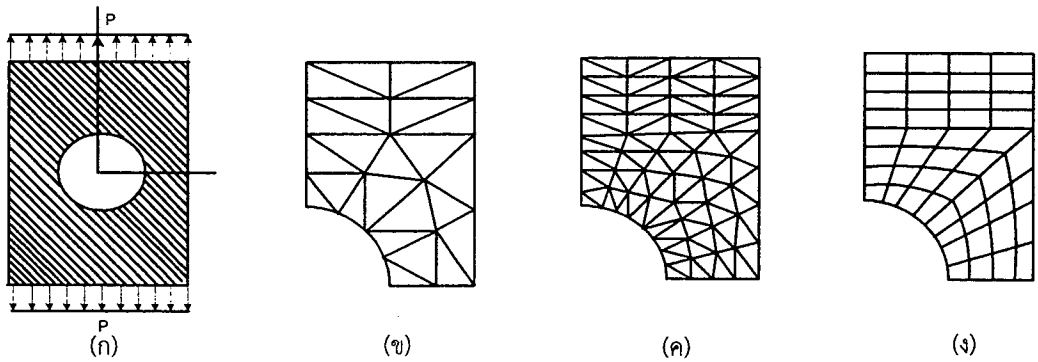
ภาพที่ 2-6 ลักษณะการแบ่งเอลิเมนต์

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นวิธีเชิงตัวเลข วิธีหนึ่งที่ใช้สำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ และเป็นวิธีที่นิยมใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์อย่างกว้างขวาง ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาด้านกลศาสตร์ของแข็ง เช่น วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างและความเค้นในชิ้นส่วนของเครื่องจักรกล โครงสร้างเครื่องบิน ตัวอาคาร สะพาน และ โครงสร้างอื่นๆ ที่ซับซ้อนได้เป็นอย่างดีไม่ว่าวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์จะอยู่ในสภาพยืดหยุ่น (Elastic) หรือในสภาพยืดตัว (Plastic) นอกจากจะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ปัญหาทางด้านสถิตศาสตร์ตามที่กล่าวมาแล้ว ยังสามารถจะใช้วิธีวิเคราะห์ปัญหาทางด้านพลศาสตร์ เช่น การสั่นสะเทือนของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลการสั่นสะเทือนของโครงสร้าง รวมทั้งยังสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาด้านการถ่ายเทความร้อนการไหลของของไหล การถ่ายเทมวล เป็นต้น

ในการวิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นส่วนเครื่องจักรกลทั่วๆ ไปที่ไม่ซับซ้อน เราจะสามารถหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งที่ต้องการทราบ เช่น การกระจัดที่ตำแหน่งใดๆ ของชิ้นส่วนโดยอาศัยสมการเชิงอนุพันธ์ และผลเฉลยที่ได้รับจะเรียกว่าผลเฉลยแม่นตรง (Exact Solution) แต่มีชิ้นส่วนเครื่องจักรกลและโครงสร้างจำนวนมากที่มีรูปลักษณะที่ซับซ้อนที่ประกอบด้วยส่วนเว้าส่วนโค้งต่างๆ ทำให้พื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วนไม่สม่ำเสมอ และบางบริเวณอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดอย่างฉับพลัน หรือ ใช้วัสดุต่างชนิดกันเหล่านี้เป็นต้น จึงมีผลทำให้ไม่สามารถจะหาผลเฉลยแม่นตรงจากสมการอนุพันธ์สามัญ (Ordinary Differential Equations) หรือสมการอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equations) ได้ ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องหาวิธีอื่น เช่น วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่สามารถจะประมาณค่าผลเฉลยโดยการแก้ระบบสมการเชิงพีชคณิตแทนการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ การแก้ปัญหาโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ดังกล่าว ชิ้นส่วนหรือส่วนประกอบของปัญหาจะถูกแบ่งออกเป็นส่วนย่อยๆ อย่างต่อเนื่อง ตามรูปร่างลักษณะที่แท้จริงของชิ้นส่วน เช่น ภาพที่ 2-6 เราเรียกชิ้นส่วนย่อยๆ นี้ว่า เอลิเมนต์ผลเฉลยที่ได้รับจะเป็นผลเฉลยที่จุดต่อ (Node) ของแต่ละเอลิเมนต์ การวิเคราะห์ปัญหาโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เราจะไม่วิเคราะห์ปัญหาทีเดียวทั้งระบบ เช่นวิธีทั่วๆ ไป แต่เราจะวิเคราะห์หาค่าทีละเอลิเมนต์แล้วนำมารวมเข้ากันเป็นผลเฉลยของระบบเช่น ในระบบโครงสร้าง เราจะหาการกระจัด และความเค้นของแต่ละจุดต่อของเอลิเมนต์ที่ประกอบเป็นโครงสร้างของระบบ

6.1 หลักการของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์คืออะไร

ในการแก้ปัญหาใดปัญหาหนึ่ง ปัญหานั้นจะประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ ค่าผลเฉลยแม่นตรง (Exact Solution) ของปัญหาดังกล่าวจะประกอบด้วยค่าของตัวแปรต่างกันตามตำแหน่งต่างๆ บนรูปร่างลักษณะของปัญหานั้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือค่าผลเฉลยแม่นตรงจะประกอบด้วยค่าต่างๆ ทั้งหมดนับเป็นจำนวนอนันต์ค่า แทนที่จะทำการหาค่าแม่นตรงที่ประกอบด้วยค่าต่างๆ จำนวนมากมายเช่นนี้ ซึ่งสำหรับปัญหาในทางปฏิบัติจะทำไม่ได้ หลักการก็คือทำการเปลี่ยนค่าทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่านั้นมาเป็นค่าโดยประมาณที่มีจำนวนที่นับได้ (Finite) ด้วยการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยเอลิเมนต์ (Element) ซึ่งมีขนาดต่างๆ กัน ดังเช่น แสดงในตัวอย่างของแผ่นวัสดุในภาพที่ 2-7



ภาพที่ 2-7 การแบ่งเอลิเมนต์แบบต่างๆ ภายในวัสดุ

วิธีการดังกล่าวชี้บ่งเป็นนัยว่า ผลเฉลยของแต่ละเอลิเมนต์นั้นจำเป็นต้องสอดคล้อง กับสมการเชิงอนุพันธ์ และเงื่อนไขของขอบเขตที่กำหนดมาให้ในปัญหานั้นๆ ซึ่งหมายความว่าหลักการของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ การสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ที่ตั้งอยู่บนรากฐานที่ว่าสมการที่สร้างขึ้นมานั้นจำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่ทำอยู่นั้น จากนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาได้มาประกอบกันเข้าก่อให้เกิดระบบสมการชุดใหญ่ซึ่งในความหมายทางกายภาพก็คล้ายกับการนำทุกเอลิเมนต์มาประกอบรวมเข้าด้วยกันก่อให้เกิดเป็นรูปร่างลักษณะทั้งหมดของปัญหาที่แท้จริง จากนั้นจึ่งทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ให้มาลงในระบบสมการชุดใหญ่นี้แล้วจึ่งทำการแก้สมการดังกล่าว ซึ่งจะก่อให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการ ณ ตำแหน่งต่างๆของปัญหานั้น

จากคำอธิบายนี้จะเห็นได้ว่า ความแม่นยำของค่าผลเฉลยโดยประมาณที่คำนวณออกมาได้นั้นจะขึ้นอยู่กับขนาด และ จำนวนของเอลิเมนต์ที่ใช้ในการแก้ปัญหานั้น นอกจากนั้นความแม่นยำของผลเฉลยก็ยังขึ้นอยู่กับการสมมติรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายในที่ใช้กับแต่ละเอลิเมนต์นั้น กล่าวคือ ฟังก์ชันการประมาณภายในที่สมมติขึ้นมานั้น มีความใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นตรงของปัญหานั้นมากน้อยเพียงใด ลักษณะการกระจายของฟังก์ชันการประมาณภายในของเอลิเมนต์อาจสมมติให้อยู่ในหลายรูปแบบ อาทิเช่น รูปแบบของการกระจายเชิงเส้นตรง เป็นต้น ส่วนขนาดของฟังก์ชันการประมาณภายในนี้จะขึ้นอยู่กับค่าที่จุดต่อ (Nodes) ของเอลิเมนต์ ยกตัวอย่างเช่นหากค่าอุณหภูมิที่จุดต่อที่ปลายมุมทั้งสามของเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมมีค่าเท่ากับ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และหากเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมนี้ ใช้ฟังก์ชันการประมาณภายในที่อยู่ในรูปแบบของลักษณะการกระจายแบบเชิงเส้นตรงแล้ว อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆในเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมนี้จะแปรผันเป็นรูปเชิงเส้นตรงโดยมีการกระจายของอุณหภูมิระหว่าง 30 ถึง 50 องศาเซลเซียส เป็นต้น

FEM หรือ Finite Element Method เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้หาคำตอบสมการเชิงอนุพันธ์ โดยใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข ซึ่งทั่วไปจะอยู่ในรูปแบบของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ คำตอบที่ได้สามารถนำไปใช้ในงานวิเคราะห์ และออกแบบได้หลายแขนงสาขา เช่น

1. วิศวกรรมโยธา: truss, beam, frame, plate, dam, vibration, earthquake
2. วิศวกรรมเครื่องกล: heat transfer, machine, vehicle

3. CFD: การไหลของของเหลว และก๊าซ, อากาศพลศาสตร์ของรถยนต์ และเครื่องบิน

4. วิศวกรรมไฟฟ้า: electromagnetic, piezoelectric

5. โลหะการ: metal forming

6. การแพทย์: biomechanics

6.2 ขั้นตอนการแก้ปัญหาด้วย FEM

1. ระบุ และทำความเข้าใจกับปัญหาให้ชัดเจน ปัญหามีกี่มิติ , เกี่ยวกับเวลาหรือไม่ , เงื่อนไขขอบเป็นอย่างไร ฯลฯ

2. เลือกสมการเชิงอนุพันธ์ที่สอดคล้องกับปัญหาดังกล่าว เพราะสมการเชิงอนุพันธ์จะเป็นตัวกำหนดชนิดของ solver FEM ที่เลือกใช้

3. ทำความเข้าใจกับหน่วยของปริมาณ และ material property ที่เกี่ยวข้องในสมการ

4. สร้างรูปเรขาคณิต ปกติจะใช้โปรแกรมตระกูล CAD

5. สร้างเอลิเมนต์ย่อย หรือ mesh แบบ {1, 2, 3} มิติให้สอดคล้องกับปัญหา

6. กำหนดค่า material property โดยต้องรัดกุมเกี่ยวกับหน่วยของปริมาณ

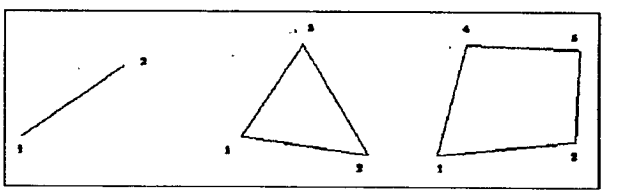
7. กำหนด boundary condition

8. หาคำตอบโดยใช้โปรแกรม FEM

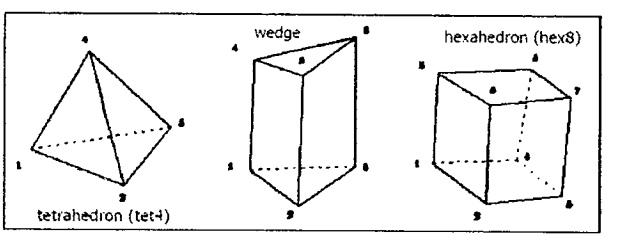
9. ทำการแปลความหมายผลลัพธ์ ตรวจสอบความถูกต้อง visualization ก่อนนำข้อมูลไปใช้งาน Analysis/design

6.3 เอลิเมนต์

เอลิเมนต์ หมายถึง หน่วยย่อยของรูปเรขาคณิตที่เป็นโดเมนของปัญหา บางครั้งอาจเรียกว่า Mesh หรือ Grid ซึ่งในวิธี FEM จะแยกคิดทีละเอลิเมนต์ย่อยก่อน จากนั้น จึงนำแต่ละ เอลิเมนต์ย่อยกลับไปประกอบเป็นรูปเรขาคณิตที่ต้องการ การแยกรูปเรขาคณิตออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยเป็นเทคนิคทำให้การหาคำตอบทำได้ง่ายขึ้น แต่ก็เป็นการเพิ่มงานในการสร้าง Mesh



ภาพที่ 2-8 ตัวอย่างเอลิเมนต์แบบ 1 และ 2 มิติ



ภาพที่ 2-9 ตัวอย่างเอลิเมนต์แบบ 3 มิติ

6.4 เงื่อนไขขอบ (boundary condition)

Boundary condition หรือเงื่อนไขขอบ เป็นการกำหนดให้ unknown บางตัว ต้องทราบค่า (unknown) ตั้งแต่การระบุปัญหา ถ้าไม่กำหนด boundary condition มาให้ จะไม่สามารถหาคำตอบเฉพาะของปัญหานั้นได้ ปัญหาแต่ละอย่าง จะมี characteristic ของ unknown ที่สามารถเป็น boundary condition ได้แตกต่างกันออกไป สามารถแสดงได้โดนสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตดังนี้

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

$y(0,t) = 0,$	$t > 0$	Boundary condition #1
$y(L,t) = 0,$	$t > 0$	Boundary condition #2
$y(x,0) = x(L - x),$	$0 < x < L$	Initial condition #1
$\frac{\partial y}{\partial t}(x,0) = 0,$	$0 < x < L$	Initial condition #2

6.5 การใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า

เงื่อนไขขอบเขตทางไฟฟ้า

$n.(\varepsilon \nabla \phi) = 0$ zero charge / no electric field / symmetry surface

$n_1.(\varepsilon_1 \nabla \phi_1) = n_2.(\varepsilon_2 \nabla \phi_2)$ continuity surface

$V = V_0$ input voltage

$V = 0$ ground

สำหรับระบบ 3 แกน

$n \cdot J = 0$ Electric insulation

$n \cdot (J_1 - J_2) = 0$ Continuity surface