บทที่ 3

ทฤษฎีของฉนวน

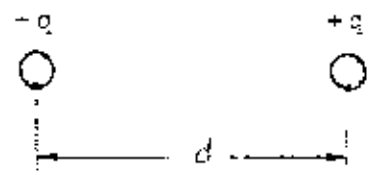
THEORY OF DIELECTRICS

ฟาเวนดิชและฟาราเดย์ ได้ค้นพบมานานแล้วว่า เมื่อสอดวัสดุอย่างใดอย่างหนึ่งเข้าไประหว่างแผ่น (Plate) ของ Capacitor จะทำให้ค่า Capacitance เปลี่ยนแปลงไปด้วยองค์ประกอบตัวหนึ่งซึ่งเรียกว่า "Dielectric constant" หรือ Permittivity ค่า Dielectric constant นี้มากกว่า 1 และขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ แต่ไม่ขึ้นกับขนาดหรือรูปร่างวัสดุดังกล่าวนี้ มีคุณสมบัติไม่เป็นตัวนำเราเรียกว่า "Dielectrics"

3.1 Electric dipole

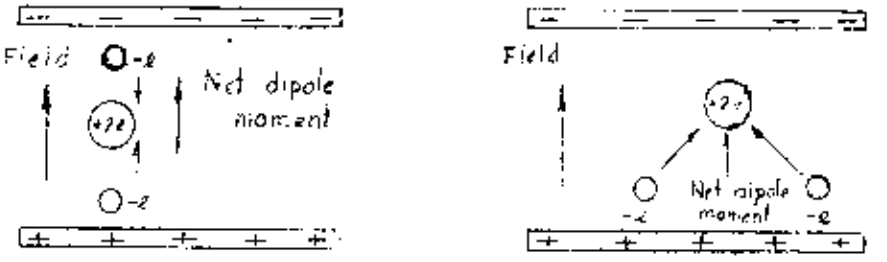
Electric dipole ประกอบด้วยประจุไฟฟ้าต่างชนิดกันและมีจำนวนเท่ากัน และอยู่ห่างกัน d ผลคูณระหว่างระยะห่างกับ Dipole charge เรียกว่า Electric moment P ซึ่งเป็นปริมาณเวคเตอร์ มีทิศทางจากประจุลบไปยังประจุบวก

$$P \triangleq qd \quad \text{coulomb-metre} \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.1 Electric moment ของ Dipole

เมื่อมี Electric dipole moment จำนวนหลายจำนวนก็ย่อมจะมีผลลัพธ์ของ Moment เหล่านี้และผลลัพธ์นี้เรียกว่า Net dipole moment



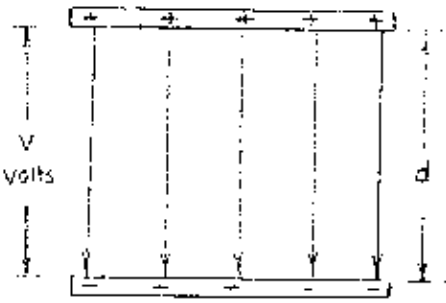
รูปที่ 3.2 แสดง Net dipole moment ของธีเลียม 2 ลักษณะในสนามไฟฟ้า

Positive nucleus จะเคลื่อนที่ไปตามทิศทางของสนามไฟฟ้าส่วนอิเล็กตรอนที่รอบนอก Orbital electron เคลื่อนที่ตรงข้ามกับ Positive nucleus ดังนั้น Electric dipole moment จึงไม่เท่ากันเกิดเป็น Net dipole moment ขึ้น บางครั้งจึงได้ชื่อว่า Induced electronic dipole เมื่อเอาสนามไฟฟ้าออกไป Net dipole moment หรือ Induced electronic dipole นี้จะหายไป

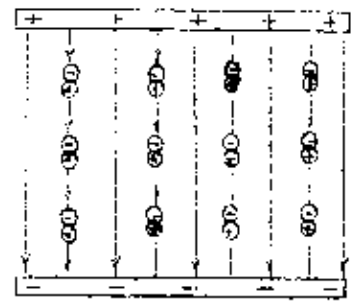
3.2 Polarization และ Dielectric constant

Polarization เป็นธรรมชาติทางไฟฟ้าของวัสดุอย่างหนึ่งที่ชี้ถึงความเป็น Dielectric อะตอมหรือโมเลกุลของฉนวนทุกชนิดถึงแม้ว่าจะเป็นกลางก็ยังประกอบด้วยประจุบวกและประจุลบที่มีจำนวนเท่ากัน แต่ประจุเหล่านี้แตกต่างกับประจุของตัวนำเพราะไม่สามารถเคลื่อนที่ภายในของสนามไฟฟ้าได้เนื่องจากโครงสร้างของอะตอมต่างกัน อย่างไรก็ดีอำนาจของสนามไฟฟ้าสามารถทำให้ประจุต่าง ๆ ของฉนวนเคลื่อนไหวได้เล็กน้อย การเคลื่อนไหว (Displacement) ของประจุเนื่องจากอิทธิพลของสนามภายนอก (External field) นี้เรียกว่า "Polarization" หลังจากเกิด Polarization ขึ้นแล้วจะเกิดประจุขึ้นที่ผิวหน้าของวัสดุ ประจุนี้เรียกว่า Polarization charge

อาจกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่า Polarization คือ Dipole moment ต่อหนึ่งหน่วย ปริมาตร



รูปที่ 3.3 แผ่นประจุในสูญญากาศ



รูปที่ 3.4 Dipole ทำให้ Flux ระหว่าง Plates เพิ่มขึ้น

แผ่นโลหะในกำนึงถึง Fringing ของ Field ที่ขอบวางขนานกันคู่หนึ่งห่างกัน d ในสูญญากาศมีความต่างศักย์เป็น V โวลต์ ความเข้มของสนามไฟฟ้า (Electric field intensity) ระหว่างแผ่นเป็น

$$E = \frac{V}{d} \qquad (3.2)$$

Electric flux density จะมีทิศทางเดียวกันกับทิศทางของความเข้มของสนาม (ตามแนวดูกศร ดังรูปที่ 3.3) และเป็นปฏิภาคกันโดยตรงด้วย

$$D = \epsilon_0 E \qquad (3.3)$$

D แทน Electric flux density

E แทน Electric field intensity

ϵ_0 แทน Dielectric constant หรือ Permittivity ของสูญญากาศ

เมื่อสอดฉนวนไประหว่างแผ่นโลหะทั้งสอง ดังรูปที่ 3.4 สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากแรงดันไฟฟ้าทำให้เกิด Potorization ในวัสดุ จะเห็นได้จากรูปแล้วเกิด Line of flux ขึ้นใหม่ตามแนวของ Dipole ระหว่างแผ่นโลหะทำให้เกิด Polarization charge ขึ้นและ charge นี้เสริมกับประจุเดิมทำของ Electric flux density จึงเพิ่มขึ้นเป็น

$$\left\{\begin{array}{l}\text{ความหนาแน่นของ}\\ \text{flux ทั้งหมด}\end{array}\right\} = \left\{\begin{array}{l}\text{ความหนาแน่นของ}\\ \text{flux ในสูญญากาศ}\end{array}\right\} + \left\{\begin{array}{l}\text{ความหนาแน่นของ}\\ \text{flux จาก Dipole}\end{array}\right\}$$

หรือ $$D = \varepsilon_o E + P \qquad (3.4)$$

P คือ Flux density ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจาก Polarization หรือ Dipole moment ต่อหน่วยปริมาตร ถ้าสมมติให้ Dipole ที่เกิดขึ้นในฉนวนระหว่างแผ่นมีจำนวน N และแต่ละ Dipole มี Electric dipole moment เป็น P ดังนั้น Dipole moment ทั้งหมดเป็น

$$P_T = Np \quad \text{coulomb-metre} \qquad (3.5)$$

ถ้า V เป็นปริมาตรของฉนวนที่อยู่ระหว่างแผ่นโลหะ Dipole moment ต่อหน่วยปริมาตรหรือ Polarization เป็น

$$P = \frac{Np}{V} \quad \text{coulomb/metre}^2 \qquad (3.6)$$

ซึ่งมีหน่วยเดียวกันกับหน่วยของ Electric flux density

จากนิยามของ Total dielectric flux

$$D \triangleq \varepsilon_o E + P \qquad (3.7)$$

ε_o เป็น Dielectric constant ของสูญญากาศ

เขียนสมการใหม่เป็น $$D = \varepsilon E \qquad (3.8)$$

เห็นว่าจะคล้ายกับเมื่อยังไม่มีฉนวนอยู่ระหว่างแผ่นโลหะ คือ สมการ(3.3) คา

ε^* จะแทน Dielectric constant ของฉนวนที่ตกคอยู่ระหว่างแผ่นโลหะคู่ขนานกัน

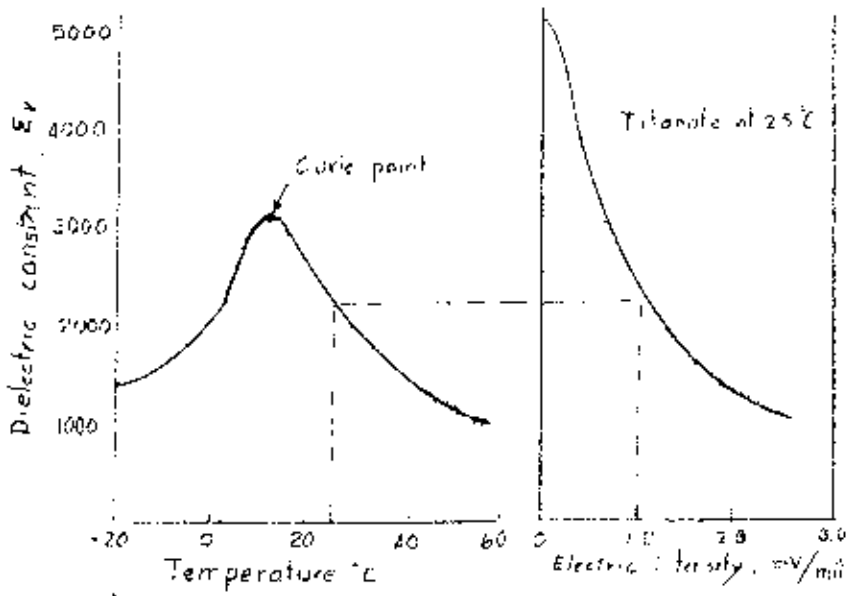
$$\varepsilon^* \bar{E} = \varepsilon_o E + P \qquad (3.9)$$

$$\varepsilon^* = \varepsilon_o + \frac{P}{E} \qquad (3.10)$$

$$\varepsilon_r = 1 + \frac{P}{D} \qquad (3.11)$$

ซึ่ง $\varepsilon^* = \varepsilon_o \varepsilon_r$, ε_r เป็นค่าที่ไม่มีหน่วยเรียกว่า Relative dielectric constant และมีค่ามากกว่า 1 เสมอสำหรับฉนวนทุกชนิด

วัสดุที่ใช้เป็นฉนวนจะมีคุณภาค (Particle) ของมันเกิด Polarization น้อย เช่น พวก Gaseous dielectric จะมีค่า ε_r มากกว่า 1 เพียงเล็กน้อยเท่านั้น Dielectric ชนิดที่มีอนุภาคซึ่งเกิด Polarization ได้มากจะมีค่า ε_r สูงมาก



รูปที่ 3.5[1] (ก) Variation of ε_r with temperature for one of the titanates.

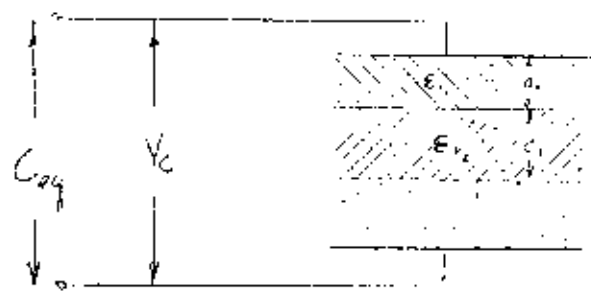
(ข) Variation of ε_r with E for a temperature above the curie point.

[1]George F. Corcoran and Henry R. Reed. Introductory Electrical Engineering (New York, John Wiley & Son, Inc. 1958) P. 401

ดังที่กล่าวมาแล้ว เมื่ออนุภาคเล็ก ๆ ของสาร Dielectric ยังไม่เรียงตัวกัน และยัง Dipole ก็ยังไม่ปรากฏออกมาตราบเมื่อมี Electric Field Dipole จึงจะเรียงตัวเป็นระเบียบ ทำให้มี Electric Displacement มากขึ้นและ Electric Displacement นี้จะคงที่เมื่อไม่มี Polarization เกิดขึ้นอีกแล้วที่อุณหภูมิสูงขึ้นการเรียงตัวของ Dipole จะสับสนดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ Polarization ลดลงจากรูปที่ 3.5 (ก) แสดงให้เห็นได้ชัดว่า ของ Titanate ในอยู่กับอุณหภูมิตราบอุณหภูมิต่ำกว่า Curie Point ค่า ε_r จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า Curie Point ค่า ε_r จะลดลงอย่างรวดเร็ว และค่า Electric Field (E) ก็ลดลงอย่างรวดเร็วเช่นเดียวกันดังรูปที่ 3.5 (ข) การที่มีวงจรหนึ่งมีค่า ε_r ต่างกันมากเมื่ออุณหภูมิต่างกัน เป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของสารที่ใช้เป็นวงจรที่เรียกว่า "Dielectric amplifier"

3.3 Multiple dielectric

อุปกรณ์ไฟฟ้าหลายชนิดที่ออกแบบเป็น Multi dielectric การคำนวณก็คือใคร่มีคนว่าเป็น Capacitor หลายตัวต่ออนุกรมกันเมื่อเส้นแรงไฟฟ้า (Electric Flux) ที่ออกจากแผ่นบวกเข้าสู่แผ่นลบตั้งฉากกัน Boundary อันหนึ่งเรียกชื่อนี้ก็นั่นวัสดุที่ต่างชนิดกันจากหลักเบื้องต้นของ Electric Field หาค่า Voltage ระหว่างแผ่นทั้งสองได้ดังนี้



รูปที่ 3.6 Multiple dielectric

$$V_c = E_1 d_1 + E_2 d_2 + \cdots\cdots + E_n d_n \quad (3.12)$$

$$= \frac{Dd_1}{\varepsilon_0 \varepsilon_{r_1} A} + \frac{Dd_2}{\varepsilon_0 \varepsilon_{r_2} A} + \cdots\cdots + \frac{Dd_n}{\varepsilon_0 \varepsilon_{r_n} A} \quad (3.13)$$

$$= \frac{Qd_1}{\varepsilon_0 \varepsilon_{r_1} A} + \frac{Qd_2}{\varepsilon_0 \varepsilon_{r_2} A} + \cdots\cdots + \frac{Qd_n}{\varepsilon_0 \varepsilon_{r_n} A} \quad (3.14)$$

ดังนั้น $$C_{eq} = \frac{Q}{V_c} \quad (3.15)$$

$$= \frac{1}{\frac{d_1}{\varepsilon_0 \varepsilon_{r_1} A} + \frac{d_2}{\varepsilon_0 \varepsilon_{r_2} A} + \cdots\cdots + \frac{d_n}{\varepsilon_0 \varepsilon_{r_n} A}} \quad (3.16)$$

$$C_1 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{r_1} A}{d_1} \quad (3.17)$$

และ $$C_2 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{r_2} A}{d_2} \quad (3.18)$$

.....

.....

.....

$$C_n = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{r_n} A}{d_n} \quad (3.19)$$

$$\therefore \quad C_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \ldots + \frac{1}{C_n}} \qquad (3.20)$$

โดย V_c แทน ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง

Q แทน จำนวนประจุของแต่ละแผ่น

ε_0 แทน Dielectric constant ของสุญญากาศ

$\varepsilon_{r_1}, \varepsilon_{r_2} \ldots\ldots \varepsilon_{r_n}$ แทน Relative dielectric constant ของ Dielectric แต่ละชั้น

C_{eq} แทน Equivalent capacitance ของ Multiple dielectric

$C_1, C_2 \ldots\ldots C_n$ แทน ค่า Capacitance ของ Dielectric แต่ละชั้น

$d_1, d_2 \ldots\ldots d_n$ แทน ความหนาของ Dielectric แต่ละชั้น

$E_1, E_2 \ldots\ldots E_n$ แทน Electric field intensity ของ Dielectric แต่ละชั้น