บทที่ ๑

บทนำ

๑.๑ ความหมาย

เนื่องจากอุปกรณ์ทางไฟฟ้าเท่าที่พบเห็นและใช้กันอยู่ จะต้องมีวัสดุฉนวนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ด้วยเสมอไป ยกตัวอย่างเช่น สายไฟซึ่งส่วนมากทำด้วยโลหะทองแดงและใช้เป็นทางเดินของกระแสไฟฟ้า เพื่อป้องกันไม่ให้กระแสรั่วไหลออกไปจึงต้องเอาฉนวนมาหุ้มเอาไว้ ในคาปาซิเตอร์ถ้าจะให้มีความจุได้มากขึ้นกว่าเดิมจำเป็นต้องสอดฉนวนเข้าไปในระหว่างแผ่นโลหะทั้งสองของคาปาซิเตอร์นั้นด้วย เราเรียกวัสดุฉนวนนี้ว่า ไดอิเลคตริก

ปกติเราวัดคุณสมบัติของฉนวนด้วยค่าที่เรียกว่า เปอมิตติวิตี(ϵ)สำหรับสูญญากาศปริมาณนี้มีค่าเท่ากับ $\epsilon_0 = ๘.๘๕๔ \times ๑๐^{-๑๒}$ ในหน่วย SI สำหรับฉนวนเปอมิตติวิตีจะมีค่ามากขึ้น และเราเรียกอัตราส่วน $\kappa = \epsilon / \epsilon_0$ นี้ว่าค่าคงที่ไดอิเลคตริกหรือค่าคงที่ฉนวน วัตถุฉนวนที่ต่างกันถ้าสอดใส่เข้าไปในระหว่างแผ่นโลหะของคาปาซิเตอร์จะทำให้ความจุของคาปาซิเตอร์นั้นต่างกัน ทั้งนี้ก็เพราะว่ามีค่า κ ต่างกันนั่นเอง วัสดุส่วนใหญ่ที่ผลิตขึ้นใช้กับอุปกรณ์ทางไฟฟ้าภายในประเทศมักมีส่วนผสมทางเคมีไม่แน่นอน ทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าไม่ทราบแน่ชัด ในงานบางอย่างเมื่อจะนำเอาไดอิเลคตริกมาใช้ประกอบจำเป็นจะต้องทราบค่า κ ด้วย ในการวิจัยได้กระทำการวัดค่า κ ของสารชนิดต่างๆเท่าที่จะกระทำได้

ในทางฟิสิกส์เราพบว่าสำหรับคาปาซิเตอร์ที่มีจำนวนประจุอยู่ที่แผ่นโลหะทั้งสองคงที่ การสอดวัสดุฉนวนเข้าไปในระหว่างแผ่นโลหะทั้งสองจะทำให้ความเข้มของสนามไฟฟ้ามีค่าน้อยลง ที่เป็นดังนี้เพราะสนามไฟฟ้าเดิมทำให้โมเลกุลของฉนวนกลายเป็นโมเลกุลไดโพล โมเลกุลนี้จะสร้างสนามไฟฟ้าออกต้านสนามไฟฟ้าเดิม ทำให้ความเข้มของสนามน้อยลง แต่ถ้าเราต่อไฟกระแสสลับเข้ากับแผ่นโลหะทั้งสอง ทิศของโมเลกุลไดโพลก็จะเปลี่ยนกลับไปกลับมาตามไฟกระแสสลับนั้นด้วย ถ้าความถี่สูงพอโมเลกุลไดโพลจะกลับตัวไม่ทัน จะไม่สามารถสร้างสนามไฟฟ้าต้านสนามเดิมได้ หรือในกรณีที่สารฉนวนเป็นของเหลว ที่ความถี่สูงๆโมเลกุลจะไม่สามารถกลับตัวตามทิศทางของสนามไฟฟ้าเดิมได้ ในกรณีนี้ค่าคงที่ไดอิเลคตริกจะลด

ลง ยิ่งความถี่สูงก็ยิ่งลดลงมาก สำหรับสารพวกนี้การศึกษาค่าคงที่ไดอิเลคตริกที่ความถี่สูงๆ ก็จะทำให้เราทราบลักษณะโครงสร้าง และคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโมเลกุลได้ดีขึ้น

๑.๒ จุดมุ่งหมาย

ในการวิจัยครั้งนี้ได้ตั้งจุดมุ่งหมายเอาไว้ด้วยกันสองประการคือ ประการแรกจะทำการศึกษาและหาวิธีที่เหมาะสมกับการวัดค่า κ ของสารตัวอย่างโดยยึดถือเอาเครื่องมือและอุปกรณ์เท่าที่มีอยู่หรือเท่าที่จะหามาได้จากที่ต่างๆภายในประเทศเป็นหลัก และประการสุดท้ายจะศึกษาพฤติกรรมของสารพวกที่มีโพลา โมเลกุล ซึ่งมีปฏิกริยาต่อสนามไฟฟ้าที่ความถี่สูง

๑.๓ การดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยเพื่อวัดค่าคงที่ไดอิเลคตริก(κ)ของสาร เราได้แบ่งสารตัวอย่างออกเป็นสองพวกด้วยกันซึ่งได้แก่ พวกที่ไม่ดูดกลืนพลังงานและพวกที่ดูดกลืนพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า พวกแรกสารตัวอย่างที่เป็นของแข็งคือ โพลีเอทธิลีน(POLYETHYLENE) การที่เราเลือกใช้โพลีเอทธิลีนก็เพราะว่า หาได้ง่ายและอยู่ในรูปที่เป็นสารบริสุทธิ์ ใช้กันแพร่หลาย และยังใช้ประโยชน์ในการที่จะตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องมือได้อีกทางหนึ่ง ซึ่งเราจะแยกวัดเป็นสองวิธี วิธีแรกวัดโดยใช้โพรงกลม(CIRCULAR CAVITY) วิธีที่สองโดยการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน(T) ส่วนสารตัวอย่างที่เป็นของเหลวได้แก่ เฮพเทน(HEPTANE)และคาร์บอนเทตระคลอไรด์(CARBONTETRACHLORIDE) เราจะวัดโดยใช้แมจิกที(MAGIC TEE) และพวกหลังเราใช้สารตัวอย่างที่จะวัดคือ เอทธิลีน ไกลคอล(ETHYLENE GLYCOL)และน้ำ ซึ่งจะทำการวัดโดยวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนผิวของสาร การทดลองและผลลัพธ์จะแสดงเอาไว้ในบทที่ ๔ และในบทสุดท้ายคือบทที่ ๕ เราจะวิจารณ์ถึงผลลัพธ์ที่ได้โดยละเอียด

๑.๔ คุณสมบัติของไดอิเลคตริกในทางฟิสิกส์

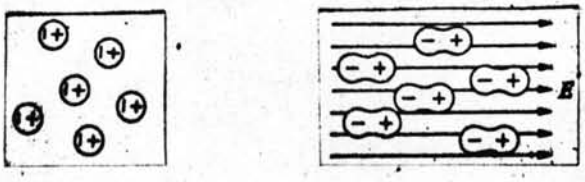
ในการที่เราสอดแผ่นไดอิเลคตริกลงไปในระหว่างแผ่นโลหะที่วางขนานกันของคาปาซิเตอร์ที่ถูกอัดไว้แล้วด้วยประจุ Q_f แล้วทำให้ความต่างศักย์(V)ระหว่างแผ่นของคาปาซิเตอร์ลดลง ผลลัพธ์ที่ได้คือความจุ(C)มากขึ้น จึงเกิดปัญหาขึ้นว่าทำไมจึงเป็นอย่างนั้น ในการที่จะแก้ปัญหาอันนี้เราจะเริ่มต้นจากข้างในเนื้อของไดอิเลคตริกดังนี้

อันเนื่องมาจากว่าโมเลกุลที่ประกอบกันขึ้นเป็นเนื้อของไดอิเลคตริกในทางไฟฟ้าแล้วได้จัดแบ่งออกเป็นสองแบบด้วยกันคือ พวกนอนโพลา โมเลกุล(NONPOLAR MOLECULE)ซึ่งหมายถึงจุดศูนย์ถ่วงของนิวเคลียสกับอิเลคตรอนอยู่ที่เดียวกัน และพวกโพลา โมเลกุล มีจุดศูนย์ถ่วงไม่อยู่ในที่เดียวกัน พวกนอนโพลา โมเลกุลเมื่ออยู่ภายใต้อำนาจของสนามไฟฟ้าประจุมันจะแยกออกจากกันและจะเรียงตัวไปตามทิศทางของสนาม ส่วนพวกโพลา โมเลกุลนั้นจะมีไดโพลถาวร(PERMANENT DIPOLE = $\vec{p}$) ไดโพลพวกนี้จะเรียงรายกันอยู่อย่างไม่เป็นระเบียบต่อเมื่ออยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามจึงจะพยายามเรียงตัวกันเป็นแถวตามแนวของทิศทางของสนามไฟฟ้า จะเรียงตัวกันได้มากน้อยแค่ไหนก็ขึ้นอยู่กับความเข้มของสนามด้วย ดูรูปที่ ๑.๑ และรูปที่ ๑.๒

การที่ประจุไฟฟ้าของโมเลกุลมีการย้ายที่นั้นเราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าโพลาไรเซชัน (POLARIZATION = $\vec{P}$) ถ้าในหนึ่งหน่วยปริมาตรมีจำนวนโมเลกุลอยู่เท่ากับ N เราจะได้ว่า

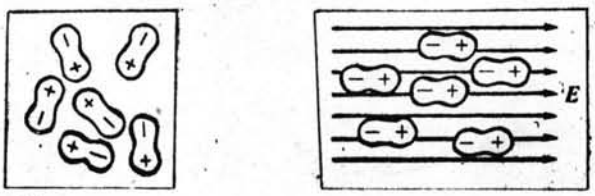
$$\vec{P} = N\vec{p} \qquad (๑.๔.๑)$$

โดยที่ $\vec{p}$ คือไดโพลซึ่งกำหนดเป็นผลคูณของประจุอันใดอันหนึ่งที่ทำให้เกิดไดโพลกับระยะทางที่ประจุทั้งสองอยู่ห่างกัน และ $\vec{p}$ จะเป็นไดโพลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร



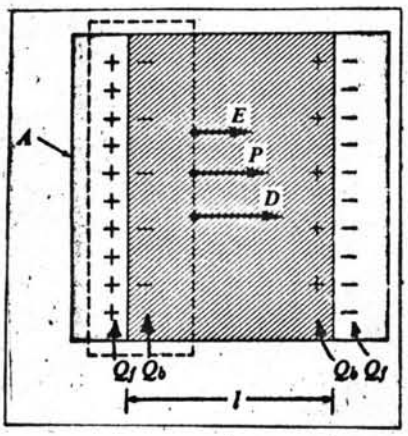
(ก) (ข)

รูปที่ ๑.๑ นอนโพลา โมเลกุล (ก) เมื่อไม่มีสนาม และ (ข) เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า



(ก) (ข)

รูปที่ ๑.๒ โพลา โมเลกุล (ก) เมื่อไม่มีสนาม และ (ข) เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า



รูปที่ ๑.๓ โพลาไรเซชัน

พิจารณารูปที่ ๑.๓ จากสมการ(๑.๔.๑)ทำให้เราได้

$$P = \frac{Q_b l}{A l} = \frac{Q_b}{A} \qquad (๑.๔.๒)$$

โดยที่ Q_b คือประจุที่ถูกชักนำให้เกิดขึ้นที่ผิวของไดอิเลคตริก A คือพื้นที่ของแผ่นโลหะ l คือระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะทั้งสอง เมื่อสร้างผิวปิดคลุมตามแนวของเส้นประ และโดยอาศัยกฎของเกาส์(GAUSS' LAW)เราจะได้อินทิกราล(INTEGRAL)ของ $\vec{P}$ ออกมาเป็น

$$\oint \vec{P} \cdot d\vec{A} = - Q_b \qquad (๑.๔.๓)$$

การที่ทางขวาของสมการ(๑.๔.๓)เป็นลบเพราะว่า $\vec{P}$ พุ่งออกมาจากผิวปิดที่มีประจุ Q_b เป็นลบ สนามไฟฟ้าลัพธ์($\vec{E}$)ที่จุดใดๆเป็นสนามที่ได้จากประจุที่อยู่บนโลหะ(Q_f)กับสนามอันเนื่องมาจากประจุบนไดอิเลคตริก(Q_b) ดังนั้นในแบบอินทิกราลจึงได้เป็น

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{1}{\epsilon_o} (Q_f + Q_b)$$

แทน Q_b ลงไปเราจะได้

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{1}{\epsilon_o} \left(Q_f - \oint \vec{P} \cdot d\vec{A} \right)$$

หรือ

$$\oint (\epsilon_o \vec{E} + \vec{P}) \cdot d\vec{A} = Q_f \qquad (๑.๔.๔)$$

กำหนดให้ปริมาณขจัด $\vec{D}$ คือ

$$\vec{D} = \epsilon_o \vec{E} + \vec{P} \qquad (๑.๔.๕)$$

เพราะฉะนั้นเราจะได้

$$\oint \vec{D} \cdot d\vec{A} = Q_f \qquad (๑.๔.๖)$$

คุณสมบัติอีกอย่างหนึ่งของไดอิเลคตริกคือมีซัสเซบติบิลิตี(χ)ซึ่งกำหนดได้จากสมการ

$$\vec{P} = \chi \epsilon_o \vec{E} \qquad (๑.๔.๗)$$

จะพบว่าถ้าไดอิเลคตริกมี χ ยิ่งมากก็ยิ่งจะทำให้ $\vec{P}$ มากด้วย แต่ในสูญญากาศเนื่องจากว่าไม่มีโพลาไรเซชัน ดังนั้น $\chi = 0$ จากสมการ(๑.๔.๕)เราสามารถเปลี่ยนปริมาณขจัดให้อยู่ในรูปของซัสเซบทิบิลิตีได้ดังนี้

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \epsilon_0 \left(1 + \frac{\vec{P}}{\epsilon_0 \vec{E}}\right) \vec{E} = \epsilon_0 (1 + \chi) \vec{E} \qquad (๑.๔.๘)$$

กำหนดให้ค่าคงที่ไดอิเลคตริกเป็น

$$\kappa = 1 + \chi \qquad (๑.๔.๙)$$

เพราะฉะนั้นเราจะได้

$$\vec{D} = \epsilon_0 \kappa \vec{E} \qquad (๑.๔.๑๐)$$

และเรียกผลคูณ $\epsilon_0 \kappa$ ว่าเปอมิตติวิตี(ϵ) ดังนั้น

$$\epsilon = \epsilon_0 \kappa \qquad (๑.๔.๑๑)$$

เพราะฉะนั้น(๑.๔.๑๐)จึงกลายเป็น

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \qquad (๑.๔.๑๒)$$

สำหรับสูญญากาศค่า $\kappa = 1$ และ $\epsilon = \epsilon_0$ จึงมีเหตุผลที่เรียก ϵ_0 ได้ว่าเปอมิตติวิตีของสูญญากาศ

ถ้าเราให้ V เป็นความต่างศักย์เมื่อระหว่างแผ่นโลหะของคาปาซิเตอร์มีไดอิเลคตริก V_0 เป็นความต่างศักย์เมื่อคาปาซิเตอร์ไม่มีไดอิเลคตริก σ_f เป็นความหนาแน่นของประจุอิสระบนแผ่นโลหะ เราจะได้ความเข้มของสนามไฟฟ้า(E_0)เมื่อระหว่างแผ่นโลหะเป็นสูญญากาศคือ

$$E_0 = E_f = \frac{\sigma_f}{\epsilon_0}$$

และความต่างศักย์ V_0 เป็น

$$V_0 = E_0 l = E_f l$$

โดยที่ l คือระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะทั้งสอง

แต่เมื่อสอดไดอิเลคตริกเข้าไป ประจุ σ_b ในไดอิเลคตริกจะสร้างสนามไฟฟ้า(E_b) ต้านสนามไฟฟ้า E_f ซึ่ง E_b กำหนดเป็น

$$E_b = \frac{\sigma_b}{\epsilon_0}$$

ผลลัพธ์ของความเข้มสนามไฟฟ้าที่ได้จึงเป็น

$$E = E_f - E_b = E_f - \frac{\sigma_b}{\epsilon_0}$$

แต่เพราะว่า

$$\sigma_b = P = \chi \epsilon_0 E$$

ดังนั้นจึงได้

$$E = E_f - \frac{\chi \epsilon_0 E}{\epsilon_0} = E_f - \chi E$$

หรือ

$$E = \frac{E_f}{1+\chi} = \frac{E_f}{\kappa} \qquad (๑.๔.๑๓)$$

ความต่างศักย์ V คือ

$$V = El = \frac{E_f l}{\kappa} = \frac{V_0}{\kappa} \qquad (๑.๔.๑๔)$$

เพราะฉะนั้นจะเห็นได้ว่าเมื่อสอดไดอิเลคตริกเข้าไปจะทำให้ความต่างศักย์ระหว่างแผ่นโลหะทั้งสองลดลงด้วยตัวประกอบ $1/\kappa$ หรือถ้าเป็นในเทอมของความจุก็จะได้ดังนี้ เมื่อสูญญากาศในคาปาซิเตอร์ เราจะได้ความจุออกมาเป็น

$$C_0 = \frac{Q_f}{V_0} \qquad (๑.๔.๑๕)$$

แต่ถ้ามีไดอิเลคตริกในคาปาซิเตอร์ ความจุจะเป็น

$$C = \frac{Q_f}{V} = \frac{Q_f}{V_0/\kappa} = \kappa C_0 \qquad (๑.๔.๑๖)$$

ดังนั้นจะได้ว่าเมื่อสอดไดอิเลคตริกเข้าไปในคาปาซิเตอร์ความจุจะมากขึ้นเป็น κ เท่าของความจุเมื่อคาปาซิเตอร์มีแต่สูญญากาศ ถ้าคาปาซิเตอร์เป็นชนิดแผ่นโลหะขนาน ข้างในมีสูญญากาศจะได้ความจุเป็น

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 A}{l} \qquad (๑.๔.๑๗)$$

แต่ถ้ามีไดอิเลคตริกเราจะได้ความจุเป็น

$$C = \kappa C_0 = \frac{\kappa \epsilon_0 A}{l} = \frac{\epsilon A}{l} \qquad (๑.๔.๑๘)$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่าสำหรับไดอิเลคตริกแต่ละอันที่สอดเข้าไปในระหว่างแผ่นโลหะของคาปาซิเตอร์จะให้ค่าความจุและความต่างศักย์เพิ่มหรือลด ตามลำดับ ต่างกันทั้งนี้เพราะค่า ϵ ของวัสดุ

ฉนวนต่างกันนั่นเอง

สำหรับในโมเลกุลของสารไดอิเลคตริกพวกโพลาซึ่งมีไดโพลโมเมนต์ถาวร[1] เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้ามันจะพยายามเรียงตัวเพื่อให้ทิศทางของไดโพลชี้ไปทางเดียวกับสนาม ทั้งนี้เนื่องมาจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่บริเวณนั้น เราอาจหาไดโพลโมเมนต์($\vec{P}$)ของโมเลกุลโดยเฉลี่ยได้จากสมการ

$$\vec{P} = \alpha \vec{E} \qquad (๑.๔.๑๙)$$

โดยที่ α เป็นโพลาไรซ์อบิลิตี(POLARIZABILITY)ของโมเลกุล ถ้า N เป็นไดโพลต่อปริมาตร และถ้าสนามไฟฟ้าภายในสารไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เราจะได้โพลาไรเซชัน(P)เป็น

$$P = \mathcal{L} NE \qquad (๑.๔.๒๐)$$

ดังนั้น

$$\chi = \frac{P}{\epsilon_0 E} = \frac{N\alpha}{\epsilon_0} \qquad (๑.๔.๒๑)$$

และค่าคงที่ไดอิเลคตริก κ จะเขียนได้เป็น

$$\kappa = \chi + 1 = 1 + \frac{N\alpha}{\epsilon_0} \qquad (๑.๔.๒๒)$$

ในกรณีที่ไดอิเลคตริกพวกโพลาโดยเฉพาะพวกที่เป็นของเหลวเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้าที่มีความถี่สูง กล่าวคือ

$$E = E_0 e^{j\omega t}$$

ค่าโพลาไรซ์อบิลิตีจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าความถี่ ω ตามสมการ[2]

$$\alpha(\omega) = \frac{\alpha_0}{1 + j\omega\tau} \qquad (๑.๔.๒๓)$$

โดยที่ α_0 เป็นโพลาไรซ์อบิลิตีที่ได้จากสนามของกระแสตรง τ คือเวลาการผ่อนคลายของ

---

(1) Kittel, C. 1971, Introduction to Solid State Physics, New York: John Wiley & Sons, Inc.

(2) Debye, P. 1929, Polar Molecules, New York: Chemical Catalog Co., Chap.V.

เกอบาย(DEBYE RELAXATION TIME=τ)ซึ่งหมายถึงเวลาที่ระบบถูกรบกวนแล้วกลับคืนสู่สภาพปกติ และเรียก$1/\tau$ว่าความถี่การผ่อนคลาย ถ้าความถี่ของสนามที่ใช้สูงกว่าความถี่การผ่อนคลายแล้ว จะเป็นผลทำให้ระบบอันนั้นไม่ตอบสนองหรือว่าไม่มีปฏิกริยาต่อสนามนั้นเลย จากการที่ α เป็นฟังก์ชันของความถี่ จึงเป็นผลทำให้ค่า κ ของไดอิเลคตริกเป็นฟังก์ชันของความถี่ด้วย และเพื่อความสะดวกจึงเขียน κ เป็นแบบเชิงซ้อนคือเขียนได้เป็น

$$\kappa = \kappa' - j\kappa'' \qquad (๑.๔.๒๔)$$

สำหรับโพลาไรซ์อบิลิตีตามสมการ(๑.๔.๒๓) และสนามไฟฟ้าเป็นสนามไฟฟ้าที่แปรตามค่าความถี่ ω เราจะได้ κ ของไดอิเลคตริกเป็น

$$\kappa = \kappa' - j\kappa'' = 1 + \frac{\alpha_0 N}{\epsilon_0(1+j\omega\tau)} \qquad (๑.๔.๒๕)$$

จากสมการ(๑.๔.๒๕)เมื่อจัดรูปใหม่จะได้

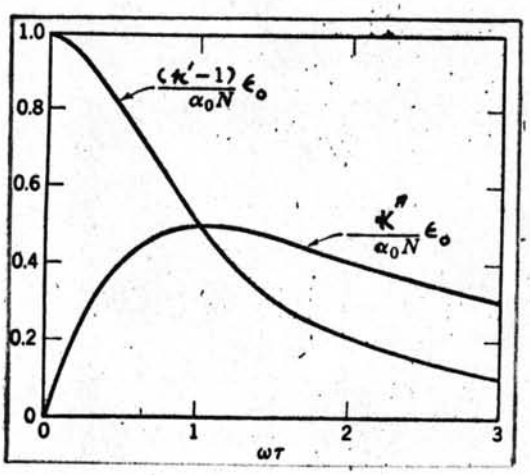
$$\kappa = 1 + \frac{\alpha_0 N}{\epsilon_0(1+\omega^2\tau^2)} - j\frac{\alpha_0 N}{\epsilon_0(1+\omega^2\tau^2)} \qquad (๑.๔.๒๖)$$

หรือ

$$\kappa' = 1 + \frac{\alpha_0 N}{\epsilon_0(1+\omega^2\tau^2)} \qquad (๑.๔.๒๗)$$

$$\kappa'' = \frac{\alpha_0 N\omega\tau}{\epsilon_0(1+\omega^2\tau^2)} \qquad (๑.๔.๒๘)$$

เมื่อนำสมการ(๑.๔.๒๗) และสมการ(๑.๔.๒๘)ไปเขียนกราฟโดยให้เป็นฟังก์ชันของผลคูณ$\omega\tau$ เราจะได้ดังรูปที่ ๑.๔



รูปที่ ๑.๔ ส่วนจริง(κ')และส่วนจินตภาพ(κ'')ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่

จากรูปที่ ๑.๔ จะเห็นได้ว่าค่าของ ε' ที่ลดลงนั้นเกิดขึ้นตรงบริเวณใกล้ๆจุดยอดของ ε'' ซึ่งอันนี้เป็นตัวอย่างอันหนึ่งที่ได้จากผลลัพธ์ทั่วๆไปในกรณีที่ $\varepsilon'(\omega)$ มีการเปลี่ยนค่าไปตามค่าความถี่ จึงทำให้ $\varepsilon''(\omega)$ เปลี่ยนค่าไปกับความถี่ด้วย

ในการวิจัยโดยตลอดเราใช้สนามที่มีความถี่สูงคือเป็นความถี่ของไมโครเวฟโดยเฉพาะใช้แถบเอ็กซ์ ในการวัดค่า ε ของสารตัวอย่างทั้งที่เป็นของแข็งและของเหลว . ดังจะได้กล่าวไว้โดยละเอียดในบทที่ ๔