

บทที่ 2

ทฤษฎี

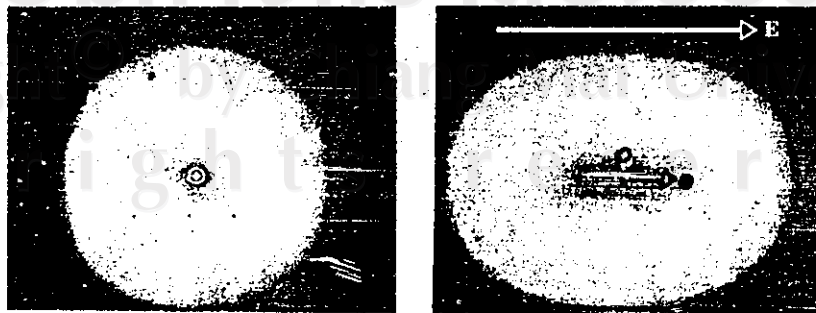
2.1 ไดอิเล็กทริกส์ (Dielectrics) (3,4,5,6)

ไดอิเล็กทริกส์ เป็นสารพวกหนึ่งที่คุณสมบัติพื้นฐานทางไฟฟ้าของมัน สามารถถูกทำให้เกิดเป็นขั้ว (polarized) ได้ สารพวกนี้จะมีความต้านทานไฟฟ้าสูงมาก จนกระทั่งไฟฟ้ากระแสตรงไม่สามารถที่จะเคลื่อนที่ผ่านไปได้

โมเลกุลของเนื้อสารที่ประกอบกันเป็น ไดอิเล็กทริกส์ อาจแบ่งเป็น 2 พวก คือ

1. โมเลกุลที่ไม่มีขั้ว (nonpolar molecules)
2. โมเลกุลที่มีขั้ว (polar molecules)

โมเลกุลที่ไม่มีขั้ว อะตอมจะมีลักษณะเป็นทรงกลมบริสุทธิ์ จุดศูนย์กลางของมวลของประจุลบหรืออิเล็กตรอนอยู่ที่เดียวกับประจุบวกหรือนิวเคลียส ดังนั้นอะตอมจะไม่มีไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้า (electric dipole moment) รูป 2.1 (ก) อย่างไรก็ตาม เราอาจทำให้อะตอมมีไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าได้ โดยการผ่านสนามไฟฟ้าไปบนอะตอม สนามไฟฟ้าจะแยกจุดศูนย์กลางของมวลของประจุลบ (อิเล็กตรอน) และประจุบวก (นิวเคลียส) ออกจากกัน ทำให้อะตอมเกิดเป็นขั้ว (polarized) และเกิดไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าขึ้นมา ตามรูป 2.1 (ข)

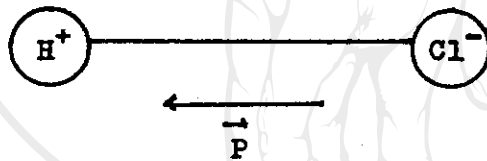


รูปที่ 2.1

- (ก) แสดงลักษณะอะตอม จุดศูนย์กลางของมวลของประจุบวกและประจุลบอยู่ที่เดียวกัน
- (ข) เมื่อผ่านสนามไฟฟ้า E เข้าไป จุดศูนย์กลางของมวลของประจุบวกและประจุลบไม่อยู่ที่เดียวกัน เกิดไดอิเล็กทริกไดโพล

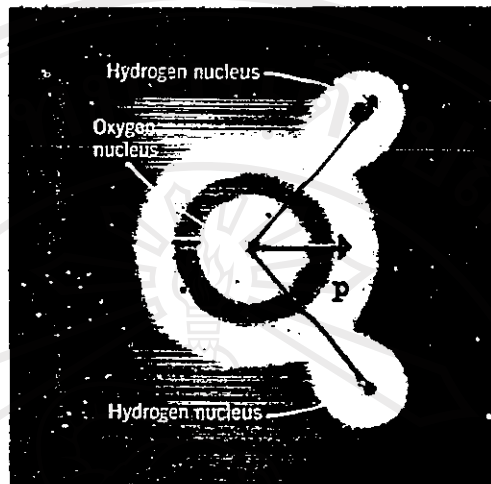
ไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น เราเรียกว่า ไดโพลโมเมนต์เหนี่ยวนำ (induced dipole moment) ไดโพลโมเมนต์เหนี่ยวนำนี้จะมีทิศเดียวกับทิศทางของสนามไฟฟ้า ดังนั้นถ้าเรานำไดอิเล็กตริกไปวางไว้ในสนามไฟฟ้า อะตอมหรือโมเลกุลของมันจะเกิด ไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้า ซึ่งมีผลทำให้ไดอิเล็กตริกนั้นเกิดมีขั้วไฟฟ้าขึ้นมา

ส่วนโมเลกุลที่มีขั้ว จุดศูนย์กลางของมวลของประจุลบและประจุบวก ไม่อยู่ที่เดียวกัน ดังนั้นจึงเกิดมีไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าอยู่ในตัว เราเรียกว่า ไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าอย่างถาวร (permanent electric dipole moment) ตัวอย่างเช่น โมเลกุลของกรดเกลือ (HCl) (รูปที่ 2.2)



รูปที่ 2.2 แสดงโมเลกุลที่มีขั้วของกรดเกลือและไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

อิเล็กตรอนของไฮโดรเจนใช้เวลาในการเคลื่อนที่รอบอะตอมของคลอรีนนานกว่าเคลื่อนที่รอบอะตอมของไฮโดรเจนเอง ดังนั้นจุดศูนย์กลางของมวลของประจุลบและประจุบวกไม่อยู่ที่เดียวกัน ทำให้โมเลกุลเกิดมีไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าในทิศทางพุ่งออกจากอะตอมของคลอรีนไปยังอะตอมของไฮโดรเจนในโมเลกุลของน้ำ เมื่อไฮโดรเจน 2 อะตอมเกาะเกี่ยวกับออกซิเจน 1 อะตอม อิเล็กตรอนจะเกาะกลุ่มกันอยู่รอบ ๆ อะตอมของออกซิเจน ทำให้บริเวณอะตอมของออกซิเจนเป็นลบ เมื่อเทียบกับอะตอมของไฮโดรเจนทำให้เกิด ไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้า (รูปที่ 2.3)

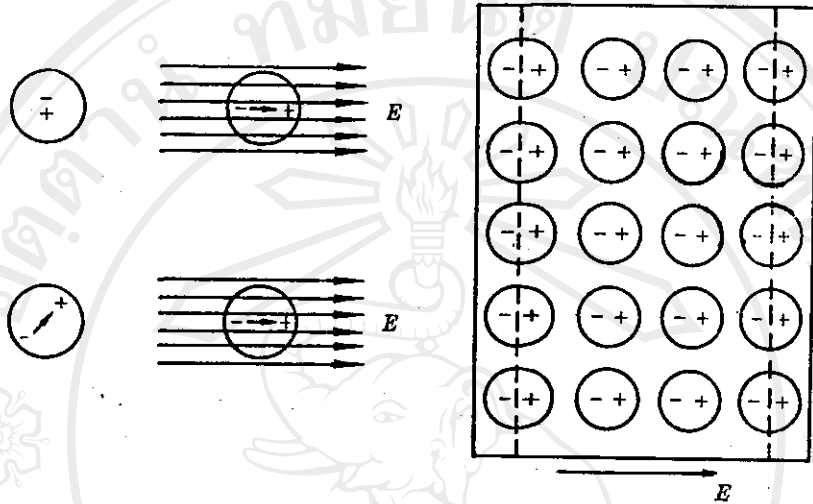


รูปที่ 2.3 แสดงโมเลกุลที่มีขั้วของน้ำและ ไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

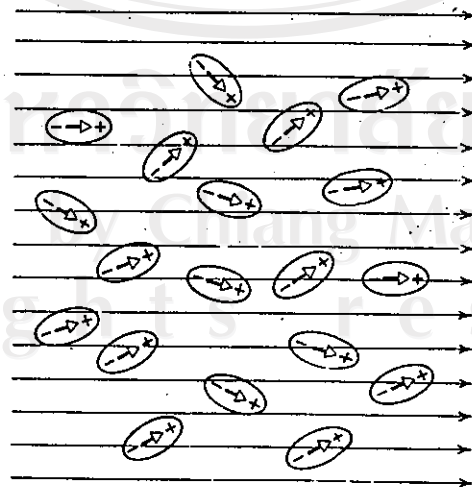
ไดอิเล็กตริกที่มีโมเลกุลที่มีขั้ว จะมีไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าอย่างถาวร เมื่อไม่มีสนามไฟฟ้าจากภายนอก ไดโพลโมเมนต์เหล่านี้จะวางตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ (รูปที่ 2.4) แต่เมื่อมีสนามไฟฟ้า ไดโพลโมเมนต์จะหมุนไปวางตัวในทิศทางของสนามไฟฟ้าอย่างเป็นระเบียบ ถ้าไม่มีอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุล (รูปที่ 2.5) และถ้าโมเลกุลได้รับการกระทบกระเทือนหรือเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุล จะทำให้ไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าวางตัวเป็นระเบียบแต่ไม่สมบูรณ์ (รูปที่ 2.6)



รูปที่ 2.4 แสดงการวางตัวของไดโพลโมเมนต์ของโมเลกุลที่มีขั้ว
เมื่อไม่มีสนามไฟฟ้า



รูปที่ 2.5 แสดงการวางตัวของไดโพล โมเมนต์ของโมเลกุลที่มีขั้ว
เมื่อมีสนามไฟฟ้า แต่ไม่มีอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุล

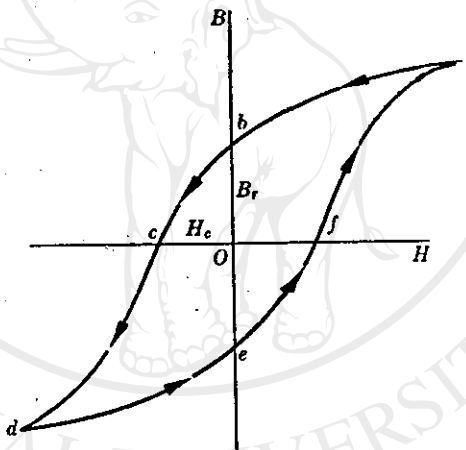


รูปที่ 2.6 แสดงการวางตัวของไดโพล โมเมนต์ของโมเลกุลที่มีขั้ว
เมื่อมีสนามไฟฟ้าและมีอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุล

ลิขสิทธิ์ © Chiang Mai University
All rights reserved

2.2 สารเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric substance)^(5,6)

มีไดอิเล็กตริกพวกหนึ่ง ที่ความสัมพันธ์ระหว่างการขจัดทางไฟฟ้า (Electric displacement) D และความเข้มของสนามไฟฟ้า (Electric field strength) E ไม่เป็นแบบเชิงเส้น แต่เป็น Hysteresis รูปที่ 2.7 คล้ายกับความสัมพันธ์ระหว่างความเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (Magnetic induction) B กับความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Magnetic field strength) H ของสารเฟอร์โรแมกเนติก



รูปที่ 2.7 แสดง Hysteresis loop

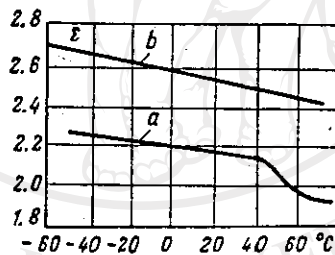
สารพวกนี้เมื่อถูกทำให้เกิดเป็นขั้วไฟฟ้า (polarized) โดยสนามไฟฟ้าขณะที่ยังเหลวอยู่ เมื่อปล่อยให้แข็งตัว มันยังรักษาสภาพการเป็นขั้วไว้ได้ แม้จะเอาสนามไฟฟ้านั้นออกไป นั่นคือเกิดมีไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าขึ้นอย่างถาวรในตัวมัน เราเรียกลักษณะนี้ว่า สารเฟอร์โรอิเล็กทริก สารเฟอร์โรอิเล็กทริกโดยทั่วไป จะมีคุณสมบัติเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกเฉพาะช่วงอุณหภูมิจำกัดช่วงหนึ่งเท่านั้น การแปรค่าของเพอร์มิตติวิตี (permittivity) ตามอุณหภูมิและคุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่าง ๆ ที่เป็นคุณสมบัติเฉพาะของเฟอร์โรอิเล็กทริก อาจอธิบายได้ด้วยอุณหภูมิค่าหนึ่ง ซึ่งเราเรียกว่า จุดคูรี (Curie point) ซึ่งที่อุณหภูมิต่ำนี้ เพอร์มิตติวิตีของสารจะมีค่าสูงสุดและสารนั้นจะสูญเสียคุณสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกไป เมื่ออุณหภูมิมีค่าเกินกว่าจุดคูรี

2.3 สิ่งที่มีผลต่อเพอร์มิตติวิตีของไดอิเล็กตริก ⁽⁶⁾

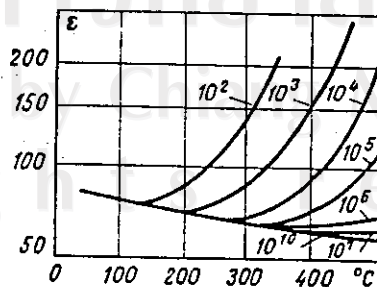
ค่าเพอร์มิตติวิตีของสารไดอิเล็กตริก จะมีค่ามากขึ้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบภายนอกหลาย ๆ อย่าง องค์ประกอบเหล่านั้น ได้แก่

1. อุณหภูมิ

ตามธรรมชาติอุณหภูมิจะไม่มีผลต่อกระบวนการโพลาไรเซชัน (Polarization) ของโมเลกุลของไดอิเล็กตริก แต่เนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่อการขยายตัวของวัตถุ อัตราส่วนระหว่างจำนวนโมเลกุลกับระยะที่มีผล (Effective length) ของไดอิเล็กตริกมีค่าน้อยลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังนั้นค่าเพอร์มิตติวิตีของไดอิเล็กตริกจึงมีค่าลดลงด้วย ดูรูปกราฟตามรูปที่ 2.8 และรูปที่ 2.9



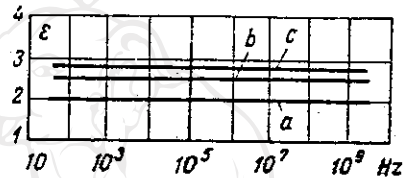
รูปที่ 2.8 แสดงกราฟระหว่างค่าของเพอร์มิตติวิตีกับอุณหภูมิ



รูปที่ 2.9 แสดงกราฟระหว่างค่าของเพอร์มิตติวิตีกับอุณหภูมิของสารประกอบดีตาเนียม (ตัวเลขที่เขียนใกล้เส้นกราฟคือ ค่าของความถี่)

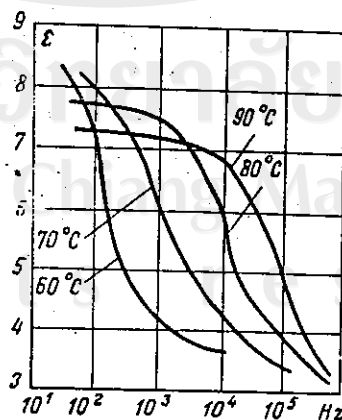
2. ความถี่

โดยที่เวลาที่ใช้ในการเกิดโพลาริเซชันของโมเลกุลของสารไดอิเล็กตริก มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนค่าความต่างศักย์จากบวกเป็นลบ หรือจากลบเป็นบวกของไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นค่าเพอร์มิตติวิตีของไดอิเล็กตริกชนิดโมเลกุลไม่มีขั้ว (nonpolar dielectric) จึงไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ตามรูปกราฟในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงกราฟระหว่างค่าของเพอร์มิตติวิตีกับความถี่ของ nonpolar dielectric

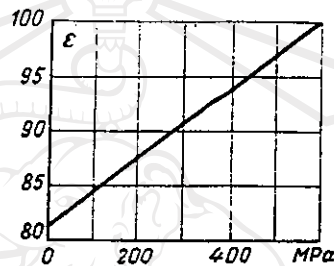
สำหรับไดอิเล็กตริกชนิดโมเลกุลมีขั้ว (polar dielectric) เมื่อความถี่มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าเพอร์มิตติวิตีจะลดลง ตามรูปกราฟในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงกราฟระหว่างค่าของเพอร์มิตติวิตีกับความถี่ของ polar dielectric

3. ความดัน

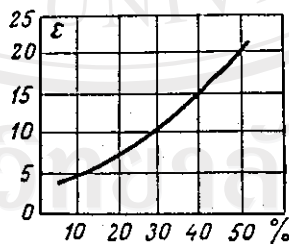
โดยที่ความดันมีผลต่อความหนาแน่นของสาร เมื่อความดันมีค่าเพิ่มขึ้น จำนวนของโมเลกุลต่อ 1 หน่วย ปริมาตรของสารมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นจะมีผลทำให้ค่าเพอร์มิตติวิตีของสารเพิ่มขึ้น ตามรูปกราฟรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงกราฟระหว่างค่าเพอร์มิตติวิตีกับความดัน

4. ความชื้น

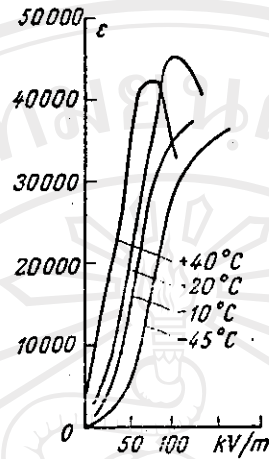
ค่าเพอร์มิตติวิตีของไดอิเล็กตริกจะเปลี่ยนแปลงไปตามความชื้น กล่าวคือเมื่อความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าเพอร์มิตติวิตีจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ตามรูปกราฟรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงกราฟระหว่างค่าเพอร์มิตติวิตีกับความชื้น

5. ความต่างศักย์

ความต่างศักย์ที่เราให้แก่ไดอิเล็กตริกมีผลต่อสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น และโดยที่สนามไฟฟ้าไม่มีผลต่อค่าของเพอร์มิตติวิตีของไดอิเล็กตริกโดยทั่วไป ยกเว้นสารพวกเฟอร์โรอิเล็กตริก ดังนั้นความต่างศักย์จึงไม่มีผลต่อค่าเพอร์มิตติวิตีของไดอิเล็กตริกทั่วไป แต่มีผลต่อสารเฟอร์โรอิเล็กตริก กล่าวคือ เมื่อเพิ่มค่าความต่างศักย์ที่ให้กับสาร จะมีผลทำให้สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเพิ่มขึ้น ค่าเพอร์มิตติวิตีจะเพิ่มขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปกราฟรูปที่ 2.14



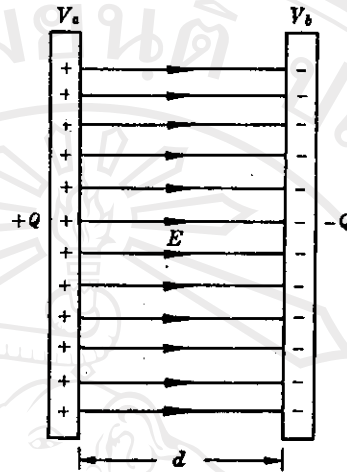
รูปที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอร์มิตติวิตีกับความเข้มของสนามไฟฟ้า

2.4 ตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน (Parallel plate capacitor) (4,5)

ประกอบด้วย แผ่นโลหะตัวนำ 2 แผ่นวางขนานกัน โดยมีระยะระหว่างแผ่นน้อยมาก เมื่อเทียบกับขนาดของแผ่นโลหะ

เมื่อเราต่อแผ่นวัตถุทั้งสองเข้ากับขั้วบวกและขั้วลบของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า จะมีผลทำให้เกิด

1. สนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสม่ำเสมอระหว่างแผ่นวัตถุทั้งสอง มีทิศพุ่งจากแผ่นที่ต่อกับขั้วบวกสู่แผ่นที่ต่อกับขั้วลบ
2. ประจุไฟฟ้าชั้นที่ผิวของแผ่นวัตถุทั้งสอง ซึ่งประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีจำนวนเท่ากัน แต่ต่างชนิดกัน.
3. ความต่างศักย์ระหว่างแผ่นวัตถุทั้งสอง



รูปที่ 2.15 แสดงตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน

ในกรณี ถ้า E - ความเข้มของสนามไฟฟ้า
 V - ความต่างศักย์ระหว่างแผ่นวัตถุ
 d - ระยะห่างระหว่างแผ่นวัตถุทั้งสอง

เราจะได้ว่า
$$E = \frac{V}{d} \quad (2.1)$$

อัตราส่วนระหว่างประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนแผ่นวัตถุกับความต่างศักย์ระหว่างแผ่นวัตถุทั้งสองจะมีค่าคงที่สำหรับแผ่นวัตถุแต่ละคู่ เราเรียกค่าคงที่นี้ว่า ความจุไฟฟ้า (Capacitance)

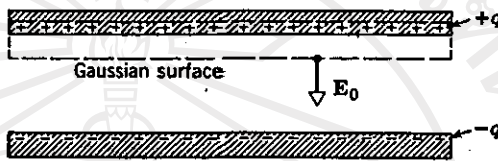
ถ้า q - ประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนแผ่นวัตถุ
 V - ความต่างศักย์ระหว่างแผ่นทั้งสอง
 C - ความจุไฟฟ้า

เราจะได้ว่า
$$C = \frac{q}{V} \quad (2.2)$$

หน่วยของความจุไฟฟ้าคือ คูลอมบ์ต่อโวลต์ เรานิยมเรียกว่า ฟารัด (Farad)

พิจารณาถึงแผ่นวัตถุตัวนำ 2 แผ่น ซึ่งแต่ละแผ่นมีพื้นที่หน้าตัด A วางอยู่ห่างกันเป็นระยะ d

1. เมื่อ ไม่มี ไดอิเล็กทริกอยู่ระหว่างแผ่นวัตถุ



รูปที่ 2.16 แสดงตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนานที่ไม่มี ไดอิเล็กทริกอยู่ระหว่างแผ่นจากการใช้กฎของเกาส์ ซึ่งมีรูปสมการ

$$\epsilon_0 \oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = q \tag{2.3}$$

เราจะได้ว่า

$$\epsilon_0 \oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = \epsilon_0 E_0 A = q$$

ดังนั้น

$$E_0 = \frac{1}{\epsilon_0} \frac{q}{A} \tag{2.4}$$

และ

$$E_0 = \frac{1}{\epsilon_0} \sigma \tag{2.5}$$

เมื่อ σ - ความหนาแน่นผิวของประจุไฟฟ้า (surface charge density) ซึ่งหมายถึง จำนวนของประจุไฟฟ้าในหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่มีหน่วยเป็นคูลอมบ์ต่อตารางเมตร

จากสมการ (2.1)

$$E = \frac{V}{d}$$

ในกรณีนี้

$$E_0 = \frac{V}{d}$$

$$V = E_0 d$$

จากสมการ (2.2)

$$C = \frac{q}{V}$$

ในกรณีนี้

$$C_0 = \frac{q}{V}$$

$$= \frac{q}{E_0 d}$$

$$= \frac{1}{\epsilon_0} \frac{q}{A} \cdot d$$

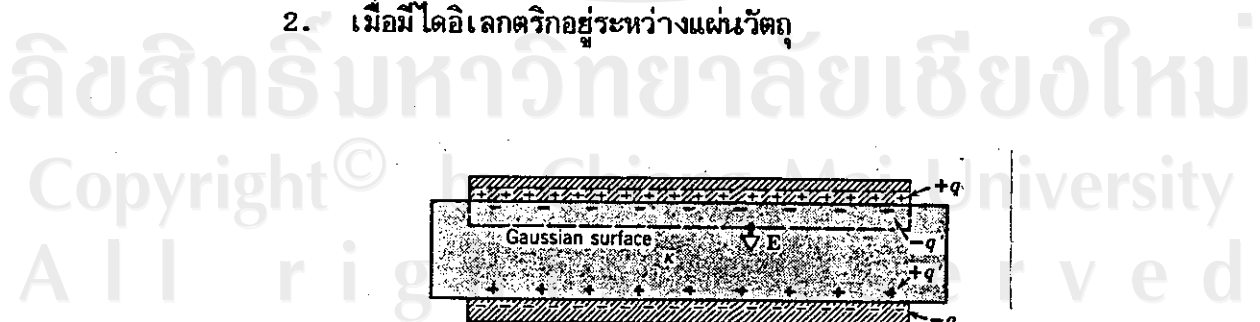
$$= \frac{\epsilon_0 A}{d}$$

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 A}{d}$$

(2.6)

สมการที่ได้นี้ เรานำไปใช้ในการหาค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน
 ที่ว ไบท์ที่ไม่มีไดอิเล็กทริกอยู่ระหว่างแผ่น

2. เมื่อมี ไดอิเล็กทริกอยู่ระหว่างแผ่นวัตถุ



รูปที่ 2.17 แสดงตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนานที่มี ไดอิเล็กทริกอยู่ระหว่างแผ่น

จากการใช้กฎของเกาส์ ตามสมการ (2.3)

เราจะได้ว่า
$$\epsilon_0 \oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = \epsilon_0 EA = q - q' \quad (2.7)$$

เมื่อ q' - ประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบน ไดอิเล็กทริก อันเนื่องมาจากการเหนี่ยวนำ

ดังนั้น
$$\epsilon_0 EA = q - q'$$

$$E = \frac{1}{\epsilon_0 A} (q - q')$$
(2.8)

จากการทดลองพบว่า

$$\frac{E}{E_0} = \epsilon_r \quad (2.9)$$

เมื่อ ϵ_r - ค่าคงที่ ซึ่งเราเรียกว่า เพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ (Relative permittivity) หรือค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant)

จากสมการ (2.9) เราอาจเขียน

$$E = \frac{E_0}{\epsilon_r}$$

แทนค่า E_0 จากสมการ (2.4) และ (2.5) จะได้

$$E = \frac{1}{\epsilon_r \epsilon_0} \frac{q}{A} \quad (2.10)$$

และ
$$E = \frac{1}{\epsilon_r \epsilon_0} \sigma \quad (2.11)$$

จากสมการ (2.1) $E = \frac{V}{d}$

ดังนั้น $V = Ed$

แทนค่า E จากสมการ (2.11) จะได้

$$V = \frac{1}{\epsilon_r \epsilon_0} \frac{qd}{A} \quad (2.12)$$

จากสมการ (2.2) $C = \frac{q}{V}$

แทนค่า V จากสมการ (2.12) จะได้

$$C = \frac{q}{\frac{1}{\epsilon_r \epsilon_0} \frac{qd}{A}}$$

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

$$C = \epsilon_r C_0 \quad (2.13)$$

นั่นคือ เราจะได้ว่า $\epsilon_r = \frac{C}{C_0} \quad (2.14)$

เราใช้สมการ (2.14) นี้ ในการหาค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์หรือค่าคงที่ ไดอิเล็กตริกของสารไดอิเล็กตริก

จากสมการ (2.8)

$$\begin{aligned} E &= \frac{1}{\epsilon_0 A} (q - q') \\ &= \frac{1}{\epsilon_0} \frac{q}{A} - \frac{1}{\epsilon_0} \frac{q'}{A} \end{aligned}$$

ย้ายข้าง

$$\frac{1}{\epsilon_0} \frac{q}{A} = E + \frac{1}{\epsilon_0} \frac{q'}{A}$$

$$\frac{q}{A} = \epsilon_0 E + \frac{q'}{A} \quad (2.15)$$

$\frac{q}{A}$ - ประจุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ เราเรียกว่า ความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า (electric flux density) หรือ การขจัดทางไฟฟ้า (electric displacement) \vec{D}

$\frac{q'}{A}$ - ประจุเหนี่ยวนำตามผิวไดอิเล็กตริกต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ซึ่งมีชื่อเรียกว่า โพลาริเซชันทางไฟฟ้า (electric polarization) \vec{P}

สมการ (2.15) อาจเขียนในรูป

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (2.16)$$

หรือในรูปของเวกเตอร์

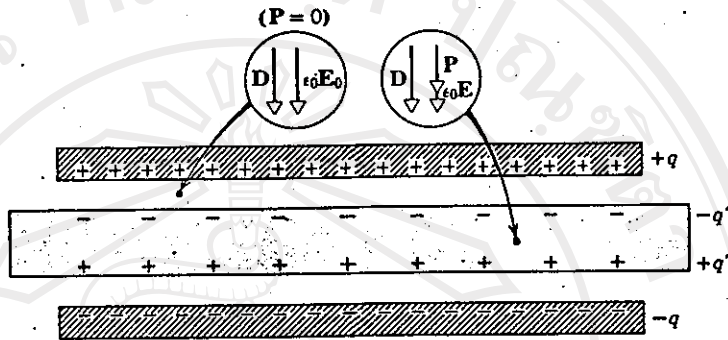
$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (2.17)$$

ในกรณีของตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนานที่มีไดอิเล็กตริกอยู่ระหว่างแผ่นนี้ กิศทางของ \vec{D} , \vec{E} และ \vec{P} จะมีทิศไปทางเดียวกัน ตามรูปที่ 2.18

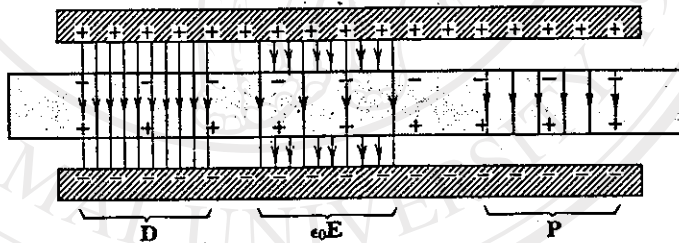
จากสิ่งที่เรานิยามผ่านมา จะเห็นว่า

1. \vec{D} เกิดจากประจุอิสระเท่านั้น เราสามารถเขียนเส้นแรงแทนสนาม \vec{D} ได้เช่นเดียวกับที่แทน \vec{E} ด้วยเส้นแรงไฟฟ้า เส้นแรงของ \vec{D} จะเริ่มต้นและสิ้นสุดที่ประจุอิสระ
2. \vec{P} เกิดจากประจุเหนี่ยวนำหรือประจุที่เกิดจากโพลาริเซชัน เขียนแทนได้ด้วยเส้นแรงของ \vec{P} โดยเส้นแรงของ \vec{P} นี้เริ่มต้นและสิ้นสุดที่ประจุเหนี่ยวนำ
3. \vec{E} เกิดจากประจุทุกแบบ ไม่ว่าจะ เป็นประจุอิสระหรือประจุเหนี่ยวนำ

เส้นแรงของ \vec{D} , \vec{P} และ \vec{E} แสดงตามรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.18 แสดงทิศทางของ \vec{D} , \vec{E} และ \vec{P} ในไดอิเล็กตริกและช่องว่างอากาศของตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน



รูปที่ 2.19 แสดงเส้นแรงของ \vec{D} , ของ \vec{P} และเส้นแรงไฟฟ้าของ \vec{E}

ปริมาณ D และ P อาจเขียนให้อยู่ในเทอมของ E ได้ โดยเริ่มต้นจาก

$$\frac{q}{A} = \epsilon_r \epsilon_0 \left(\frac{q}{\epsilon_0 \epsilon_r A} \right)$$

ดังนั้น

$$D = \epsilon_r \epsilon_0 E \tag{2.18}$$

เขียนในรูปของเวกเตอร์

$$\vec{D} = \epsilon_r \epsilon_0 \vec{E} \tag{2.19}$$

จากสมการ (2.16)

$$D = \epsilon_0 E + P$$

ย้ายข้าง จะได้

$$P = D - \epsilon_0 E$$

แทนค่า

$$D = \epsilon_r \epsilon_0 E \text{ จากสมการ (2.18)}$$

จะได้

$$P = \epsilon_r \epsilon_0 E - \epsilon_0 E$$

$$P = \epsilon_0 E (\epsilon_r - 1)$$

$$P = \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) E$$

(2.20)

เขียนในรูปของเวกเตอร์

$$\vec{P} = \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) \vec{E}$$

(2.21)

จากสมการ (2.21) จะเห็นว่า ในสุญญากาศซึ่งมี $\epsilon_r = 1$ นั้น โพลาริเซชัน $P = 0$ ซึ่งสามารถนำไปใช้ได้กับไดอิเล็กตริกทั่วไป ยกเว้น สารเฟอร์โรอิเล็กตริก เนื่องจากสารพวกนี้ยังคงมีค่า P อยู่ แม้ว่า $E = 0$ ก็ตาม

สมการ (2.21) นี้ ในบางครั้งอาจเขียนในรูปของ

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi_e \vec{E}$$

(2.22)

เมื่อ χ_e เป็น ปริมาณที่มีชื่อเรียกว่า สภาพอ่อนไหวทางไฟฟ้า (electric susceptibility) ของวัตถุ ซึ่งเป็นค่าคงที่และไม่มีหน่วย

จากสมการ (2.21) และ (2.22) จะเห็นว่า

$$X_c = \epsilon_r - 1$$

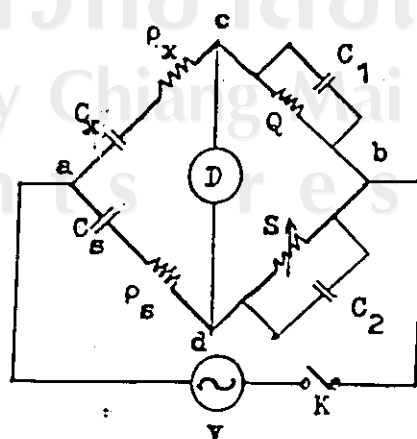
หรือ

$$\epsilon_r = 1 + X_c \quad (2.23)$$

สมการ (2.23) จะบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารกับสภาพอ่อนไหวทางไฟฟ้าของสารนั้น

2.5 วงจรเชริงบริดจ์ (Schering bridge) ^(2,7)

รูปที่ 2.19 แสดงวงจรที่เรียกว่า เชริงบริดจ์ (Schering bridge) เมื่อต่อต้นกำเนิดแรงดันเข้ากับวงจรที่แสดง จะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวงจรเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้เพราะว่าตัวเก็บประจุจะมีความต้านทานสูงที่ความถี่ของต้นกำเนิดที่ใช้กันทั่วไป เราใช้บริดจ์ชนิดนี้ในการเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) และค่าของภาคสิ้นเปลืองกำลัง (dissipative part) ของตัวเก็บประจุตัวที่เราต้องการวัดกับค่าเหล่านั้นของตัวเก็บประจุมาตรฐาน



รูปที่ 2.20 แสดงเชริง บริดจ์

ให้ p_x และ p_s ในรูป แทนตัวที่ทำให้เกิดความสูญเสียกำลังในสารที่เป็นไดอิเล็กทริกของ C_x และ C_s ตามลำดับ โดยเขียนให้เป็นตัวต้านทาน ให้ความหมายของการสูญเสีย (loss angles) เป็น θ_x และ θ_s ตามลำดับ ดังนี้

$$\tan \theta_x = \omega C_x p_x ; \quad \tan \theta_s = \omega C_s p_s \quad (2.24)$$

สภาวะสมดุล คือ

$$\frac{p_x + \frac{1}{j\omega C_x}}{p_s + \frac{1}{j\omega C_s}} = \frac{\frac{1}{S} + j\omega C_s}{\frac{1}{Q} + j\omega C_1} \quad (2.25)$$

เพราะฉะนั้น

$$\frac{C_x}{C_s} = \frac{S(1 - \omega^2 C_x C_1 p_x Q)}{Q(1 - \omega^2 C_s C_2 p_s S)} = \frac{S(C_x p_x + C_1 Q)}{Q(C_s p_s + C_2 S)} \quad (2.26)$$

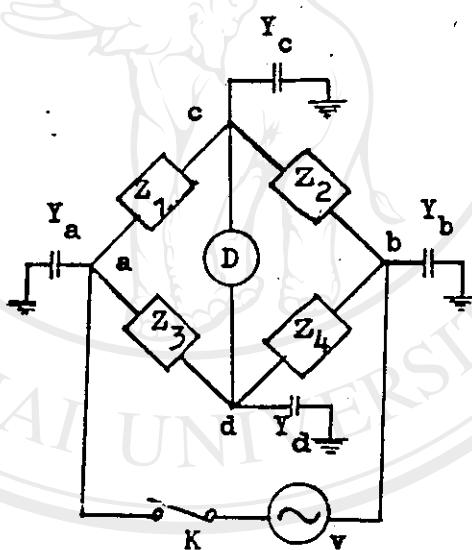
ตามปกติ มุมของการสูญเสียมีค่าน้อยประมาณ 10^{-3} เรเดียนหรือต่ำกว่านั้น ดังนั้น ในทางปฏิบัติจึงมักสร้างบริดจ์ขึ้นมา โดยให้ $\omega C_1 Q \ll 1$ และ $\omega C_2 S \ll 1$ ซึ่งจะทำได้ สภาวะสมดุลเหลือเพียง

$$C_x = C_s \frac{S}{Q} \quad (2.27)$$

$$\tan \theta_x - \tan \theta_s = \omega (C_2 S - C_1 Q) \quad (2.28)$$

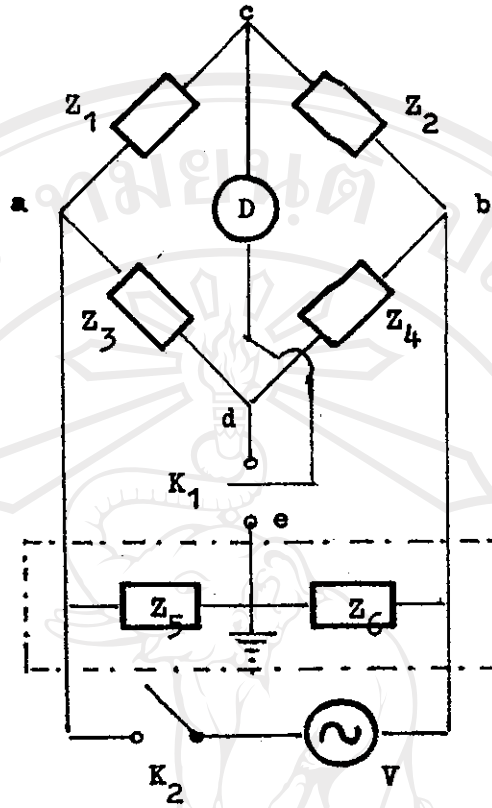
เราจึงสามารถเปรียบเทียบ C_x กับ C_s และ $\tan \theta_x$ กับ $\tan \theta_s$ ได้

ถ้าจะกล่าวให้ถูกต้องจริง ๆ แล้ว สภาวะสมดุลของบริดจ์ขึ้นอยู่กับความถี่ด้วย แต่ในทางปฏิบัติถือได้ว่าไม่ขึ้น อย่างไรก็ตาม มุมของกระแสเปลี่ยนขึ้นขึ้นอยู่โดยตรงกับความถี่ ดังจะเห็นได้จากสมการที่ (2.24) แต่ละส่วนของวงจรบริดจ์กระแสสลับจะมีค่าความจุไฟฟ้ากับดิน และเมื่อรวมค่านี้อเข้าในวงจรด้วยแล้ว จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.20 สภาวะสมดุลสำหรับวงจรมีคือ กระแสทั้งหมดที่ไหลผ่าน Z_1 จะต้องไหลผ่าน Z_2 และกระแสทั้งหมดที่ไหลผ่าน Z_3 จะต้องไหลผ่าน Z_4 และในขณะนั้นจะต้องไม่มีกระแสไหลผ่านดีเทคเตอร์ D ดังนั้นถ้าหากจุด c และ d ไม่ได้ต่อลงดินแล้ว แม้ว่าจะมีคีย์เท่ากัน ก็ไม่นับว่าเป็นสภาวะสมดุลที่ถูกต้อง

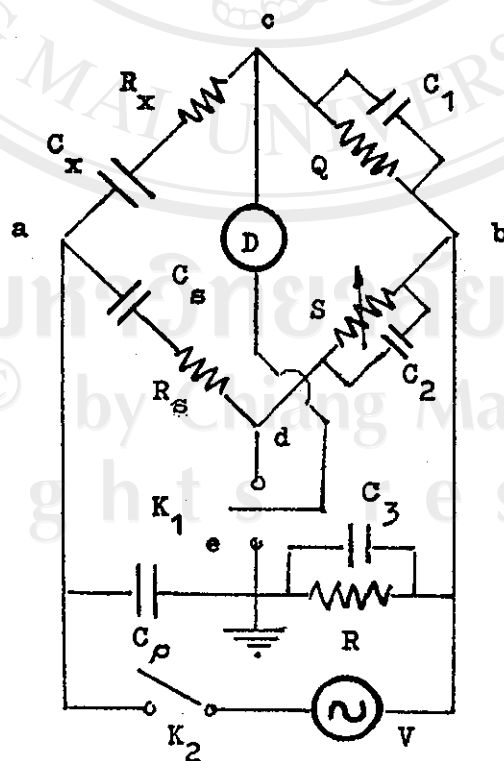


รูปที่ 2.21 แสดงบริดจ์กระแสสลับซึ่งมีค่าแอดมิตแตนซ์ลงดิน

เพื่อหลีกเลี่ยงความคลาดเคลื่อนนี้ เราจึงใช้อุปกรณ์ต่อลงดินของแวกเนอร์ (Wagner earthing device) ส่วนที่ล้อมรอบด้วยเส้นประในรูปที่ 2.21 เรียกว่า แขนอัตราส่วนลงดิน (earthing ratio arms) ซึ่งมีจุดต่อออกตรงกลาง (center tap) ต่อลงดิน ถ้าหากค่า D อ่านค่าศูนย์ ไม่ว่าจะ K_1 จะต่อกับ d หรือ e ก็ตาม แสดงว่าจุด c และ d มีคีย์เดียวกัน และทั้งสองจุดมีคีย์เท่ากับดิน ดังนั้นจึงไม่ต้องเขียนแสดง Y_c และ Y_d เหมือนในรูปที่ 2.20 เพราะไม่มีกระแสไหลผ่านและสภาวะสมดุลที่ว่า $Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3$ ก็จะเป็นไปโดยถูกต้อง ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แสดงบริดจ์กระแสสลับ ประกอบด้วยอุปกรณ์ต่อลงดินของแวกเนอร์



รูปที่ 2.23 แสดงเซริงบริดจ์ (ประกอบด้วยบริดจ์สำหรับต่อลงดิน)