บทที่ 3
ไฟฟ้าสถิตและไฟฟ้ากระแส
(Electrostatistics and electricity)

3.1 บทนำ

เมื่อกล่าวถึงไฟฟ้าในฟิสิกส์จะหมายถึง การพิจารณาวัสดุหรือสสารที่อยู่รอบ ๆ ตัว ซึ่งจะประกอบไปด้วยประจุไฟฟ้ามากมาย แต่เนื่องจากความเป็นกลางทางไฟฟ้าจึงไม่สามารถเห็นถึงอิทธิพลของประจุไฟฟ้าเหล่านั้นได้ แต่ถ้ามีการทำให้เกิดการสูญเสียประจุใดประจุหนึ่งไป จะทำให้เกิดความสูญเสียความเป็นกลางทางไฟฟ้า วัสดุนั้นก็จะมีสามารถแสดงปรากฏการณ์ที่เกิดจากประจุไฟฟ้าสถิตขึ้นได้ ประจุไฟฟ้ามีสองชนิดคือ ประจุไฟฟ้าบวก และประจุไฟฟ้าลบ ในบทนี้จะศึกษาไฟฟ้ากระแสตรง ทั้งความหมายและการประยุกต์ โดยเริ่มตั้งแต่ชนิดของประจุไฟฟ้า ปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าสถิต สนามไฟฟ้า เส้นแรงไฟฟ้า งานในการเคลื่อนประจุไฟฟ้า สนามไฟฟ้า พลังงานทางไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้า และกฎการอนุรักษ์พลังงาน การศึกษาการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า ซึ่งกลายเป็นกระแสไฟฟ้า ศึกษาวงจรไฟฟ้าอย่างง่าย ตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุ การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า การใช้กฎของเคอร์ชอฟฟ์ ซึ่งเป็นผลมาจากกฎการอนุรักษ์พลังงานและการอนุรักษ์ประจุไฟฟ้าสำหรับระบบโดดเดี่ยว วงจรส่วนใหญ่กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรจะมีค่าคงตัวทั้งขนาดและทิศทาง กระแสที่มีทิศทางการไหลคงตัวนี้ เรียกว่า กระแสตรง สำหรับไฟฟ้ากระแสตรง จะศึกษากฎของโอห์ม แรงเคลื่อนไฟฟ้า สภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุ ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของวัสดุต่างๆ และศึกษาไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งเป็นกระแสที่มีการเปลี่ยนทิศของการไหลเป็นช่วง ๆ ขึ้นกับเวลา จะกล่าวถึงการประยุกต์ใช้ เช่น หลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับที่มีอยู่ทุกครัวเรือน ประโยชน์ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่อยู่ในอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ ในชีวิตประจำวัน

3.2 ประจุไฟฟ้า (Charge)

วัสดุหรือสสารแต่ละชนิดจะมีประจุไฟฟ้าสะสมอยู่ซึ่งประจุไฟฟ้ามีอยู่สองชนิดคือประจุบวกและประจุลบ โดยทั่วไปถ้าไม่มีการทำให้เกิดการสูญเสียประจุวัสดุหรือสสารจะมีความเป็นกลางทางประจุไฟฟ้า นั่นคือมีประจุบวกเท่ากับประจุลบ สำหรับขนาดของประจุมีหน่วยเป็นคูลอมบ์ (C)

โดยภายในวัสดุหรือสสารจะประกอบไปด้วยอนุภาคส่วนที่เล็กที่สุดที่เป็นตัวกำหนดประจุจำนวน 3 ชนิดได้แก่

1. อิเล็กตรอน

อิเล็กตรอนมีประจุไฟฟ้าเป็นลบมีขนาดของประจุเท่ากับ 1.6×10^{-19} คูลอมบ์ และมีขนาดของมวลเท่ากับ 9.11×10^{-27} กิโลกรัม

2. โปรตอน

โปรตอนที่มีประจุไฟฟ้าเป็นบวก ขนาดของประจุเท่ากับอิเล็กตรอนคือ 1.6×10^{-19} คูลอมบ์ และมีขนาดของมวลเท่ากับ 1.67×10^{-27} กิโลกรัม

3. นิวตรอน

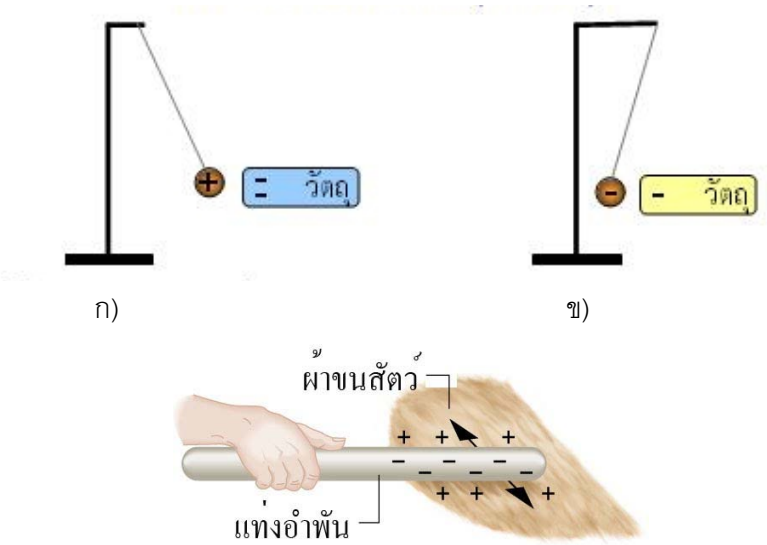
นิวตรอนจะมีความเป็นกลางทางไฟฟ้า นั่นคือไม่มีประจุโดยมีขนาดของมวลเท่ากับ 1.67×10^{-27} กิโลกรัม

เมื่อเปรียบเทียบขนาดและมวลของแต่ละอนุภาคแสดงผลสรุปดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สรุปผลการเปรียบเทียบขนาดประจุและมวลของอนุภาคต่าง ๆ

อนุภาค	ขนาดประจุ (C)	มวล (kg)
โปรตรอน	$+1.6 \times 10^{-19}$	1.67×10^{-27}
นิวตรอน	0	1.67×10^{-27}
อิเล็กตรอน	-1.6×10^{-19}	9.11×10^{-27}

สสารจะแสดงความเป็นประจุได้ถ้าอะตอมในสสารมีการสูญเสียหรือได้รับอิเล็กตรอน หลังจากนั้นสสารจะไม่เป็นกลางอีกต่อไปเพราะประจุลัพธ์มีค่าไม่เป็นศูนย์ ถ้าสสารได้รับอิเล็กตรอนเข้ามา สสารจะมีความเป็นประจุลบ ถ้าสสารเสียอิเล็กตรอนไปก็จะมีความเป็นประจุบวกในกรณีของการถูแท่งอำพันกับผ้าขนสัตว์ ผลของการถูทำให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างสสารทั้งสองทำให้มีความเป็นประจุนั่นเอง คุณสมบัติของประจุไฟฟ้า คือ ประจุชนิดเดียวกันจะผลักกัน ประจุที่ต่างชนิดกันจะดึงดูดกัน ดังแสดงในภาพที่ 3.1 ความเป็นจริงแล้วการที่อิเล็กตรอนในอะตอมโคจรรอบนิวเคลียสที่มีประจุบวกก็เนื่องมาจากแรงดึงดูดระหว่างประจุตรงข้ามด้วยเช่นเดียวกัน นอกจากนี้จะเห็นว่าการมีประจุของสสารเกิดจากความไม่สมดุลของอนุภาคอิเล็กตรอน ดังนั้นในระบบโดดเดี่ยวใด ๆ ประจุรวมของระบบจะมีค่าคงที่เสมอ นั่นคือ “ประจุไม่สามารถสูญหายหรือถูกสร้างขึ้นมาใหม่” เพียงถ่ายเทไปมาระหว่างสสารหรืออะตอมเท่านั้น แรงที่ประจุไฟฟ้ากระทำต่อกันไม่ว่าจะเป็นการดูดหรือผลัก เป็นแรงพื้นฐานของธรรมชาติที่สำคัญอีกอันหนึ่ง เรียกแรงเนื่องจากประจุนี้ว่า “แรงไฟฟ้า” ตัวอย่างดังภาพที่ 3.1



ก) ข)

ค)

ภาพที่ 3.1 การทดลองตรวจสอบชนิดของประจุไฟฟ้า ก) ลูกพิธที่มีประจุบวกกับวัตถุ ข) ลูกพิธที่มีประจุลบกับแท่งวัตถุ ค) ผลของแท่งอำพันที่ถูกับผ้าขนสัตว์

ที่มา: https://sites.google.com/site/krudang2010/fisiks-5-fifasthit/kar-heniyw-na-fifa

จากภาพที่ 3.1 ก) ให้ลูกพิธมีประจุบวก ถ้าเกิดแรงดูดกับวัตถุชนิดหนึ่ง แสดงว่าวัตถุนี้มีประจุลบ ข) ให้ลูกพิธมีประจุลบ เกิดแรงผลักกับวัตถุชนิดหนึ่ง แสดงว่าวัตถุนี้มีประจุลบ ค) การถูผ้าขนสัตว์กับแท่งอำพัน จะเกิดการถ่ายเทประจุในบริเวณที่ถู โดยผ้าขนสัตว์จะให้ประจุบวกกับแท่งอำพันมีผลให้แท่งอำพันในบริเวณที่ถูนั้นมีประจุเป็นลบ ส่วนผ้าขนสัตว์เมื่อเสียอิเล็กตรอนไปจึงทำให้มีประจุไฟฟ้าเป็นบวกในบริเวณนั้น

3.3 ปรากฏการณ์ไฟฟ้าสถิต (Phenomena of electrostatics)

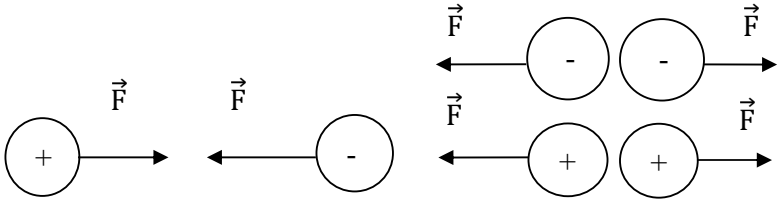
วัสดุหรือสสารแต่ละชนิดจะมีความเป็นกลางทางไฟฟ้า คือมีประจุบวกเท่ากับประจุลบ แต่ถ้ามีการทำให้เกิดการเสียประจุ เช่นการขัดถูระหว่างวัตถุสองอย่าง ประจุลบจะถ่ายโอนจากสสารหนึ่งไปยังอีกสสารหนึ่ง โดยสสารที่รับประจุลบไว้จะมีประจุไฟฟ้าลบส่วนสสารที่สูญเสียประจุลบไปก็จะมีประจุบวก ส่งผลให้รอบ ๆ สสารทั้งสองเกิดสนามไฟฟ้าขึ้นมาตัวอย่างง่ายๆที่สังเกตได้จากชีวิตประจำวันเรา เช่นเมื่อเรานำหวีหรือไม้บรรทัดไปถูกับเส้นผมของเราจะทำให้เกิดการถ่ายเทประจุระหว่างสสารทั้งสอง และเมื่อเรานำหวีหรือไม้บรรทัดมาวางไว้ใกล้ๆ กับกระดาษชิ้นเล็กๆ ก็จะเกิดแรงที่เกิดจากสนามไฟฟ้านั้นดึงดูดกระดาษเข้าหาหวี

สำหรับตัวอย่างของปรากฏการณ์ไฟฟ้าสถิตที่พบได้บ่อยที่สุดในธรรมชาติคือปรากฏการณ์ที่เกิดฟ้าผ่า ฟ้าผ่าเกิดขึ้นเมื่อเมฆที่มีประจุไฟฟ้าสะสมกันมากจนสามารถส่งกระแสกระโดดข้ามตัวกลางที่ไม่ใช่ตัวนำที่ดีนั่นคืออากาศ และเมื่อประจุไฟฟ้าที่มีจำนวนมากไปกระทกกับสิ่งของต่าง ๆ เช่น พืช หรือสัตว์ ก็จะทำให้เกิดผลเนื่องจากประจุไฟฟ้า ตัวอย่างดังภาพที่ 3.2

ภาพที่ 3.2 ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าที่เกิดจาการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า
ที่มา : Serway, R. A., and Jewett, J. W., 2014.

3.4 กฎของคูลอมบ์ (Coulomb's law)

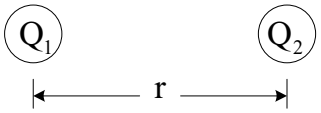
เนื่องจากเมื่อมีประจุไฟฟ้าจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าแผ่ออกมารอบๆ และเมื่อไรก็ตามที่นำประจุตั้งแต่สองประจุขึ้นไปมาวางไว้ใกล้ๆ กันก็จะเกิดผลเนื่องจากประจุทั้งสองเกิดแรงกระทำ โดยเมื่อมีประจุไฟฟ้าตั้งแต่สองประจุขึ้นไปวางอยู่ใกล้กันจะเกิดแรงกระทำซึ่งเป็นแรงที่เกิดขึ้นจากประจุทั้งสอง โดยถ้าเป็นประจุชนิดเดียวกันจะผลักกันหรือถ้าเป็นประจุต่างชนิดกันจะดูดกัน



(ก) (ข)

ภาพที่ 3.3 แรงที่เกิดจาก (ก) ประจุที่ตางชนิดกัน และ (ข) ประจุชนิดเดียวกัน

พิจารณาในกรณีที่มีประจุสองประจุวางห่างกันเป็นระยะทาง r ดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 ระยะห่างของประจุที่วางห่างกันเป็นระยะทาง r

จากภาพเราสามารถคำนวณหาแรงที่เกิดขึ้นจากประจุทั้งสองได้จากสมการ

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{|Q_1||Q_2|}{r^2} \tag{3-1}$$

สมการที่ (3.1) นี้เรียกว่า กฎของคูลอมบ์ ซึ่งค้นพบโดยวิศวกรชาวฝรั่งเศสชื่อ ชาร์ล โอกูสแตง เดอ กูลง (Charles – Augustin de Coulomb) ที่กล่าวไว้ว่า เมื่อมีประจุวางห่างกันแรงที่เกิดจากประจุทั้งสองจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดของประจุทั้งสองและแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างประจุทั้งสองยกกำลังสอง

จากการทดลองค่าคงที่คือ $k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$ มีค่าเท่ากับ $9 \times 10^9\ Nm^2/C^2$

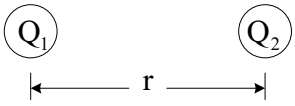
โดย ε_0 แทน ค่าสภาพยอมของสุญญากาศ (Vacuum permittivity constant) มีค่าเท่ากับ $8.854 \times 10^{-12}\ C^2/Nm^2$

เมื่อ F แทน ขนาดของแรงระหว่างประจุ 2 ประจุ หน่วย นิวตัน (N)

Q_1, Q_2 แทน ขนาดประจุ หน่วย คูลอมบ์ (C)

r แทน ระยะห่างระหว่างประจุ หน่วย เมตร (m)

ตัวอย่างที่ 3.1 จากภาพที่ 3.5 ถ้าระยะห่างระหว่างประจุทั้งสองเท่ากับ 0.5 m และประจุทั้งสองมีขนาดเท่ากับ 2e จงหาขนาดของแรงที่เกิดจากประจุทั้งสอง



ภาพที่ 3.5 ระยะห่างระหว่างประจุ

จากสมการที่ (3-1)

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{|Q_1||Q_2|}{r^2}$$

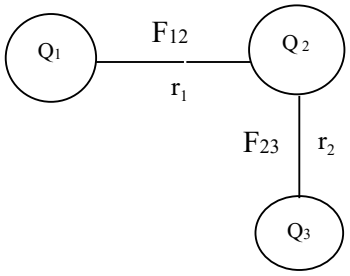
จะได้ $$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{4e^2}{0.5^2}$$

$$F = \frac{9\times10^9\times4\times(1.6\times10^{-19})^2}{2.5}$$

$$F = 23\times10^{-10}\ \text{N}$$

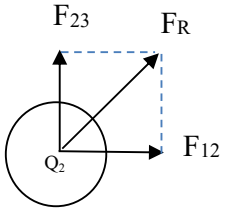
<u>คำตอบ</u> ดังนั้น แรงที่กระทำต่อประจุทั้งสองเท่ากับ 23×10^{-10} นิวตัน

ตัวอย่างที่ 3.2 จากภาพถ้า Q_1 เท่ากับ +1e ส่วน Q_2 เท่ากับ -2e และ Q_3 เท่ากับ +1e ระยะ r_1 เท่ากับ 4 cm , r_2 เท่ากับ 3 cm จงคำนวณหาขนาดของแรงที่กระทำต่อประจุ Q_2 เนื่องจากประจุ Q_1 , Q_3 และขนาดของแรงลัพธ์ ตามลำดับ



ภาพที่ 3.6 การวางตัวของประจุ

พิจารณาจากภาพที่ 3.6 สามารถแตกแรงที่กระทำได้ดังภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 แรงที่เกิดจากการวางตัวของประจุ

คำนวณหา F_{12}

$$F_{12} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{|Q_1||Q_2|}{r_{12}^2}$$

$$F_{12} = \frac{9\times10^9\times1.6\times10^{-19}\times2\times1.6\times10^{-19}}{0.04^2}$$

$$F_{12} = \frac{46.08}{0.0016}\times10^{-29}$$

$$F_{12} = 2.88 \times 10^{-25}\ \text{N}$$

คำนวณหา F_{23}

$$F_{23} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{|Q_2||Q_3|}{{r_{23}}^2}$$

$$F_{23} = \frac{9 \times 10^9 \times 2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1.6 \times 10^{-19}}{0.03^2}$$

$$F_{23} = \frac{46.08}{0.0009} \times 10^{-29}$$

$$F_{23} = 5.12 \times 10^{-25}\ N$$

หา F_R โดยใช้วิธีการทางพีชคณิตจะได้

$$F_R = \sqrt{F_{12}^2 + F_{23}^2}$$

$$F_R = \sqrt{(2.88 \times 10^{-25})^2 + (5.12 \times 10^{-25})^2}$$

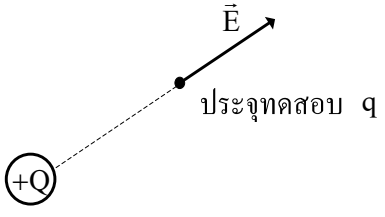
$$F_R = \sqrt{8.29 \times 10^{-50} + 26.21 \times 10^{-50}}$$

$$F_R = \sqrt{34.5 \times 10^{50}}\ \text{N}$$

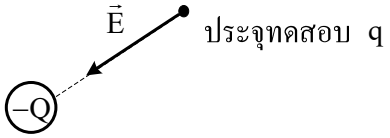
<u>คำตอบ</u> ดังนั้น ขนาดของแรงที่กระทำต่อประจุ Q_2 เนื่องจากประจุ Q_1 , Q_3 และขนาดของแรงลัพธ์ มีค่าเท่ากับ 2.87×10^{-25} นิวตัน 5.56×10^{-25} นิวตัน และ $\sqrt{34.5 \times 10^{50}}$ นิวตัน ตามลำดับ

3.5 สนามไฟฟ้า (Electric field)

เมื่อมีประจุไฟฟ้าอยู่ ณ ตำแหน่งใด ๆ อิทธิพลที่ประจุไฟฟ้าแผ่ออกมารอบประจุเรียกว่าสนามไฟฟ้า ดังนั้นสนามไฟฟ้าคือ สนามที่มีอำนาจแผ่ออกไปรอบๆ และการกระทำต่อประจุไฟฟ้าในบริเวณรอบนั้น หากทดลองนำประจุทดสอบไปวางไว้ จะได้ทิศของสนามไฟฟ้ามีทิศพุ่งออกจากประจุบวก และพุ่งเข้าหาประจุลบ ดังภาพที่ 3.8 และ 3.9



ภาพที่ 3.8 แสดงทิศของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งกำเนิดประจุที่เป็นบวก



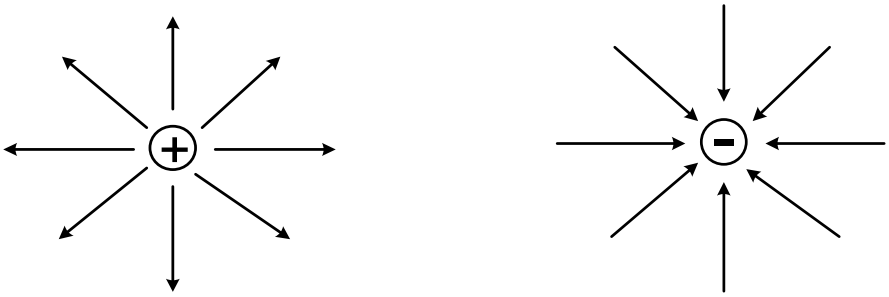
ภาพที่ 3.9 แสดงทิศของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งกำเนิดประจุที่เป็นลบ

จากนิยามของสนามไฟฟ้าคือ แรงที่กระทำต่อประจุทดสอบ สามารถคำนวณหาได้จากสมการ

$$E = \frac{F}{Q} \qquad (3\text{-}2)$$

หรือ $$E = \frac{kQ}{r^2}$$

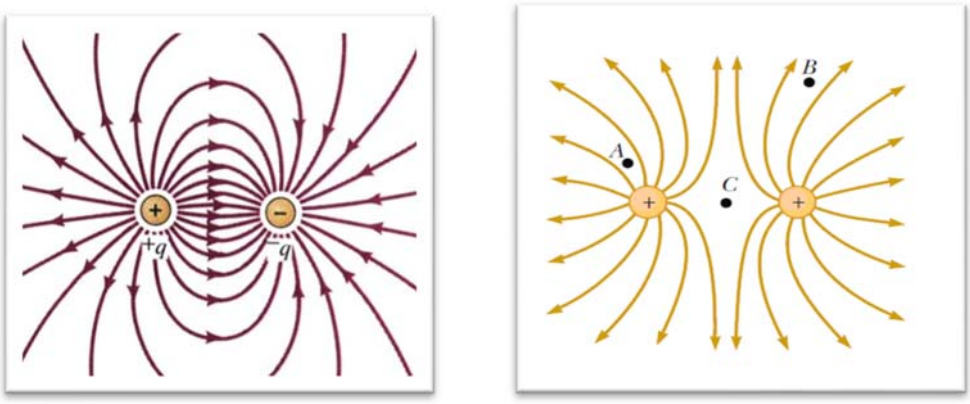
สำหรับหน่วยของสนามไฟฟ้าคือ นิวตันต่อคูลอมบ์ (N/C) โดยถ้าเรานำประจุสองประจุที่มีประจุชนิดเดียวกันและประจุต่างชนิดกันเส้นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นแสดงดังภาพที่ 3.10



(ก) (ข)

ภาพที่ 3.10 แสดงทิศทางของสนามไฟฟ้า (ก) ประจุบวก และ (ข) ประจุลบ

ถ้ามีประจุไฟฟ้าสองประจุวางอยู่ใกล้กันลักษณะของสนามไฟฟ้าจะพุ่งออกจากประจุบวกเข้าหาประจุลบ ดังภาพที่ 3.11



ภาพที่ 3.11 แสดงลักษณะของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากประจุไฟฟ้าต่างชนิดกัน

ที่มา: Serway, R. A., and Jewett, J. W., 2014.

ตัวอย่างที่ 3.3 จงหาขนาดความเข้มสนามไฟฟ้าในอากาศ ณ ตำแหน่งที่ห่างจากประจุ 5×10^{-9} คูลอมบ์ เท่ากับ 30 เซนติเมตร และเมื่อนำประจุ 4×10^{-10} คูลอมบ์ มาวางไว้ ณ ตำแหน่งนั้น จงหาขนาดแรงไฟฟ้าที่กระทำต่อประจุ 4×10^{-10} คูลอมบ์

วิธีทำ จาก $E = \frac{kq}{r^2}$

$$= \frac{(9\times10^{9})\times(5\times10^{-9})}{(30\times10^{-2})^2} = 5\times10^{2} \quad \text{N/C}$$

ขนาดความเข้มสนามไฟฟ้ามีค่า 5×10^{2} นิวตันต่อคูลอมบ์

$$F = qE$$
$$= (4\times10^{-10})\times(5\times10^{2})$$
$$= 2\times10^{-7}\ \text{N}$$

<u>คำตอบ</u> แรงไฟฟ้าที่กระทำต่อประจุ 4×10^{-10} คูลอมบ์ มีค่าเท่ากับ 2×10^{-7} นิวตัน

3.6 พลังงานศักย์ไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า (Electrical potential energy and electric potential)

3.6.1 พลังงานศักย์ไฟฟ้า คือ พลังงานเนื่องมาจากตำแหน่งของประจุสนามไฟฟ้า โดยมีค่าเท่ากับพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนประจุระยะอนันต์ (Infinity) ไปยังจุดที่พิจารณานั้นในกรณีที่เป็นประจุบวกหรือเคลื่อนที่จากจุดพิจารณานั้นไปยังระยะอนันต์ในกรณีที่เป็นประจุลบ

3.6.2 ศักย์ไฟฟ้า คือพลังงานศักย์ต่อหนึ่งหน่วยประจุไฟฟ้า ณ จุดใด ๆ หรือเขียนเป็นสมการได้

$$V = \frac{E_p}{q} \qquad (3\text{-}3)$$

หรือ

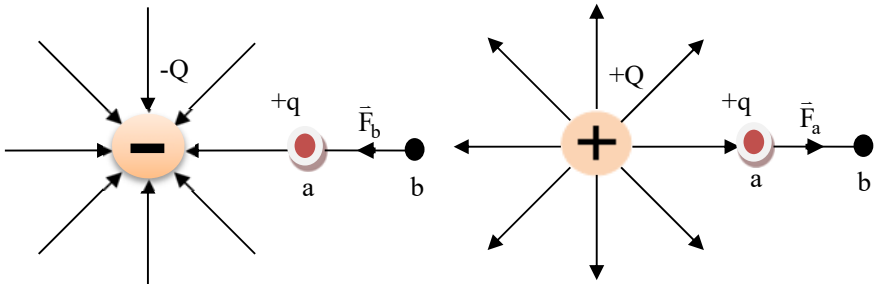
$$E_p = qV \qquad (3\text{-}4)$$

เมื่อ

V คือ ศักย์ไฟฟ้า มีหน่วยเป็นจูลต่อคูลอมบ์

E_p คือ พลังงานศักย์ มีหน่วยเป็นจูล

q คือ ประจุไฟฟ้า มีหน่วยเป็นคูลอมบ์



(ก) เมื่อเคลื่อนประจุ +q เข้าหา -Q (ข) เมื่อเคลื่อนประจุ +q เข้าหา +Q

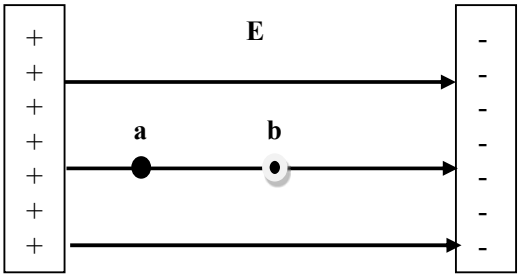
ภาพที่ 3.12 แสดงเส้นสมศักย์

จากภาพที่ 3.12 (ก) กำหนดได้ว่าศักย์ไฟฟ้าที่ $a(V_a)$ สูงกว่าศักย์ไฟฟ้าที่ $b(V_b)$ เมื่อประจุบวกอยู่ที่ a ประจุจะเคลื่อนที่ไป b โดยแรงทางไฟฟ้า ดังนั้นจะทราบว่าประจุบวกจะเคลื่อนที่จากศักย์ไฟฟ้าสูงไปสู่ศักย์ไฟฟ้าต่ำหรือเคลื่อนที่ตามทิศของสนาม จากภาพที่ 3.12 (ข) กำหนดได้ว่าศักย์ไฟฟ้าที่ $b(V_b)$ สูงกว่าศักย์ไฟฟ้าที่ a ถ้าเอาประจุไฟฟ้าไปวางไว้ในสนามไฟฟ้าประจุไฟฟ้าจะเกิดการเคลื่อนที่ทำให้เกิดพลังงานศักย์ขึ้น

3.7 ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากสนามไฟฟ้าคงตัว (Electric potential due to constant electric field)

3.7.1 ความต่างศักย์ไฟฟ้า

ณ จุดใดๆ ในสนามไฟฟ้า คือ พลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนประจุ +1 คูลอมบ์ จากจุดหนึ่งไปอีกจุดหนึ่ง และมีค่าเท่ากับผลต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่าง 2 จุดนั้น



ภาพที่ 3.13 ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากสนามไฟฟ้าที่คงตัว

จากภาพที่ 3.13 แผ่นตัวนำขนานสองแผ่น โดยแผ่นหนึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นบวก อีกแผ่นหนึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นลบ จำได้สนามไฟฟ้ามีทิศพุ่งออกจากแผ่นตัวนำที่เป็นบวกไปยังแผ่นตัวนำที่เป็นลบ ซึ่งถ้าพิจารณาศักย์ไฟฟ้าที่จุด a ไปยังจุด b จะได้ความต่างศักย์ไฟฟ้า

$$V_{ab} = V_a - V_b$$

ให้ V_{ab} แทน ความต่างศักย์ระหว่าง a และ b ซึ่งจะต้องใช้พลังงานในการเคลื่อนประจุ $+q$ จาก b ไปยัง a เมื่อเคลื่อนประจุ $+1$ คูลอมบ์ ด้วยแรงทางไฟฟ้าซึ่งเป็นแรงอนุรักษ์จะได้งานทางไฟฟ้าเกิดขึ้นซึ่งมีค่าเท่ากับความต่างศักย์ ให้ W คือ งานในการเคลื่อนประจุ จะได้

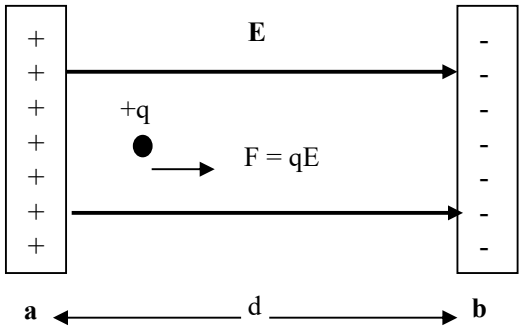
$$W = V_{ab} = V_a - V_b$$

ดังนั้นเมื่อเคลื่อนประจุ $+q$ จะได้

$$W_{b\to a} = qV_{ab} = q(V_a - V_b)$$

$$V_{ab} = V_a - V_b = \frac{W_{b\to a}}{q} \qquad (3.10)$$

เมื่อ $W_{b\to a}$ แทน งานในการเคลื่อนประจุจาก a ไปยัง b



ภาพที่ 3.14 แรงที่กระทำต่อจุดประจุอันเนื่องมาจากสนามไฟฟ้าที่คงตัว

3.7.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้า

จากงานในการเคลื่อนประจุจาก b ไป a หรือ $W_{b\to a}$ คือแรงทางไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนประจุให้เคลื่อนที่ไปได้การกระจัดที่ตำแหน่งใด ๆ จะเขียนได้ว่า

$$W_{b\to a} = F \cdot d$$

$$q(V_a - V_b) = qE \cdot d$$

$$V_a - V_b = E \cdot d$$

$$V_{ab} = E \cdot d$$

หรือ

$$E = \frac{V}{d} \qquad (3.11)$$

เมื่อ E แทน สนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นโลหะคู่ขนาน

V แทน ความต่างศักย์ระหว่างแผ่นโลหะ a และ b

d แทน ระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะ a และ b

ตัวอย่างที่ 3.4 แบตเตอร์รี่ขนาด 12 โวลต์ ต่อเข้ากับแผ่นตัวนำวางขนานกันระยะห่าง 0.3 เซนติเมตร สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ระหว่างแผ่นขนานมีความสม่ำเสมอ จงหาค่าสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นขนานนี้

วิธีทำ จาก $E = \frac{|V_B - V_A|}{d} = \frac{12}{0.3\times10^{-2}}$

$= 4.0 \times 10^3 \ \ V/m$

<u>คำตอบ</u> ดังนั้นสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นเท่ากับ 4.0×10^3 โวลต์/เมตร

ตัวอย่างที่ 3.5 ประจุขนาด 2 μc ถูกวางไว้ที่จุดกำเนิด และประจุ -6 μc ถูกวางที่พิกัด (0, 3) m จงหาศักย์ไฟฟ้ารวมทั้งหมดที่เกิดจากประจุทั้งสองที่จุดจุดหนึ่งซึ่งมีพิกัด (4,0) m

วิธีทำ จาก $V = Ed = k(\frac{q_1}{d_1} + \frac{q_2}{d_2})$

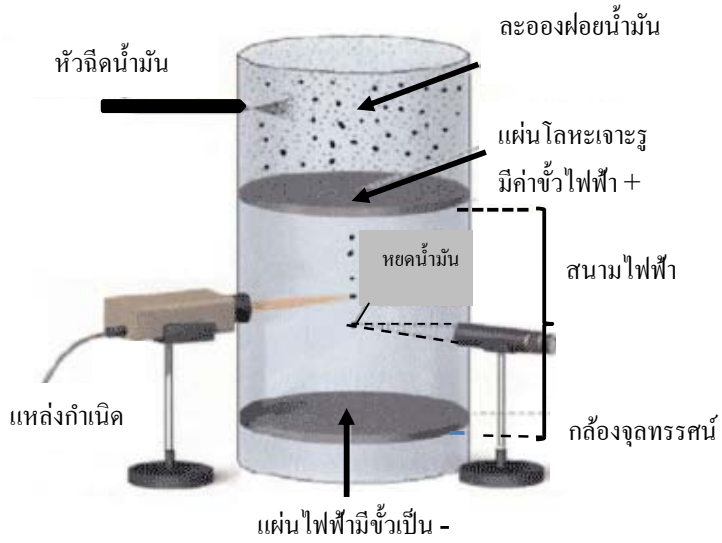
$$V = (9 \times 10^9 N.m/c^2)\left(\frac{2\times10^{-6}C}{4\ m} + \frac{-6\times10^{-6}C}{5\ m}\right)$$

$$= -6.29 \times 10^3 \ V$$

<u>คำตอบ</u> ศักย์ไฟฟ้ารวมที่เกิดจากประจุทั้งสองที่จุดซึ่งมีพิกัด (4,0) m เท่ากับ -6.29×10^3 โวลต์

3.7.3 การทดลองหยดน้ำมันของมิลลิแกน

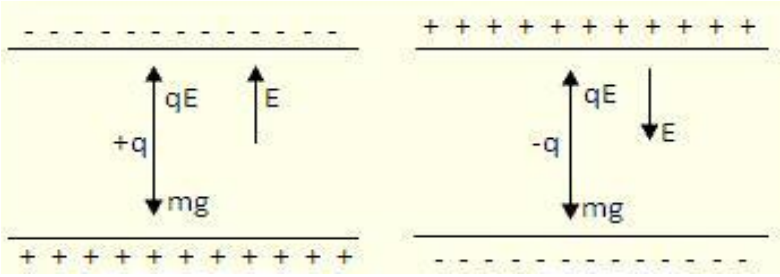
โรเบิร์ต มิลลิแกน ได้ทำการทดลองในปี ค.ศ. 1909 ถึง 1913 ซึ่งเขาสามารถวัดค่าขนาดของอนุภาคมูลฐานบนอิเล็กตรอน และสาธิตความเป็นธรรมชาติของควอนตัมของประจุนี้ แผนภาพของอุปกรณ์การทดลองของเขาแสดงดังภาพที่ 3.15



ภาพที่ 3.15 การทดลองหยดน้ำมันของมิลลิแกน

ที่มา : สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ออนไลน์. เข้าถึงเมื่อ 30 มกราคม 2563 จาก https://www.scimath.org/lesson-physics/item/7270-electron

ซึ่งประกอบด้วยแผ่นโลหะขนานกันสองแผ่น หยดน้ำมันจากเครื่องพ่นละอองถูกปล่อยให้เคลื่อนที่ผ่านรูเล็ก ๆ ของแผ่นโลหะแผ่นบน โดยเขาใช้รังสีเอกซ์ เพื่อทำให้อากาศในแชมเบอร์เกิดการไอออนไนซ์ ทำให้อิเล็กตรอนอิสระมาเกาะติดกับหยดน้ำมัน เป็นผลให้หยดน้ำมันเหล่านั้นมีประจุลบ เมื่อฉายลำแสงในแนวขนานไปที่หยดน้ำมันจะสามารถมองเห็นหยดน้ำมันได้จากกล้องโทรทัศน์ ซึ่งแกนของกล้องตั้งฉากกับลำแสง เมื่อมองจากกล้องในลักษณะนี้ จะทำให้เห็นหยดน้ำมัน และสามารถวัดอัตราการตกของหยดน้ำมันแต่ละหยดได้ จากการคำนวณ ให้หยดน้ำมันมีมวล m และมีประจุอยู่ q และเป็นประจุลบ ถ้าไม่มีสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง แรงสองแรงที่กระทำต่อประจุ คือ แรงโน้มถ่วง mg ในทิศลง และแรงยกจากความหนืดกระทำในทิศขึ้นดังภาพที่ 3.16



ภาพที่ 3.16 แสดงการหามวลของประจุอิเล็กตรอน

ที่มา : สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ออนไลน์. เข้าถึงเมื่อ 31 มกราคม 2563 จาก http://www.physic2u.com/Topic56/ChargeInElectricFilelds.html

โดยแรงยกนั้นแปรผันตรงกับอัตราเร็วของหยดน้ำมัน เมื่อหยดน้ำมันเคลื่อนที่จนมีอัตราเร็วเข้าใกล้อัตราเร็วสุดท้าย แรงทั้งสองจะมีความสมดุลซึ่งกันและกัน เมื่อเปิดเครื่องให้มีสนามไฟฟ้าจะทำให้หยดน้ำมันเคลื่อนที่ขึ้นอย่างช้า ๆ โดยทั่วไปจะมีอัตราเร็วอยู่ที่ประมาณหนึ่งร้อยเซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้กับอัตราการเคลื่อนที่ของหยดน้ำมันขณะที่ไม่มีสนามไฟฟ้าได้ และทำการสลับทิศการเคลื่อนที่ของหยดน้ำมันให้เคลื่อนที่ขึ้นและลง ด้วยการเปิดและปิดสนามไฟฟ้าสลับกันไป ผลการทดลองนี้ มิลลิแกนและเพื่อนร่วมงานของเขาพบว่า หยดน้ำมันทุกหยดมีประจุเกาะเป็นจำนวนมากเท่ากับเลขจำนวนเต็มคูณด้วยขนาดของประจุพื้นฐาน e โดยมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 1%

$$q = ne$$

เมื่อ n = 0, 1, 2 , … เป็นจำนวนของอิเล็กตรอน และขนาดของอิเล็กตรอน $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C การทดลองของมิลลิแกนให้ผลสรุปที่เป็นหลักบานว่า ประจุมีการควอนไทซ์ ซึ่งผลงานนี้ได้รับรางวัลโนเบลสาขาวิชาฟิสิกส์ในปี ค.ศ. 1923

3.8 การประยุกต์ใช้หลักการของไฟฟ้าสถิต (Application of electrostatics principles)

การประยุกต์ใช้หลักการเกี่ยวกับไฟฟ้าสถิตในทางปฏิบัตินั้นแสดงได้โดยอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น สายล่อฟ้า แท่นดักจับฝุ่นละออง เครื่องกำเนิดไฟฟ้า กล้องจุลทรรศน์สนาม-ไอออน และเครื่องยนต์ขับเคลื่อนจรวดโดยใช้ไอออน เป็นต้น

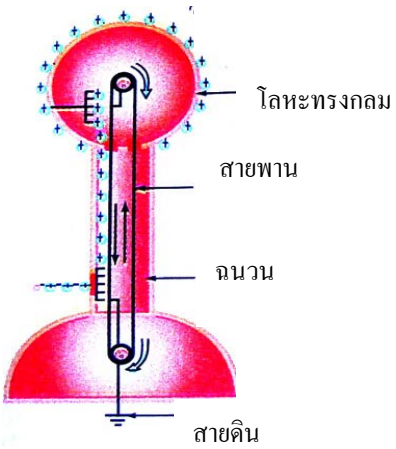
3.8.1 แท่นดักจับฝุ่นละอองแบบไฟฟ้าสถิต (The electrostatic precipitator)

หลักสำคัญคือการคายประจุไฟฟ้าในก๊าซ อุปกรณ์นี้ทำหน้าที่ดักจับฝุ่นละอองออกจากการสันดาปของก๊าซเป็นผลให้มลพิษทางอากาศลดลง เครื่องดักจับฝุ่นละอองนั้นมีประโยชน์อย่างมากในโรงไฟฟ้าถ่านหินและอุตสาหกรรมที่ปล่อยควันเสียจำนวนมาก โดยตัวอุปกรณ์จะมีแท่นที่มี

ความต่างศักย์สูงประมาณ 40 ถึง 100 กิโลโวลต์ ถูกรักษาไว้อยู่ระหว่างเส้นลวดที่ลากลงไปจนถึงจุดศูนย์กลางของท่อและผนังของท่อ ซึ่งต่อท่อลงสายดิน ทำให้เส้นลวดมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบเมื่อเทียบกับผนัง สนามไฟฟ้าจึงมีทิศไปยังเส้นลวด ค่าของสนามไฟฟ้าบริเวณใกล้ ๆ เส้นลวดจะมีค่าสูงพอที่จะทำให้เกิดการคายประจุรอบ ๆ เส้นลวด อากาศบริเวณใกล้ๆ กับเส้นลวดจึงประกอบด้วยไอออนบวก กลุ่มของอิเล็กตรอนและไอออนลบอย่างเช่น อากาศจะถูกทำให้สะอาดขึ้นโดยการเข้าไปในเครื่องดักจับฝุ่นและเคลื่อนที่เข้าใกล้เส้นลวด เมื่ออิเล็กตรอนและไอออนลบที่เกิดจากการคายประจุถูกเร่งให้เคลื่อนที่ไปที่ผนังด้านนอกโดยสนามไฟฟ้า อนุภาคสิ่งสกปรกในอากาศจะเกิดการชาร์จประจุ เนื่องจากการชนและการจับกันกับไอออนเพราะว่าอนุภาคสิ่งสกปรกที่ถูกชาร์จประจุส่วนใหญ่เป็นประจุลบ จึงถูกดึงให้เข้าหาผนังเครื่องดักจับฝุ่นโดยสนามไฟฟ้า เมื่อเขย่าท่ออย่างเป็นจังหวะมีคาบที่แน่นอนจะทำให้อนุภาคหลุดร่อนออกจากผนังและร่วงหลุดลงไปที่ภาชนะรองรับด้านล่าง

3.8.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ แวน เดอ แกรฟฟ์ (The Van de Graaff Generator)

ในปี ค.ศ. 1929 โรเบิร์ต แวน เดอ แกรฟฟ์ ใช้หลักการที่ตัวนำที่ถูกชาร์จประจุถูกนำมาสัมผัสกับผิวด้านในของตัวนำกลวง ประจุทุกตัวที่อยู่บนตัวนำที่ถูกชาร์จจะถูกถ่ายโอนไปยังตัวนำกลวง ทำให้ประจุบนตัวนำกลวงและศักย์ไฟฟ้าของมันสามารถทำให้เพิ่มขึ้นได้ไม่จำกัด โดยเขาได้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้ได้ถูกใช้ในงานวิจัยทางนิวเคลียร์ฟิสิกส์อย่างกว้างขวาง โดยประจุถูกส่งอย่างต่อเนื่องไปยังขั้วอิเล็กโทรดที่มีศักย์ไฟฟ้าสูง โดยการเคลื่อนที่ของสายพานที่ทำจากวัสดุที่เป็นฉนวน ขั้วไฟฟ้าสูงนี้ทำมาจากโลหะกลวงรูปโดมที่ยึดติดอยู่กับเสาที่เป็นฉนวน ดังภาพที่ 3.17



ภาพที่ 3.17 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแวนเดอแกรฟฟ์

ที่มา: ณัฐกานต์ วงศ์ใหญ่, ออนไลน์. เข้าถึงเมื่อ 5 เมษายน 2563 จาก https://sites.google.com/site/fisiksthudey/fifasthit/snam-fifa

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบนี้สามารถสร้างความต่างศักย์ได้มากถึง 20 ล้านโวลต์ การเร่งโปรตอนให้เคลื่อนที่ผ่านความต่างศักย์ที่มากเช่นนี้ทำให้เกิดพลังงานมากพอที่จะไปจุดให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ระหว่างโปรตอนเหล่านั้นกับเป้าที่เป็นนิวไคล์ชนิดต่าง ๆ ได้ ส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดย่อมลงมาส่วนใหญ่เราจะเห็นในห้องเรียนวิทยาศาสตร์

3.9 กระแสไฟฟ้า (Electric current)

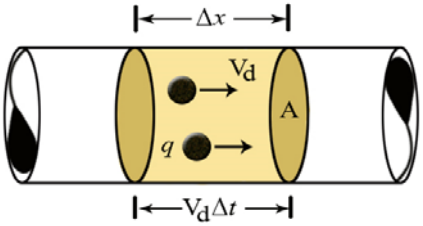
เมื่ออิเล็กตรอนซึ่งเป็นอนุภาคมีประจุลบ เคลื่อนที่ผ่านจุดใด ๆ ในหนึ่งหน่วยเวลาจะทำให้เกิดปริมาณกระแสไฟฟ้าขึ้นซึ่งเขียนเป็นความสัมพันธ์ตามสมการอนุพันธ์ได้คือ

$$I = \frac{dq}{dt} \tag{3-12}$$

เมื่อ I คือ กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์, A)
q คือ ประจุไฟฟ้า (คูลอมบ์, C)
t คือ เวลา (วินาที, s)

จากสมการ (3-12) จะได้หน่วยของกระแสไฟฟ้าคือ คูลอมบ์ต่อวินาทีหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า แอมแปร์ สำหรับทิศทางการของกระแสไฟฟ้านั้นจะมีทิศตามประจุบวกหรือมีทิศตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของประจุลบ

พิจารณาจากภาพที่ 3.18 เมื่ออิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่ในวัสดุตัวนำไฟฟ้าที่มีพื้นที่หน้าตัด A ในเวลา Δt



ภาพที่ 3.18 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในตัวนำไฟฟ้า

จากภาพเรียกความเร็วเฉลี่ยที่อิเล็กตรอนอิสระทั้งหมดใช้ในการเคลื่อนที่ไปว่า ความเร็วลอยเลื่อนของอิเล็กตรอน, v_d ดังนั้น จะได้ว่าระยะที่ประจุเคลื่อนที่ได้ Δx ในหนึ่งหน่วยเวลา Δt คือ

$$\Delta x = v_d \Delta t \tag{3-13}$$

ถ้าพิจารณาประจุ dq ที่ไหลภายในตัวนำนี้ในช่วงเวลาสั้นๆ dt เมื่อเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัด A สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอนุพันธ์ได้เป็น

$$dq = neV_dAdt \tag{3-14}$$

เมื่อ n คือ จำนวนอิเล็กตรอน

e คือ ขนาดของประจุอิเล็กตรอน (คูลอมบ์, C)

A คือ พื้นที่หน้าตัด (ตารางเมตร, m^2)

V_d คือ ความเร็วลอยเลื่อน (เมตรต่อวินาที, m/s)

ดังนั้น จะได้จำนวนกระแสไฟฟ้าที่เคลื่อนที่สัมพันธ์กับความเร็วลอยเลื่อนคือ

$$I = \frac{dq}{dt} = nev_dA \tag{3-15}$$

ตัวอย่างที่ 3.5 จงหากระแสที่เกิดจากการเคลื่อนของประจุเป็นฟังก์ชันกับเวลา $q = 5t^2 + 2t + 1$ ที่เวลา 2 วินาที

วิธีทำ จากสมการ

$$I = \frac{dq}{dt}$$

จะได้

$$I = \frac{d(5t^2+2t+1)}{dt}$$
$$I = 10t + 2$$

ที่ 2 วินาที

$$I = 10(2) + 2$$
$$I = 22 \ \ A$$

<u>คำตอบ</u> ดังนั้นกระแสไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับ 22 แอมแปร์

3.10 กฎของโอห์ม (Ohm's law)

วัสดุต่างๆ จะมีคุณสมบัติของการนำไฟฟ้าได้แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับจำนวนอิเล็กตรอนอิสระที่สามารถเคลื่อนที่ได้ภายในเนื้อวัสดุนั้นๆ โอห์มได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุ โดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวัสดุที่มีความเป็นฉนวนไฟฟ้า ซึ่งฉนวนนั้นเป็นวัสดุที่ไม่ยอมให้กระแสไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่าน หรืออิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่ผ่านได้

ยาก โดยพบว่าเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าจะได้ว่ากระแสไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง และจะได้ค่าคงตัวของสมการเป็นความต้านทานของวัสดุนั้น ๆ ดังสมการ

$$R = \frac{V}{I} \tag{3-16}$$

เมื่อ

I คือ กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์, A)

V คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์, V)

R คือ ความต้านทานไฟฟ้า (โอห์ม, Ω)

ค่าผกผันของความต้านทานไฟฟ้าเรียกว่า **ความนำไฟฟ้า** (Conductivity, G มีหน่วยเป็นซีเมนส์, S) หรือเขียนเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ได้คือ

$$G = \frac{1}{R} = \frac{I}{V} \tag{3-17}$$

พิจารณาถ้าให้ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านวัสดุตัวนำที่มีความยาว ℓ และพื้นที่หน้าตัด A ภายใต้ความต่างศักย์ไฟฟ้า V เราสามารถหาค่าสนามไฟฟ้าในลวดตัวนำ คือ

$$E = \frac{V}{\ell} \tag{3-18}$$

เมื่อ J คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร) จะได้ว่า

$$J = \frac{I}{A} \tag{3-19}$$

จากสมการ (3-18) และกฎของโอห์ม แทนลงในสมการ (3-19) จะได้

$$J = \frac{\ell}{RA}E \tag{3-20}$$

และได้ความสัมพันธ์ระหว่าง J และ E ดังนี้

$$J = \sigma E \tag{3-21}$$

เมื่อ σ คือ ค่าคงตัวเรียกสภาพนำไฟฟ้า (Conductivity, หน่วยเป็นโอห์ม$^{-1}$เมตร$^{-1}$)

$$\sigma = \frac{\ell}{RA} \quad (3\text{-}22)$$

จะได้

$$R = \frac{\ell}{\sigma A} \quad (3\text{-}23)$$

และส่วนกลับของสภาพนำไฟฟ้าเรียกว่า **สภาพต้านทานไฟฟ้า** (Resistivity, หน่วยเป็นโอห์ม) เขียนได้ดังสมการ

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (3\text{-}24)$$

ดังนั้น

$$R = \rho\frac{\ell}{A} \quad (3\text{-}25)$$

เมื่อ ρ คือ สภาพความต้านทานไฟฟ้า (โอห์ม.เมตร, Ω.m)

สภาพต้านทานของตัวนำไฟฟ้าของวัสดุบางชนิด แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สภาพต้านทานไฟฟ้าของวัสดุตัวนำบางชนิด

วัสดุ	สภาพความต้านทานไฟฟ้า (Ω·m)
เงิน	1.47×10^{-8}
ทองแดง	1.72×10^{-8}
ทอง	2.44×10^{-8}
อะลูมินัม	2.75×10^{-8}
เหล็กกล้า	10×10^{-8}
ตะกั่ว	22×10^{-8}
ปรอท	95×10^{-8}

ที่มา : ปิยพงษ์ สุทธิคง, 2548.

ตัวอย่างที่ 3.6 จงหาความต้านทานไฟฟ้าในขดลวดทองแดงความยาว 50 เซนติเมตร มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 2 ตารางเมตร

วิธีทำ จากสมการ

$$R = \rho\frac{\ell}{A}$$

$$R = 1.7 \times 10^{-8} \Omega \cdot m \times \frac{0.5\ m}{2\ m^2}$$

<u>คำตอบ</u> ความต้านทานไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 0.425×10^{-8} โอห์ม

3.11 แรงเคลื่อนไฟฟ้า (Electromotive force)

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เราใช้เรียกกรณีพิจารณาความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นที่แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า โดยเราสามารถพิจารณาการต่อวงจรไฟฟ้าอย่างง่ายกับตัวต้านทาน (R) หรือในวงจรจะใช้หลอดไฟแทนตัวต้านทาน และแบตเตอรี่ที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้า (ε) และมีความต้านทานภายในของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า r ดังภาพที่ 3.19

ภาพที่ 3.19 วงจรไฟฟ้าอย่างง่าย

โดยเราสามารถหาสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า ความต้านทาน และแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้จากดังนี้

$$V = \varepsilon - Ir \tag{3-26}$$

เนื่องจาก

$$V = IR \tag{3-27}$$

ดังนั้นจะได้

$$IR = \varepsilon - Ir \tag{3-28}$$

หรือ

$$I = \frac{\varepsilon}{R+r} \tag{3-29}$$

สมการ (3-29) หมายความว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรหาได้จากการหาอัตราส่วนของแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับผลรวมของความต้านทานภายในของแบตเตอรีและความต้านทานภายในวงจร

3.12 กำลังไฟฟ้า (Electric power)

เมื่อไฟฟ้าไหลผ่านตัวต้านทานจะเกิดการสูญเสียพลังงานให้กับตัวต้านทานนั้น เราเรียกการสูญเสียพลังงานงานนี้ว่า กำลังไฟฟ้า โดยกำลังไฟฟ้าหาได้จากสมการ

$$P = IV \qquad (3\text{-}30)$$

$$P = I^2R \qquad (3\text{-}31)$$

$$P = \frac{V^2}{R} \qquad (3\text{-}32)$$

ตัวอย่างที่ 3.7 จงหากำลังไฟฟ้าที่เกิดจากการปล่อยกระแสไฟฟ้าขนาด 5 แอมแปร์ ไหลในขดลวดที่มีความต้านทาน 2 โอห์ม ที่มีความต้านทาน

วิธีทำ จากสมการ $P = I^2R$

จะได้ $P = (5)^2(2)$

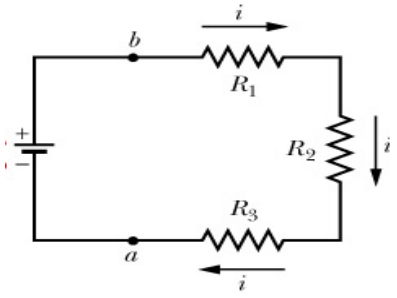
<u>คำตอบ</u> ได้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 50 วัตต์

3.13 การต่อตัวต้านทานไฟฟ้า (Resistors in circuit)

ความต้านทานไฟฟ้าคือ ความสามารถในการต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าในตัวนำไฟฟ้า โดยการต่อตัวต้านทานไฟฟ้ามีวิธีในการต่อตัวต้านทานสองแบบคือ แบบขนานและแบบอนุกรม

3.13.1 การต่อแบบอนุกรม (Series circuit)

ลักษณะการต่อแบบอนุกรมเป็นดังภาพที่ 3.20



ภาพที่ 3.20 การต่อตัวต้านทานแบบอนุกรม

ลักษณะของการต่อตัวต้านทานแบบอนุกรม

1. กระแสที่วิ่งผ่านตัวต้านทานจะมีค่าเท่ากันทุกจุดและมีค่าเท่ากับกระแสรวม

2. ความต่างศักย์รวมมีค่าเท่ากับผลรวมของความต่างศักย์ที่ตัวต้านทานทุกตัวรวมกันหรือ

$$V_{tot} = V_1 + V_2 + V_3 \qquad (3\text{-}33)$$

3. จากสมการ (3-33) และกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการต่ออนุกรม จะได้

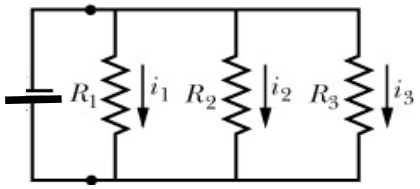
$$\mathrm{V_{tot}} = \mathrm{I}(\mathrm{R_1} + \mathrm{R_2} + \mathrm{R_3} + \ldots)$$
$$IR_{tot} = I(R_1 + R_2 + R_3)$$

ดังนั้นความต้านทานรวมในวงจรจึงมีค่าเท่ากับผลรวมของความต้านทานทั้งหมด

$$\mathrm{R_{tot}} = \mathrm{R_1} + \mathrm{R_2} + \mathrm{R_3} + \ldots \qquad (3\text{-}34)$$

3.13.2 การต่อแบบขนาน (Parallel circuit)

ลักษณะของการต่อแบบขนานเป็นไปตามภาพที่ 3.21



ภาพที่ 3.21 การต่อตัวต้านทานแบบขนาน

ลักษณะการต่อตัวต้านทานแบบขนาน

1. ความต้านทานรวมในวงจรหาได้จากสมการ

$$\mathrm{I} = \mathrm{I_1} + \mathrm{I_2} + \mathrm{I_3} \qquad (3\text{-}35)$$

$$\mathrm{I} = \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{R_1}} + \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{R_2}} + \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{R_3}} \qquad (3\text{-}36)$$

$$\mathrm{I} = \mathrm{V}\left(\frac{1}{\mathrm{R_1}} + \frac{1}{\mathrm{R_2}} + \frac{1}{\mathrm{R_3}}\right) = \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{R_{tot}}} \qquad (3\text{-}37)$$

นั่นคือจะได้

$$\frac{1}{\mathrm{R_{tot}}} = \frac{1}{\mathrm{R_1}} + \frac{1}{\mathrm{R_2}} + \frac{1}{\mathrm{R_3}} + \ldots \qquad (3\text{-}38)$$

2. ความต่างศักย์ไฟฟ้ามีค่าเท่ากันทุกจุดและมีค่าเท่ากับความต่างศักย์รวม
3. กระแสไฟฟ้ารวมในวงจรหาได้ตามสมการ

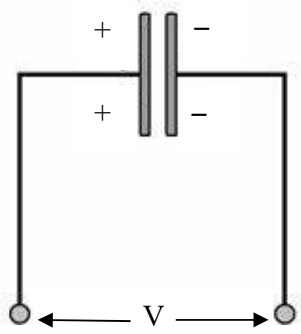
$$\mathrm{I} = \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{R_{tot}}} \qquad (3\text{-}38)$$

3.14 ตัวเก็บประจุ (Capacitor)

ตัวเก็บประจุ เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เก็บสะสมประจุไฟฟ้า โดยพิจารณานำตัวนำสองตัวที่เป็นแผ่นมาขนานกัน ภายใต้ปรากฏการณ์สมดุลสถิตถ้าตัวนำไฟฟ้าทั้งสองมีประจุไฟฟ้าขนาดเท่ากันแต่เป็นประจุตรงข้ามกัน จะเกิดความต่างศักย์ระหว่างตัวนำทั้งสอง โดยหากกำหนดปริมาณของประจุที่อยู่บนแผ่นตัวนำของตัวเก็บประจุที่มีความต่างศักย์ค่าหนึ่ง ปริมาณประจุ Q ที่อยู่บนตัวนำแปรผันตรงกับความต่างศักย์ระหว่างตัวนำทั้งสอง โดยค่าคงที่ของการแปรผันขึ้นกับรูปร่างและระยะห่างของตัวนำ จึงนิยามความหมายของความจุไฟฟ้า ได้ว่าตัวเก็บประจุจะมีความจุไฟฟ้าเป็นอัตราส่วนระหว่างขนาดของประจุที่อยู่บนตัวนำตัวใดตัวหนึ่งต่อขนาดความต่างศักย์ระหว่างตัวนำ

$$C = \frac{Q}{V} \qquad (3.39)$$

ความจุมีหน่วยเป็นคูลอมบ์ต่อโวลต์ แต่เพื่อเป็นเกียรติให้แก่ไมเคิล ฟาราเดย์ ความจุไฟฟ้าจึงใช้เป็นฟารัด (Farad, F) ซึ่งในทางปฏิบัติความจุไฟฟ้าจะอยู่ในช่วงไมโครฟารัดถึงพิโกฟารัด สำหรับตัวเก็บประจุที่สร้างจากแผ่นตัวนำขนานดังภาพที่ 3.22



ภาพที่ 3.22 ตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน

3.14.1 การคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้า

ในสถานการณ์ปกติทั่วไปตัวเก็บประจุจะประกอบด้วยตัวนำสองตัว อย่างไรก็ตามตัวนำชนิดเดียวก็มีความจุไฟฟ้าได้เช่นกัน เช่น ความจุไฟฟ้าของทรงกลมที่ถูกชาร์จประจุจะแปรผันตรงกับรัศมีของทรงกลม a และไม่ขึ้นกับทั้งประจุที่อยู่บนทรงกลมและความต่างศักย์ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

$$C = \frac{Q}{kQ/a} = \frac{a}{k}$$

สำหรับตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน หากให้แผ่นโลหะมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากันเท่ากับ A อยู่ห่างกันเป็นระยะ d แต่ละแผ่นมีความหนาแน่นประจุเชิงผิว $\sigma = \frac{Q}{A}$ ถ้าแผ่นโลหะทั้งสองอยู่ใกล้กันมากๆ เราสามารถประมาณได้ว่าสนามไฟฟ้าที่อยู่ระหว่างแผ่นโลหะมีความสม่ำเสมอและมีค่าเป็นศูนย์ที่บริเวณอื่นนอกเหนือจากนี้ ค่าสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นโลหะมีค่าเป็น

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} = \frac{Q}{\varepsilon_0 A} \qquad (3\text{-}40)$$

เพราะว่าสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นโลหะมีความสม่ำเสมอ ขนาดของความต่างศักย์ระหว่างแผ่นโลหะจึงมีค่าเป็น Ed จะได้ว่า

$$V = Ed = \frac{Qd}{\varepsilon_0 A}$$

ดังนั้น

$$C = \frac{\varepsilon_0 A}{d} \qquad (3\text{-}41)$$

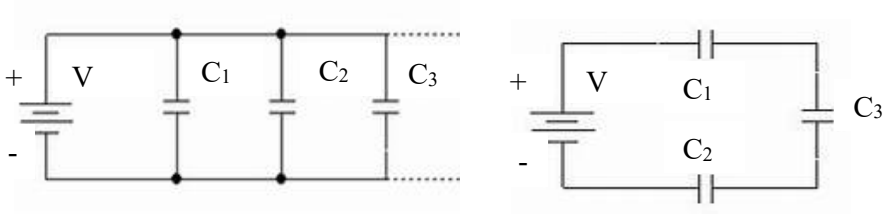
3.14.2 การต่อตัวเก็บประจุแบบต่างๆ

ตัวอย่างภาพของตัวเก็บประจุ แบตเตอรี และสวิตซ์ เป็นดังภาพที่ 3.23 สำหรับต่อในวงจรอิเล็กทรอนิกส์

(ก) ตัวเก็บประจุ (ข) แบตเตอรี (ค) สวิตซ์

ภาพที่ 3.23 สัญลักษณ์ที่ใช้ในวงจร (ก) ตัวเก็บประจุ (ข) แบตเตอรี และ (ค) สวิตซ์

โดยสัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุสะท้อนให้เห็นถึงการวางตัวทางเรขาคณิตของตัวเก็บประจุแบบขนานซึ่งเป็นแบบทั่วไป ภาพที่ 3.24 เป็นภาพการต่อตัวเก็บประจุ (ก) แบบขนาน (ข) แบบอนุกรม



(ก) แบบขนาน (ข) แบบอนุกรม

ภาพที่ 3.24 การต่อตัวเก็บประจุ (ก) แบบขนาน และ (ข) แบบอนุกรม

การต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน พิจารณาความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุแต่ละตัวจะมีค่าเท่ากัน และมีค่าเท่ากับความต่างศักย์ที่ตกคร่อมจุดที่ตัวเก็บประจุทั้งสองต่อกันอยู่สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$C_{รวม} = C_1 + C_2 + \ldots \quad (3\text{-}42)$$

สำหรับการต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรมผลรวมของความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุแต่ละตัวสามารถคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้ารวมได้ดังนี้

$$\frac{1}{C_{รวม}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \ldots \quad (3\text{-}43)$$

3.14.3 พลังงานที่สะสมอยู่ในตัวเก็บประจุ

ในวงจรไฟฟ้าแบตเตอรีจะสร้างสนามไฟฟ้าในเส้นลวดตัวนำและชาร์จประจุ โดยประจุจะเคลื่อนที่ระหว่างเส้นลวดกับตัวเก็บประจุ จะทำให้เกิดการถ่ายโอนพลังงานในระบบ นั่นคือ ก่อนที่สวิตช์จะถูกสับปิดลง พลังงานศักย์ในรูปของพลังงานศักย์เคมีจะถูกเก็บสะสมอยู่ในแบตเตอรี ซึ่งพลังงานนี้ถูกถ่ายโอนระหว่างการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น พลังงานศักย์เคมีบางส่วนในแบตเตอรีจะถูกถ่ายโอนไปเป็นพลังงานศักย์ไฟฟ้าที่สอดคล้องกับระยะห่างของประจุบวกและประจุลบบนแผ่นตัวนำ งานที่กระทำในการชาร์จประจุให้กับตัวเก็บประจุจะอยู่ในรูปของพลังงานศักย์ไฟฟ้า U_E ที่เก็บสะสมอยู่ในตัวเก็บประจุ เราสามารถแสดงพลังงานศักย์ไฟฟ้าที่เก็บสะสมอยู่ในตัวเก็บประจุหลังจากถูกชาร์จประจุแล้วคือ

$$U_E = \frac{Q^2}{2C} = \frac{1}{2}QV = \frac{1}{2}CV^2 \quad (3\text{-}44)$$

ซึ่งสามารถใช้สมการดังกล่าวนี้ประยุกต์ใช้ได้กับตัวเก็บประจุใดๆ ก็ได้ ไม่ว่าตัวเก็บประจุนั้นจะมีการจัดเรียงตัวแบบใดก็ตาม สำหรับตัวเก็บประจุที่สนใจ พลังงานที่สะสมอยู่ภายในตัวเก็บประจุจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อประจุและความต่างศักย์มีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับข้อจำกัดในทางปฏิบัติของพลังงานที่สะสมอยู่ในตัวเก็บประจุเมื่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ามากพอที่จะคายประจุขึ้นระหว่างแผ่นตัวนำสองแผ่น ดังนั้นจึงมักจะเห็นว่าตัวเก็บประจุส่วนใหญ่จะระบุค่าความต่างศักย์สูงสุดที่เหมาะสมกับการใช้งานเอาไว้เสมอ โดยสามารถพิจารณาได้ว่าพลังงานที่สะสมอยู่ในตัวเก็บประจุนั้นถูกเก็บสะสมอยู่ในสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นอยู่ระหว่างแผ่นตัวนำเมื่อตัวเก็บประจุถูกชาร์จประจุเข้าไป หากพิจารณาสนามไฟฟ้าที่อยู่ในปริมาตรของแผ่นตัวนำสองแผ่น ซึ่งปริมาตรนี้มีค่าเท่ากับ Ad ซึ่งคือพื้นที่หน้าตัดคูณกับความยาวของแผ่นตัวนำ โดยถ้าเราให้ u_E เป็น พลังงานต่อหน่วยปริมาตร หรือความหนาแน่นพลังงาน นั่นคือ

$$u_E = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2 \qquad (3\text{-}45)$$

โดยทั่วไปสมการนี้สามารถใช้ได้โดยไม่ขึ้นกับแหล่งกำเนิดสนามไฟฟ้า นั่นคือที่จุดใดๆ ความหนาแน่นพลังงานในสนามไฟฟ้าใดๆนั้นแปรผันตรงกับขนาดของสนามไฟฟ้ายกกำลังสอง

3.14.4 ชนิดของตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุหากเราต้องการเพิ่มค่าความจุไฟฟ้าสามารถทำได้โดยการสอดแผ่นตัวกลางไดอิเล็กตริกคั่นกลางเข้าไประหว่างแผ่นตัวนำ โดยสารไดอิเล็กตริก คือ วัสดุที่ไม่นำไฟฟ้า เช่น ยาง แก้ว หรือกระดาษอาบมัน เป็นต้น สำหรับตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน เราสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$C = \kappa\frac{\varepsilon_0 A}{d} \qquad (3\text{-}46)$$

โดยค่า κ นี้เรียกว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุ (dielectric constant) ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดจะมีค่าแตกต่างกันไปตามชนิดของวัสดุ

ตัวเก็บประจุจำนวนมากถูกสร้างมาให้อยู่ในรูปของแผ่นวงจรรวม แต่อุปกรณ์ไฟฟ้าบางอย่างก็ยังคงใช้ตัวเก็บประจุแบบเดี่ยวอยู่ ส่วนใหญ่ที่เราพบตัวเก็บประจุมักทำมาจากแผ่นโลหะบางๆ ที่คั่นด้วยแผ่นไดอิเล็กตริกที่ทำจากกระดาษเคลือบฟาราฟิน หากเป็นตัวเก็บประจุขนาดเล็กก็มักจะทำมาจากวัสดุที่เป็นเซรามิก ตัวเก็บประจุอีกชนิดหนึ่งคือตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโทรไลต์ มักใช้กับงานเก็บประจุที่มีปริมาณมากที่ศักย์ไฟฟ้าสัมพัทธ์ต่ำ นอกจากนี้ยังมีตัวเก็บประจุแบบปรับค่าความจุได้ ตัวอย่างภาพตัวเก็บประจุแบบเซรามิก และแบบอิเล็กโทรไลต์ดังภาพที่ 3.25

ก) ตัวเก็บประจุแบบเซรามิก

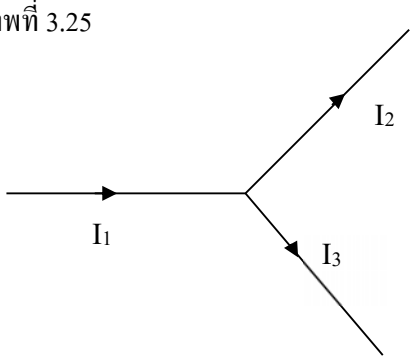
ข) ตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโทรไลต์

ภาพที่ 3.25 ภาพตัวเก็บประจุแบบเซรามิกและแบบอิเล็กโทรไลต์

3.15 กฎของเคอร์ชอฟ (Kirchhoff's law)

ในเรื่องของการต่อตัวต้านทานนั้นถ้าตัวต้านทานที่นำมาต่อกันมีหลายตัวทำให้เกิดความสลับซับซ้อนซึ่งเราสามารถคำนวณหาค่ากระแสหรือความต่างศักย์ในวงจรได้ง่ายโดยใช้กฎของเคอร์ชอฟ ซึ่งมี 2 ข้อ คือ

1. ที่จุดร่วมใด ๆ ในวงจรไฟฟ้า ผลรวมของกระแสไฟฟ้าที่จุดนี้มีค่าเท่ากับศูนย์ หรือ กระแสไฟฟ้าไหลเข้ามีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าไหลออก
   พิจารณาจากภาพที่ 3.25



ภาพที่ 3.25 ลักษณะของกระแสไฟฟ้าไหลเข้าเท่ากับกระแสไฟฟ้าไหลออก

จะได้สมการตามกฎข้อที่ 1 ของเคอร์ชอฟคือ

$$\sum I_{tot} = 0 \tag{3-47}$$

หรือ

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

2. ผลรวมของแรงเคลื่อนไฟฟ้าในวงจรปิดใดๆ มีค่าเท่ากับผลรวมของความต่างศักย์ในวงจรนั้น หรือเขียนเป็นสมการได้คือ

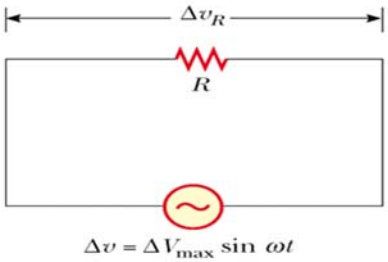
$$\sum E = \sum V \tag{3-48}$$

3.16 ไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternative current)

อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าที่ใช้งานกันอยู่ในบ้านทุกวันนี้ล้วนใช้ไฟฟ้ากระแสสลับทั้งสิ้น ไฟฟ้ากระแสสลับมีลักษณะการไหลของกระแสไฟฟ้าที่สลับทิศทางตลอดเวลา โดยจะมีค่าขณะหนึ่งที่เป็นศูนย์จากนั้นจะเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดในทิศทางบวกแล้วลดลงกลับมาเป็นศูนย์อีก ต่อจากนั้นก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นอีกจนถึงค่าสูงสุดแต่มีทิศทางลบวนสลับกันไปมาตลอดเวลา ถ้าไฟฟ้ากระแสสลับมีความถี่คงที่ กระแสไฟฟ้าที่จะไหลก็จะเปลี่ยนทิศทางคงที่ตามไปด้วย

3.16.1 ความต้านทานในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

สำหรับความต้านทานไฟฟ้าในวงจรกระแสสลับนั้นสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3.25



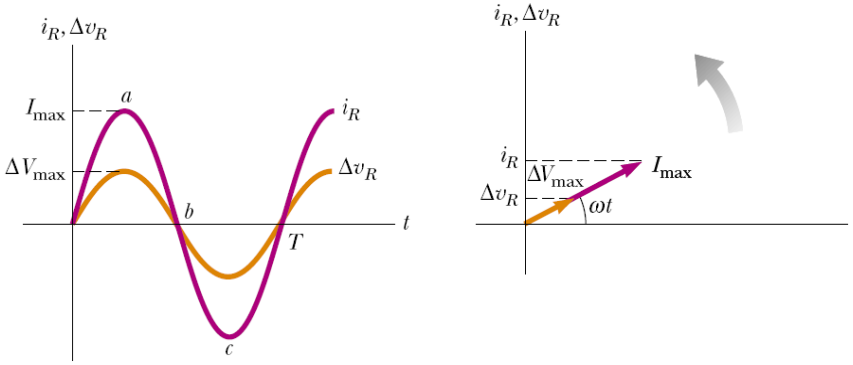
ภาพที่ 3.25 ความต้านทานไฟฟ้าในวงจรกระแสสลับ

ซึ่งให้ v_m เป็นค่าแอมพลิจูดของความต่างศักย์ หรือค่าความต่างศักย์ที่มากที่สุด จะเขียนความต่างศักย์ตกคร่อมตัวต้านทาน ได้เป็น

$$v_R = v_m \sin(\omega t) \tag{3-49}$$

$$i_R = \frac{v_m}{R} = I_m \sin(\omega t) \tag{3-50}$$

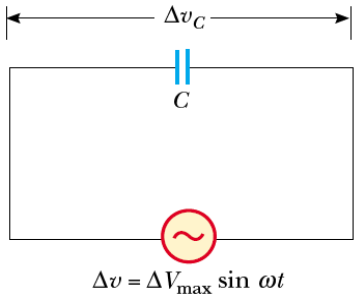
สำหรับลักษณะเฟสของความต่างศักย์ไฟฟ้ากับกระแสจะมีเฟสตรงกับกระแสดังภาพที่ 3.26



ภาพที่ 3.26 (ก) กระแสและความต่างศักย์ (ข) มุมเฟสระหว่างกระแสกับความต้านทานไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

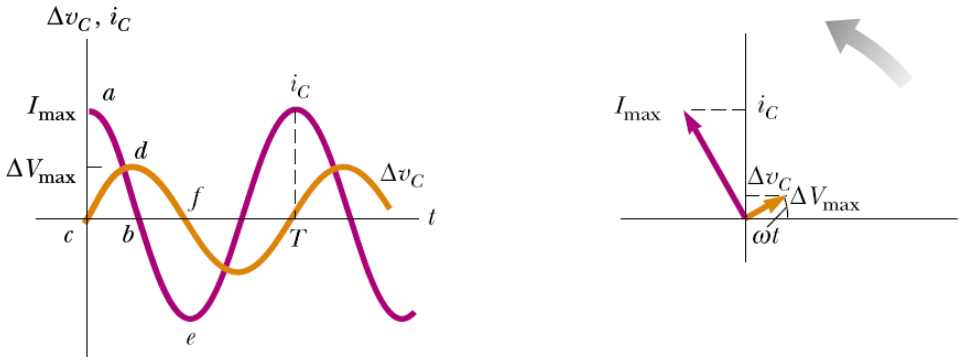
3.16.2 ตัวเก็บประจุในไฟฟ้ากระแสสลับ

สำหรับตัวเก็บประจุไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับนั้นจะเป็นไปดังภาพที่ 3.27



ภาพที่ 3.27 ตัวเก็บประจุไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

โดยจะสามารถพบว่ากระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์จะมีเฟสไม่ตรงกันนั่นคือ เฟสของกระแสไฟฟ้าจะนำความต่างศักย์อยู่ 90 องศา ดังภาพที่ 3.28



(ก) (ข)

ภาพที่ 3.28 (ก) เฟสของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ที่ตัวเก็บประจุ
(ข) มุมเฟสระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ที่ตัวเก็บประจุ

พิจารณาจากสมการ

$$v = v_m \sin(\omega t)$$

เนื่องจาก

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

ดังนั้น

$$q = CV$$

$$q = CV_m \sin(\omega t)$$

$$I_C = \frac{dq}{dt} = \frac{d(CV_m \sin(\omega t)}{dt}$$

$$= CV_m \omega(\cos \omega t)$$

$$I_C = \frac{V_m}{\frac{1}{\omega C}}(\cos \omega t)$$

เปรียบเทียบกับสมการกระแสที่ผ่านตัวต้านทาน R เขียนได้เป็น

$$I_R = V_m = I_m \sin(\omega t)$$

จะได้ความต้านทานที่เกิดจากตัวเก็บประจุ (X_C) ซึ่งเป็นค่าความต้านทานความจุ (capacitive reactance) มีหน่วยเป็นโอห์ม คือ

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (3\text{-}51)$$

จากสมการ

$$I_C = \frac{V_m}{\frac{1}{\omega C}}(\cos \omega t) = I_m \cos(\omega t)$$

หรือ

$$I_C = I_m(\sin \omega t + \frac{\pi}{2}) \quad (3\text{-}52)$$

ตัวอย่างที่ 3.8 จงหาความต้านทานของประจุไฟฟ้าขนาด $10\,\mu C$ เมื่อนำไปต่อในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ ที่มีความถี่ 50 Hz

วิธีทำ จากสมการ $X_C = \frac{1}{\omega C}$

เนื่องจาก

$$\omega = 2\pi f$$

$$\omega = (2)(3.14)(50)$$

$$\omega = 31.4 \text{ rad/s}$$

จะได้

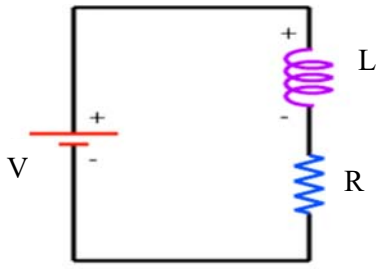
$$X_c = \frac{1}{(31.14)(10\times10^{-6})}$$

$$X_c = 311.4 \times 10^6\ \Omega$$

<u>คำตอบ</u> ความต้านทานของประจุไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 311.4×10^6 โอห์ม

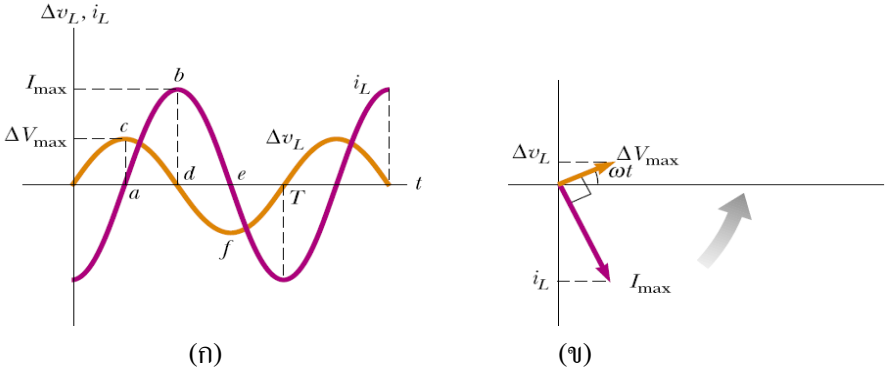
3.16.3 ขดลวดเหนี่ยวนำในวงจรไฟฟ้า

ขดลวดเหนี่ยวนำคือ ขดลวดที่นำมาต่อเข้าในวงจร RL กับวงจรไฟฟ้ากระแสตรง โดยไม่คิดความต้านทานภายในของขดลวด ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดมีหน่วยเป็น เฮนรี (H) สำหรับสัญลักษณ์ขดลวดตัวนำในวงจรจะเป็นดังภาพที่ 3.29



ภาพที่ 3.29 ขดลวดเหนี่ยวนำในวงจรไฟฟ้ากระแสตรง RL

เมื่อมีความต่างศักย์ไฟฟ้าที่คร่อมขดลวดตัวนำจะมีการนำกระแสไฟฟ้าอยู่ 90 องศา ดังภาพที่ 3.30



(ก) (ข)

ภาพที่ 3.30 (ก) เฟสของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ที่ขดลวดตัวนำ
(ข) มุมเฟสระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ที่ขดลวดตัวนำ

พิจารณาจากกฎของเคอร์ชอฟฟ์ ใช้ค่าความต่างศักย์ภายในวงจร $V = V_L$ เมื่อ L คือค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำจะได้

$$V = \frac{dI}{dt}L$$

และ

$$v = V_m \sin(\omega t)$$

จะได้

$$\frac{dI}{dt}L = V_m \sin(\omega t)$$

$$dI = \frac{V_m}{L}\sin(\omega t)dt$$

$$\int dI = \int \frac{V_m}{L}\sin(\omega t)dt$$

$$I = -\frac{V_m}{\omega L}\cos(\omega t)$$

$$I = -I_m \cos(\omega t) = I_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

เมื่อเปรียบเทียบกับสมการ

$$I_R = \frac{V_m}{R} = I_m \sin(\omega t)$$

จะได้ความต้านทานที่เกิดจากขดลวดเหนี่ยวนำ (X_L) คือ

$$X_L = \omega L \qquad (3\text{-}53)$$

ตัวอย่างที่ 3.9 จงหาความต้านทานที่เกิดจากการนำขดลวดเหนี่ยวนำขนาด 2 mH ไปต่อกับวงจรไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่กระแสไฟฟ้า 50 Hz

วิธีทำ จากสมการ

$$X_L = \omega L$$

และ

$$\omega = 2\pi f$$

จะได้

$$\omega = (2)(3.14)(50)$$

$$= 31.4 \text{ rad/s}$$

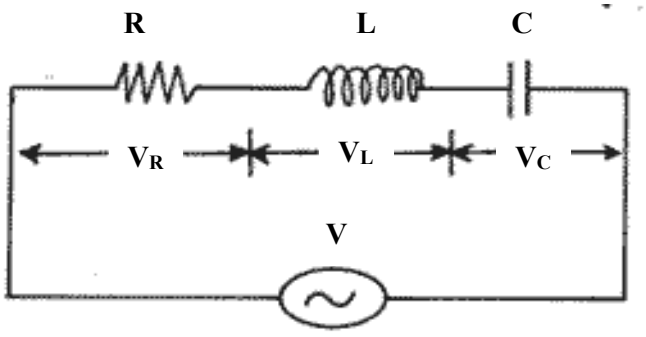
$$X_L = (31.4)(2 \times 10^{-3})$$

$$= 62.8 \text{ m}\Omega$$

<u>คำตอบ</u> ดังนั้น ความต้านทานที่เกิดจากการนำขดลวดเหนี่ยวนำเท่ากับ 62.8 มิลลิโอห์ม

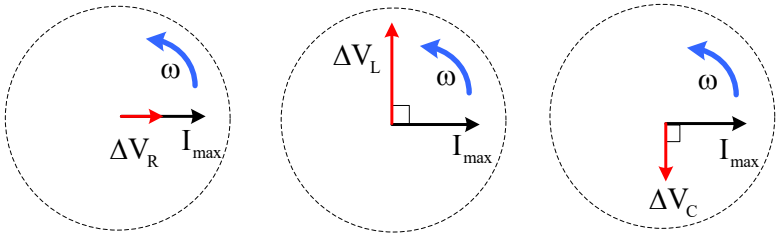
3.17 วงจรไฟฟ้ากระแสสลับ RLC (RLC circuit)

จากเรื่องที่ผ่านมาเราได้ศึกษาถึงความต้านทาน ขดลวดตัวนำ และตัวเก็บประจุที่ต่อในวงจรไฟฟ้ากระแสไฟฟ้าสลับ สำหรับในหัวข้อนี้จะศึกษาวงจร RLC ที่ต่ออนุกรมจากแหล่งกำเนิดที่ให้แรงเคลื่อนไฟฟ้ากับวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ ดังภาพที่ 3.31 เป็นการต่อวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ RLC



ภาพที่ 3.31 การต่อวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ RLC

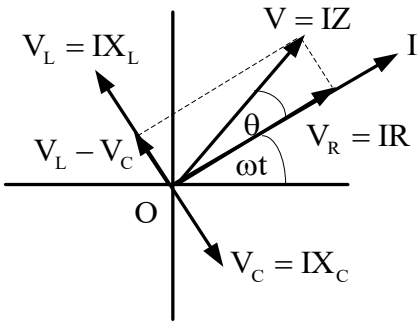
จากภาพเนื่องจากเฟสของกระแสกับความต่างศักย์ของตัวเก็บประจุและขดลวดเหนี่ยวนำมีความต่างเฟสกันดังภาพที่ 3.32 ทำให้สามารถวาดเฟสไดอะแกรมของตัวต้านทาน ขดลวดเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุได้ ดังนี้



(ก) ตัวต้านทาน (ข) ขดลวดเหนี่ยวนำ (ค) ตัวเก็บประจุ

ภาพที่ 3.32 เฟสของความต่างศักย์กับกระแสไฟฟ้า (ก) ตัวต้านทาน (ข) ขดลวด เหนี่ยวนำ (ค) ตัวเก็บประจุ

จากภาพที่ 3.32 จะเห็นว่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวต้านทานจะมีเฟสเดียวกันกับกระแสไฟฟ้า แต่ขดลวดเหนี่ยวนำจะมีความต่างศักย์ต่างเฟสกับกระแสไฟฟ้าอยู่ 90° เช่นเดียวกับกรณีของตัวเก็บประจุที่ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุจะมีเฟสตามหลังอยู่ 90°



ภาพที่ 3.33 มุมเฟสระหว่างความต่างศักย์กับกระแสไฟฟ้า

จากภาพที่ 3.33 จะได้

$$V^2 = V_R^2 + (V_L - V_C)^2$$

$$V^2 = I^2[R^2 + (X_L - X_C)^2]$$

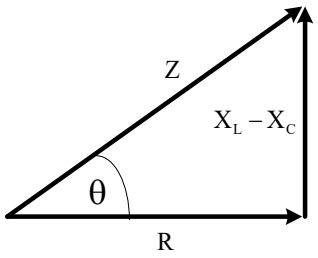
$$V = I\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

และให้ $V = IZ$

เมื่อ Z คือความต้านทานเชิงซ้อนโดยที่

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

เมื่อเขียนเป็นเวกเตอร์จะได้ดังภาพที่ 3.34



ภาพที่ 3.34 การรวมเวกเตอร์เพื่อหาค่าความต้านทานเชิงซ้อน

3.18 หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)

หม้อแปลงไฟฟ้า คือเครื่องมือสำหรับเพิ่ม หรือลดความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับให้สูงขึ้นหรือต่ำลง โดยอาศัยการเหนี่ยวนำไฟฟ้าระหว่างขดลวด มีส่วนประกอบง่ายๆ คือแกนเหล็กอ่อนตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสกลางกลวงโดยมากมัดจะใช้แผ่นเหล็กอ่อนบางๆ หลายๆ แผ่นอันซ้อนกัน แกนเหล็กอ่อน มีหน้าที่รวมเส้นแรงแม่เหล็กจากขดลวดขดที่หนึ่งไปเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสในขดลวดขดที่สอง ทั้งสองข้างของแกนเหล็กมีขดลวดหุ้มฉนวนบางพันไว้ข้างหนึ่งมีจำนวนรอบมาก อีกข้างหนึ่งมีจำนวนรอบน้อย ขดลวดด้านที่ต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับเรียกว่าขดลวดปฐมภูมิ (primary coil) ขดลวดอีกขดหนึ่งเรียกว่าขดลวดทุติยภูมิ (secondary coil) นอกจากนั้นยังมีหม้อแปลงไฟฟ้าจากวัสดุที่เรียกว่าวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกส์ ซึ่งสามารถที่จะเปลี่ยนพลังงานกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้า หรือเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลได้ สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติพลังงานที่สูญเสียในขดลวดและในแกนเหล็กมีค่าเป็นศูนย์ จากกฎของฟาราเดย์ศักย์ไฟฟ้าที่คร่อมส่วนปฐมภูมิคือ

$$V = -N\frac{d\Phi_B}{dt} \qquad (3\text{-}54)$$

เมื่อ Φ_B คือฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวดแต่ละรอบ ถ้าเราสมมติว่าเส้นสนามแม่เหล็กทั้งหมดยังคงอยู่ในแกนเหล็ก ฟลักซ์ที่ผ่านขดลวดปฐมภูมิแต่ละรอบจะเท่ากับฟลักซ์ที่ผ่านขดลวดทุติยภูมิแต่ละรอบ ดังนั้นเราสามารถคำนวณหาค่าศักย์ไฟฟ้าคร่อมขดลวดแต่ละขดได้คือ

$$V_2 = \frac{N_2}{N_1} V_1 \qquad (3\text{-}55)$$

เมื่อ $N_2 > N_1$ ศักย์ไฟฟ้าขาออก V_2 จะมากกว่าศักย์ไฟฟ้าขาเข้า V_1 การจัดวางองค์ประกอบแบบนี้จะเรียกว่า หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเพิ่มศักย์ไฟฟ้าขาออก $N_2 < N_1$ ศักย์ไฟฟ้าขาออกจะน้อยกว่าขาเข้า เราจะเรียกว่า หม้อแปลงไฟฟ้าแบบลดศักย์ไฟฟ้าขาออก สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มักได้รับกำลังไฟฟ้าจากตัวแปลงไฟฟ้าสลับที่ประกอบด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าที่จะเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าสลับให้มีค่าลดลง ในอุปกรณ์ไฟฟ้าหลายชนิด ตัวแปลงไฟฟ้านี้ยังทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรงอีกด้วย อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในครัวเรือนจำนวนมากต้องการศักย์ไฟฟ้าต่ำ หม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กซึ่งต่อโดยตรงกับปลั๊กที่อยู่ข้างผนังในบ้านเราสามารถทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมได้

3.19 บทสรุป

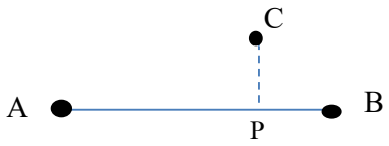
ไฟฟ้าสถิตเกิดจากประจุฟ้าที่สะสมอยู่ในวัสดุหรือสสาร ซึ่งประกอบไปด้วยประจุสามชนิด ได้แก่ โปรตรอน นิวตรอน และอิเล็กตรอน โดยเราสามารถทำให้เกิดประจุไฟฟ้าได้โดยการเหนี่ยวนำไฟฟ้า การสัมผัส และการขัดสี ซึ่งเมื่อประจุไฟฟ้าถูกนำมาวางอยู่ใกล้กันถ้าเป็นประจุชนิดเดียวกันจะเกิดแรงผลักกัน ประจุต่างชนิดเดียวกันจะเกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน แรงทางไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นจากประจุนี้สามารถคำนวณได้โดยใช้กฎของคูลอมบ์ ซึ่งจะเกิดรอบบริเวณที่มีประจุอยู่และสามารถแผ่อำนาจของแรงออกไปได้ เรียกว่า สนามไฟฟ้า สามารถใช้เส้นสมมติที่เรียกว่า เส้นแรงไฟฟ้าในการแสดงขนาดของสนามไฟฟ้า ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ได้ และเมื่อมีสนามไฟฟ้าก็จะทำให้ทราบถึงศักย์ไฟฟ้า ซึ่งคือผลของงานในการเคลื่อนประจุไฟฟ้าจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งนั่นเอง

กระแสไฟฟ้าเกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุบวกและประจุลบ โดยกระแสไฟฟ้าเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวนำที่มีความต้านทานไฟฟ้าขนาดของกระแสไฟฟ้าจะแปรผกผันกับความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งคำนวณได้โดยใช้กฎของโอห์ม สำหรับการต่อตัวต้านทานมีสองแบบคือการต่อแบบขนานและการต่อแบบอนุกรม โดยการต่อแต่ละแบบก็จะให้ผลรวมของความต้านทานที่แตกต่างกัน ไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งเป็นไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมีลักษณะของเฟสที่แตกต่างกันระหว่างกระแสและความต่างศักย์โดยเมื่อต่อกับความต้านทานเฟสของความต่างศักย์จะตรงกับกระแส เมื่อต่อกับ

ขดลวดเหนี่ยวนำเฟสของความต่างศักย์จะตามกระแสอยู่ 90 องศา และเมื่อต่อกับตัวเก็บประจุเฟสของความต่างศักย์จะนำกระแสอยู่ 90 องศา โดยแต่ละกรณีจะมีความต้านทานที่แตกต่างกันซึ่งสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานเหล่านั้นได้ และเมื่อนำวงจรมาต่อกับตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุและขดลวดเหนี่ยวนำก็จะได้ความต้านทานรวมเรียกว่าความต้านทานเชิงซ้อน

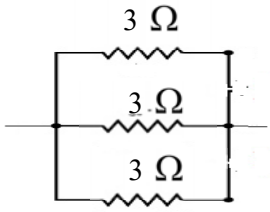
แบบฝึกหัด

1. วางประจุบนผิวของทรงกลมตัวนำที่อยู่โดดเดี่ยวรัศมี 2.7 เซนติเมตร ความหนาแน่นประจุเชิงผิวมีค่าสม่ำเสมอและมีค่าเป็น 6.9×10^{-6} คูลอมบ์ต่อตารางเมตร แล้วทรงกลมนี้มีประจุทั้งหมดเท่าไร [คำตอบ 6.3×10^{-8} คูลอมบ์]
2. ถ้าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวโลหะทรงกลมรัศมี R มีค่าเท่ากับ Vo จงหาสนามไฟฟ้าที่ระยะ 2R จากจุดศูนย์กลางของทรงกลม [คำตอบ $\frac{Vo}{4R}$]
3. จากรูป A, B และ C มีจุดประจุขนาด 3 x 10^{-6}, 1 x 10^{-6} และ -1 x 10^{-6} คูลอมบ์ ตามลำดับ เมื่อ AP = 0.6 เมตร CP = 0.3 เมตร และ BP = 0.1 เมตร ศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่ง P มีค่าเท่าใด [คำตอบ 1.05×10^5 โวลต์]



ภาพที่ 3.35 สำหรับคำถามข้อ 3

4. จากรูปความต้านทานรวมมีค่าเท่ากับเท่าไร [คำตอบ 1 โอห์ม]



ภาพที่ 3.36 สำหรับคำถามข้อ 4

5. จากข้อ 4 ถ้าทำให้เกิดความต่างศักย์รวมในวงจรเท่ากับ 6 โวลต์ ความต่างศักย์ที่ คร่อมตัวต้านทานแต่ละตัวมีค่าเท่าไร [คำตอบ 6 โอห์ม]

6. จากข้อ 4 ถ้าปล่อยให้กระแสไฟฟ้าขนาด 2 แอมแปร์ไหลในวงจร จงหาความต่างศักย์ที่ตัวต้านทานแต่ละตัว [คำตอบ 6 โวลต์]

7. วงจรกระแสสลับความถี่ 50 เฮิรตซ์ มีตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ วัดกระแสไฟฟ้าในวงจรได้ 0.1 แอมแปร์ ความต่างศักย์คร่อมตัวเหนี่ยวนำ 22 โวลต์ ค่าความเหนี่ยวนำจะเป็นเท่าใด [คำตอบ 0.7 เฮนรี]

เอกสารอ้างอิง

ปิยพงษ์ สิทธิคง. (2548). ฟิสิกส์ระดับอุดมศึกษา เล่ม 2. กรุงเทพมหานคร: วิรัตน์ เอ็ดดูเคชั่น จำกัด

ณัฐกานต์ วงศ์ใหญ่. **เครื่องกำเนิดแวนเดอแกรฟฟ์**. สืบค้น 5 เมษายน 2563 จาก https://sites.google.com/site/fisiksthudey/fifasthit/snam-fifa

พงษ์ศักดิ์ ชินนาบุญ. (2552). ฟิสิกส์มหาวิทยาลัย 2 เล่ม 1. กรุงเทพมหานคร: วิทยพัฒน์.

ยัง และ เฟรดแมน. (2548). ฟิสิกส์ระดับอุดมศึกษา เล่ม 2. (แปลจาก University Physics with Modern Physics โดย ปิยพงษ์ สิทธิคง). กรุงเทพมหานคร: เพียร์สัน เอ็ดดูเคชั่นอินโดไชน่า.

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. **การทดลองของมิลลิแกน**. สืบค้น 30 มกราคม 2563 จาก https://www.scimath.org/lesson-physics/item/7270-electron

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. **มวลของประจุอิเล็กตรอน**. สืบค้น 31 มกราคม 2563 จาก http://www.physic2u.com/Topic56/ChargeInElectricFilelds.html

สุชาติ สุภาพ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. (2558). ฟิสิกส์ทั่วไป. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ทริปเพิ้ล เอ็ดดูเคชั่น.

Bellance, J, and Brandt, R. (2010). 21st Century Skills Rethinking How Students Learn. Solution Tree Press.

Halpern, A. (2011). Schaum's outlines 3,000 Solved Problems in Physics. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc.

Serway, R. A., and Jewett, J. W. (2014). Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics 9th ed. Belmont: Brooks/Cole-Thomson Learning.

Serway, R.A., Vuille, C., and Hughes, J. (2015). College Physics 10th ed. Stamford: Cengage Learning.

Thornton, T.S., and Rex, A. (2013). Modern Physics for Scientists and Engineers 4th ed. Boston: Brooks/Cole- Cengage Learning.

Young, H.D., and Freedman, R.A. (2016). Sear's & Zemansky's University Physics with Modern Physics 14th ed. Essex: Pearson Education Limited.

https://www.youtube.com/watch?v=gI246k9vMCM