

บทที่ 10

ไฟฟ้ากระแสตรง

10.1 กระแสไฟฟ้า

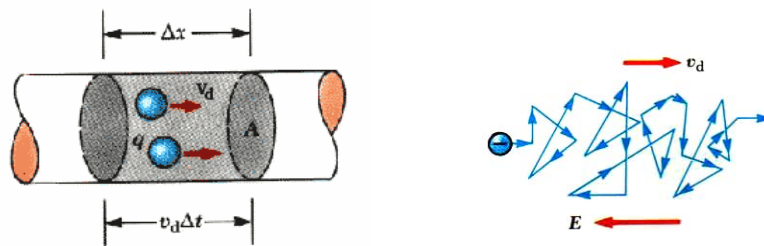
ถ้าประจุมีการเคลื่อนที่จากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง หรือเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดใดๆ กล่าวได้ว่า มีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นบริเวณนั้น นิยามของกระแสไฟฟ้า (Electric Current, I) คือ อัตราการเคลื่อนที่ของประจุผ่านพื้นที่หน้าตัด เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I = \frac{q}{t}$$

หน่วยของกระแสไฟฟ้าคือ โคลอมบ์ต่อวินาที (C/s) เรียกหน่วยนี้ว่า แอมแปร์ (A) เพื่อเป็นเกียรติแก่นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส

เมื่อนำตัวนำวางในสนามไฟฟ้าจะเกิดความต่างศักย์ที่ปลายทั้งสองของตัวนำ สนามไฟฟ้าทำให้เกิดแรงบนอิเล็กตรอนอิสระ ประจุบวกในอะตอมของตัวนำก็ถูกแรงกระทำเช่นเดียวกัน แต่แรงยึดเหนี่ยวภายในนิวเคลียสจะยึดเอาไว้ไม่ให้เคลื่อนที่ได้ เนื่องจากแรงไฟฟ้าที่กระทำบนอิเล็กตรอนมีทิศตรงข้ามกับทิศของสนามไฟฟ้า อิเล็กตรอนจึงเคลื่อนที่สวนกับสนามไฟฟ้า อิเล็กตรอนจะจัดตัวมันเองในลักษณะที่ทำให้ศักย์ไฟฟ้าในเส้นลวดตัวนำมีค่าคงที่ (สนามไฟฟ้าภายในตัวนำมีค่าเป็นศูนย์) เหตุการณ์นี้เกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจึงเกิดขึ้นเพียงระยะเวลาสั้นๆ และจะไม่เกิดกระแสไฟฟ้าในตัวนำอีก กระแสไฟฟ้านี้เรียกว่า กระแสไฟฟ้าชั่วขณะ (transient current) ถ้าจะให้กระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ต้องทำให้สนามไฟฟ้าในตัวนำมีค่าคงที่อยู่ตลอดเวลา

ปริมาณกระแสไฟฟ้าสามารถเขียนอยู่ในรูปของความเร็วของประจุและพื้นที่หน้าตัด ให้อิเล็กตรอนในตัวนำเคลื่อนที่ด้วยความเร็วล่องลอย v_d (drift velocity) ความเร็วของอิเล็กตรอนแต่ละตัวจะต่างกัน เพราะอิเล็กตรอนมีการชนกันเองภายในตัวนำ ทำให้ทิศทางการเคลื่อนที่เปลี่ยนไปด้วย



รูปที่ 10.1 อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในตัวนำ ด้วยความเร็วล่องลอย

อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านตัวนำซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด A ระยะทางที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้ในเวลา dt คือ $v_d dt$ ให้ n คือจำนวนอิเล็กตรอนต่อปริมาตร ภายในเวลา Δt จำนวนอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัด A จะมีจำนวนเท่ากับ $nAv_d \Delta t$ และขนาดประจุของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ Δq ดังนั้นจะได้

$$\begin{aligned} \Delta q &= enAv_d \Delta t \\ \frac{\Delta q}{\Delta t} &= enAv_d \end{aligned} \tag{10.1}$$

10.2 กฎของโอห์ม

เมื่อต่อปลายเส้นลวดตัวนำเข้ากับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเส้นลวดตัวนำ ถ้าความต่างศักย์ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นก็จะมีเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ผ่านเส้นลวดตัวนำนั้นแปรผันตรงกับความต่างศักย์ระหว่างปลายของเส้นลวดตัวนำ เขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$I = \frac{V}{R}$$

ดังนั้น $I = kV$ เมื่อ k เป็นค่าคงที่ของการแปรผัน

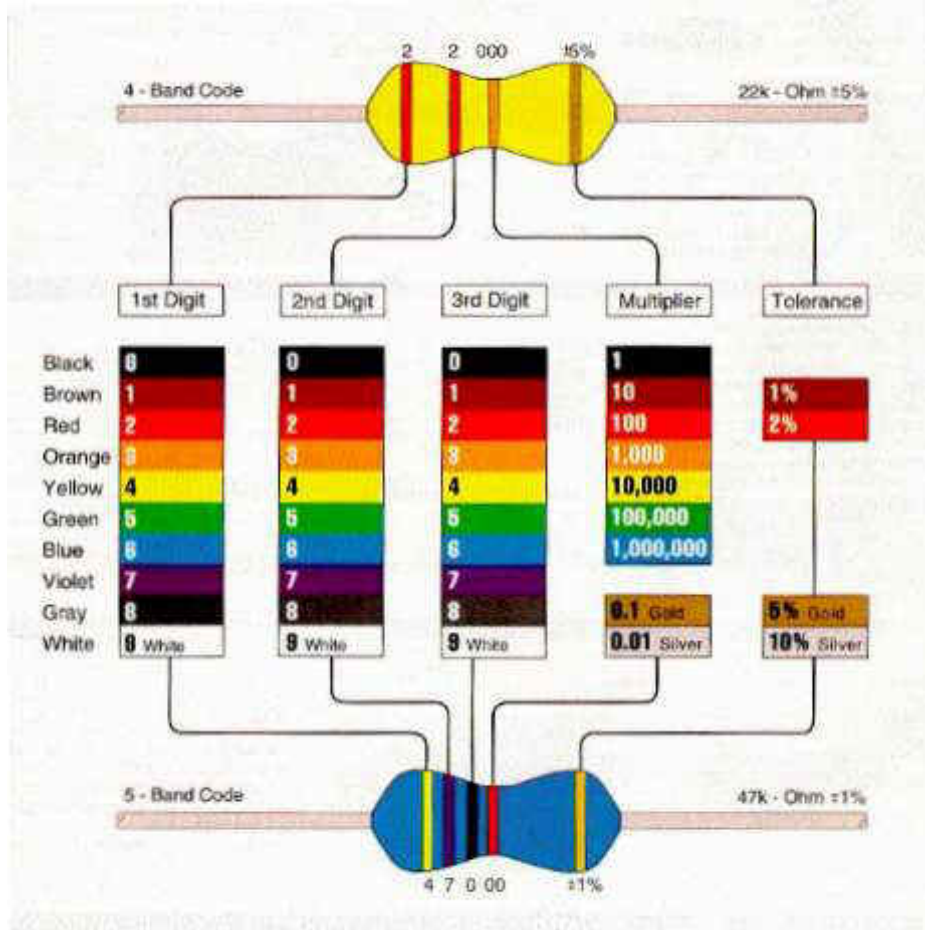
$$\text{ถ้าให้ } \frac{1}{k} = R$$

$$\text{จะได้ } \frac{V}{I} = R \quad (10.2)$$

ค่าคงที่ R นี้เรียกว่า ความต้านทาน (Resistance) มีหน่วยเป็น โวลต์/แอมแปร์ หรือ โอห์ม แทนด้วยสัญลักษณ์ Ω ความสัมพันธ์นี้เรียกว่า กฎของโอห์ม

10.2.1 ตัวต้านทาน

ตัวต้านทานมักทำจากผงคาร์บอนอัดเป็นรูปทรงกระบอกเล็ก ๆ ตัวต้านทานนี้มีค่าความต้านทานคงตัว (fix resistance) เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $\nabla \nabla \nabla$ และใช้แถบสีบอกความต้านทานดังรูปที่ 10.2



รูปที่ 10.2 ตัวต้านทานแบบค่าคงตัว

10.2.2 สภาพต้านทานไฟฟ้าและสภาพนำไฟฟ้า

เมื่อต่อแบตเตอรี่เข้ากับเส้นลวดตัวนำ แล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างปลายทั้งสองข้างของเส้นลวด (V) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเส้นลวดตัวนำ (I) นั้น ถ้าใช้เส้นลวดตัวนำชนิดเดียวกัน แต่ความยาว L ต่างกัน พบว่าอัตราส่วนระหว่าง V กับ I แปรผันตรงกับ ความยาวของเส้นลวดนั้น ดังความสัมพันธ์

$$\frac{V}{I} = L$$

ถ้าใช้เส้นลวดที่มีความยาวเท่ากัน แต่มีพื้นที่หน้าตัด A ต่าง ๆ กัน พบว่าอัตราส่วนระหว่าง V กับ I แปรผกผันกับ A หรือเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ว่า

$$\frac{V}{I} = \frac{L}{A}$$

จากกฎของโอห์มจะได้ว่า

$$R \propto \frac{L}{A}$$

ดังนั้น

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad \text{เมื่อ } \rho \text{ เป็นค่าคงที่} \quad (10.3)$$

ค่าคงที่ ρ เรียกว่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีหน่วยเป็น โอห์ม-เมตร

ตารางที่ 10.1 แสดงสภาพความต้านทานของสารต่างๆ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส⁽¹⁾

	ρ ($\Omega \cdot \text{m}$)	สัมประสิทธิ์ของความต้านทานแปรตามอุณหภูมิ (/ องศาเซลเซียส)
อลูมิเนียม	2.6×10^{-8}	0.0039
ทองแดง	1.7×10^{-8}	0.0039
เหล็ก	12×10^{-8}	0.0050
ตะกั่ว	21×10^{-8}	0.0043
ปรอท	98×10^{-8}	0.008
พลาสติกินัม	11×10^{-8}	0.0036
เงิน	1.6×10^{-8}	0.0038
เยอรมาเนียม	0.5	-
แก้ว	$10^{10} - 10^{14}$	-
กำมะถัน	10^{15}	-

⁽¹⁾Beiser, Arthur., **Physics**, (California: Benjamin/Cummings Publishing, 1982) p. 422

สภาพต้านทานไฟฟ้าเป็นสมบัติเฉพาะของสารชนิดหนึ่ง ๆ ส่วนความต้านทานขึ้นกับขนาดของสารแต่ละชิ้น สารที่มีความต้านทานมากจะยอมให้กระแสไฟฟ้าผ่านน้อย จึงกล่าวได้ว่าสารนั้นมีความนำไฟฟ้าน้อย ดังนั้น ความนำไฟฟ้าจึงเป็นส่วนกลับของความต้านทานไฟฟ้า มีหน่วยเป็น (โอห์ม)⁻¹ หรือ ซีเมนส์ แทนด้วยสัญลักษณ์ S สำหรับสารที่มีสภาพต้านทานไฟฟ้ามากก็จะมีสภาพนำไฟฟ้าน้อย สภาพนำไฟฟ้ามีหน่วยเป็น (โอห์ม-เมตร)⁻¹ แทนด้วยสัญลักษณ์ σ

ตัวอย่างที่ 10.1 จงหาความต้านทานของเส้นลวดทองแดงยาว 5 เมตร มีพื้นที่ภาคตัดขวาง 6.56×10^{-3} ตารางเซนติเมตร กำหนดให้สภาพความต้านทานของทองแดงที่อุณหภูมิ 20°C เท่ากับ 1.72×10^{-8} โอห์ม-เมตร

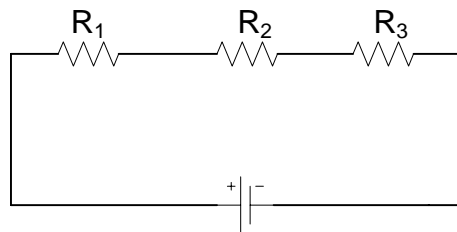
$$\begin{aligned} \text{วิธีทำ} \quad \text{จากความสัมพันธ์ } R &= \rho \frac{L}{A} \\ &= (1.72 \times 10^{-8}) \frac{(5)}{(6.56 \times 10^{-3} \times 10^{-2} \times 10^{-2})} \\ &= 0.1296 \Omega \end{aligned}$$

คำตอบ ความต้านทานของเส้นลวดทองแดงยาวมีค่าเท่ากับ 0.1296 โอห์ม

10.2.3 การต่อตัวต้านทาน

การต่อความต้านทานแบบต่าง ๆ จะต่อได้ 3 วิธี คือ แบบอนุกรม แบบขนาน และแบบผสม

1. การต่อความต้านทานแบบอนุกรม



การต่อตัวต้านทานแบบอนุกรม

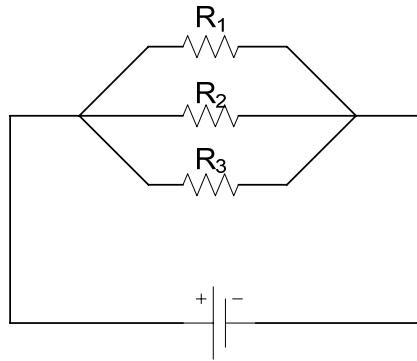
ผลที่ได้จากการต่อความต้านทานแบบอนุกรมคือ

- กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทานแต่ละตัวมีค่าเท่ากัน
- ความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุด เท่ากับผลรวมของความต่างศักย์ย่อยในระหว่างจุดทั้งสองนั้น
- ความต้านทานรวมระหว่างจุดสองจุดเท่ากับผลรวมของความต้านทานทั้งหลายที่อยู่ระหว่างจุดสองจุดนั้น

ดังนั้นจากรูปจะได้ว่า

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

2. การต่อความต้านทานแบบขนาน



ผลที่ได้จากการต่อความต้านทานแบบขนาน คือ

- กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าที่จุดปลายของการต่อแบบขนานจะเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่ออกที่จุดปลายอีกจุดหนึ่งของการต่อแบบขนาน และจะมีค่าเท่ากับผลรวมของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทานแต่ละตัว
- ความต่างศักย์ระหว่างจุดปลายทั้งสอง จะเท่ากับผลคูณระหว่างกระแสทั้งหมดกับความต้านทานรวม และจะมีค่าเท่ากับความต่างศักย์ที่คร่อมตัวต้านทานแต่ละตัว
- ส่วนกลับของความต้านทานรวมจะมีค่าเท่ากับผลรวมของส่วนกลับของความต้านทานแต่ละตัว

ดังนั้นจากรูปจะได้ว่า

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

10.3 กำลังไฟฟ้า

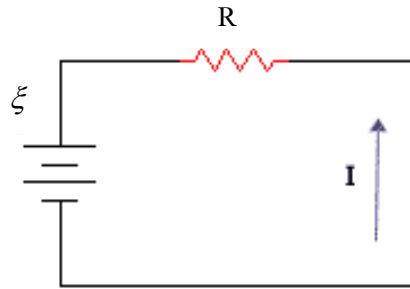
แรงเคลื่อนไฟฟ้า (Electromotive force) เกิดจากพลังงานรูปอื่นๆ เช่น พลังงานเคมี พลังงานกล ฯลฯ เปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า ทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุด 2 จุดที่มันต่ออยู่มีค่าคงที่เสมอ (ในกรณีกระแสตรง) อุปกรณ์ที่ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า ได้แก่ แบตเตอรี่ ถ่านไฟฉาย และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้า คืองานที่ใช้ในการเคลื่อนประจุขนาด 1 หน่วย ผ่านพื้นที่หน้าตัดตัวนำหนึ่ง จากรูปที่ 10.3 แหล่งกำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขนาด ξ เคลื่อนประจุบวกขนาด dq จากศักย์ไฟฟ้าบวกไปหาศักย์ไฟฟ้าลบเป็น dW ในเวลา dt จะได้

$$\xi = \frac{dW}{dq}$$

แต่กำลังไฟฟ้า

$$P = \frac{dW}{dt} = \xi \frac{dq}{dt} = \xi I$$



รูปที่ 10.3 วงจรไฟฟ้าเบื้องต้น

ถ้าอุปกรณ์มีความต้านทาน R สอดคล้องกับกฎของโอห์มจะได้ $P = I^2R$ พลังงานจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า I ในวงจร ให้แหล่งจ่ายไฟมีความต้านทานภายใน r พลังงานของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจะต้องสูญเสียให้แก่อุปกรณ์ที่มีความต้านทาน R (อาจสูญเสียไปในรูปของแสง ความร้อน) และสูญเสียที่แหล่งจ่ายไฟที่มีความต้านทานภายใน r ดังนั้น สมการวงจรไฟฟ้า (circuit equation) คือ

$$\begin{aligned}\xi I &= I^2R + I^2r \\ I &= \frac{\xi}{R+r}\end{aligned}\quad (10.4)$$

ตัวอย่าง 10.2 ถ้าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่เท่ากับ $1,000 \Omega$ แรงเคลื่อนไฟฟ้าขณะที่ยังไม่ต่อกับวงจรภายนอกมีค่าเท่ากับ 100 V จงหากำลังไฟฟ้าที่ตัวต้านทานเมื่อมีค่าต่าง ๆ กัน

- ก) 500Ω
- ข) 1000Ω
- ค) 1500Ω

วิธีทำ

- ก) เมื่อ $R = 500 \Omega$

$$I = \frac{\xi}{R+r} = \frac{100}{500+1000} = 0.0667 \quad \text{A}$$

ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมบนตัวต้านทาน $V = IR = 33.4 \quad \text{V}$

กำลังไฟฟ้าบนตัวต้านทาน $P = VI = 33.4 \times 0.0667 = 2.22 \quad \text{W}$

- ข) เมื่อ $R = 1,000 \Omega$

$$I = \frac{\xi}{R+r} = \frac{100}{1000+1000} = 0.05 \quad \text{A}$$

ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมบนตัวต้านทาน $V = IR = 50 \quad \text{V}$

กำลังไฟฟ้าบนตัวต้านทาน $P = VI = 50 \times 0.05 = 2.5 \quad \text{W}$

ค) เมื่อ $R = 1,500 \Omega$

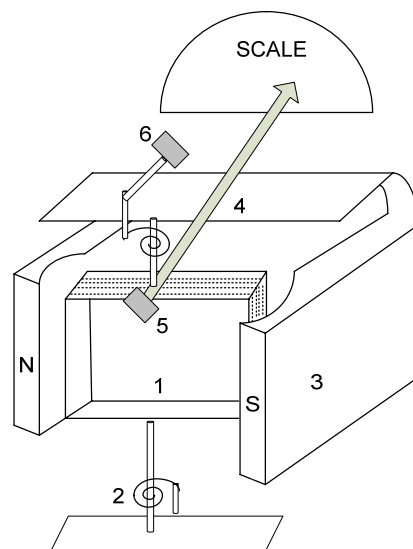
$$I = \frac{\xi}{R+r} = \frac{100}{1500+1000} = 0.04 \quad \text{A}$$

ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมบนตัวต้านทาน $V = IR = 60 \quad \text{V}$

กำลังไฟฟ้าบนตัวต้านทาน $P = VI = 60 \times 0.04 = 2.4 \quad \text{W}$

10.4 เครื่องมือวัดไฟฟ้า

กัลวานอมิเตอร์ เป็นเครื่องมือสำหรับวัดทางไฟฟ้า อาศัยหลักการที่ว่าเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข้าไปในขดลวดที่วางอยู่ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก จะเกิดแรงกระทำที่ขดลวดและเข็มชี้สเกล ทำให้เข็มชี้สเกลที่หน้าปัดเบี่ยงเบนไป กัลวานอมิเตอร์อาจแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ แบบแม่เหล็กเคลื่อนที่และแบบขดลวดเคลื่อนที่ซึ่งเป็นแบบที่นิยมใช้กัน

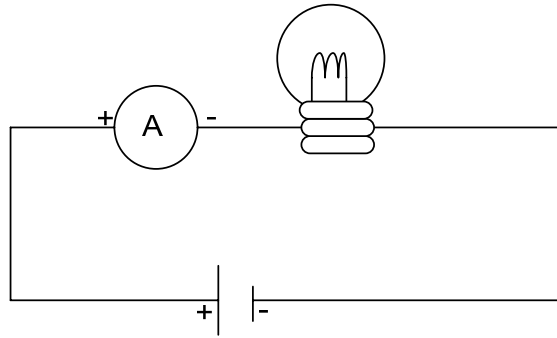


ส่วนประกอบของกัลวานอมิเตอร์

1. ขดลวดทองแดง
2. สปริงขนาดเล็ก
3. แม่เหล็กรูปโค้ง
4. เข็มวัดกระแสไฟฟ้า
5. น้ำหนักถ่วง
6. ที่ปรับศูนย์

รูปที่ 10.4 องค์ประกอบของกัลวานอมิเตอร์

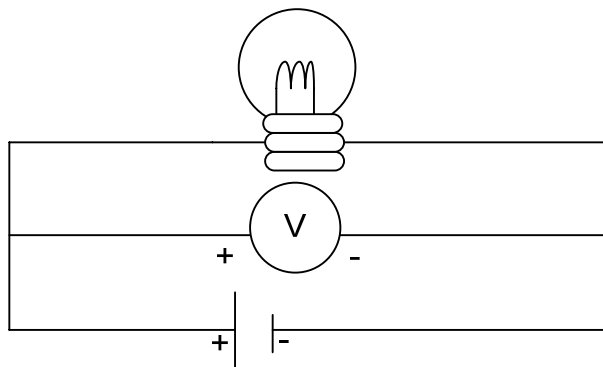
แอมมิเตอร์ คือเครื่องมือสำหรับวัดกระแสไฟฟ้าในวงจร จัดเป็นกัลวานอมิเตอร์ชนิดขดลวดเคลื่อนที่ การใช้แอมมิเตอร์วัดกระแสไฟฟ้าในวงจรต้องต่ออนุกรมกับวงจร แอมมิเตอร์ควรมีความต้านทานน้อยที่สุด เพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านแอมมิเตอร์ได้มากที่สุด



แผนภาพการต่อแอมมิเตอร์

รูปที่ 10.5 การใช้แอมมิเตอร์วัดกระแสไฟฟ้าในวงจร

โวลต์มิเตอร์ คือเครื่องมือสำหรับวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุดสองจุดในวงจร จัดเป็นกัลวานอมิเตอร์ชนิดขดลวดเคลื่อนที่ การใช้โวลต์มิเตอร์วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุดสองจุดต้องต่อขานระหว่างจุดสองจุดที่จะวัด และโวลต์มิเตอร์ควรมีความต้านทานมากที่สุดเพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านโวลต์มิเตอร์ให้น้อยที่สุด



แผนภาพการต่อโวลต์มิเตอร์

รูปที่ 10.6 การใช้โวลต์มิเตอร์วัดความต่างศักย์

โอห์มมิเตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าความต้านทานไฟฟ้า โดยการดัดแปลงจากแอมมิเตอร์ให้สามารถวัดค่าและแสดงค่าออกมาเป็นค่าความต้านทานได้โดยตรง เพราะคุณสมบัติของค่าความต้านทาน จะคอยต้านการไหลของกระแสในวงจร เมื่อความต้านทานในวงจรแตกต่างกัน ย่อมทำให้กระแสไหลผ่านวงจรแตกต่างกัน ความต้านทานในวงจรน้อยกระแสไหลผ่านวงจรมาก และความต้านทานในวงจรมากกระแสไหลผ่านวงจรมีน้อย สภาวะกระแสที่ไหลผ่านแอมมิเตอร์แตกต่างกัน ทำให้เข็มชี้ของแอมมิเตอร์เบี่ยงเบนไปแตกต่างกัน

ปัจจุบันมีการดัดแปลงกัลวานอมิเตอร์ให้เป็นแอมมิเตอร์ โวลต์มิเตอร์ และ โอห์มมิเตอร์ ในเครื่องเดียวกัน เรียกว่า มัลติมิเตอร์ ดังรูปที่ 10.7



รูปที่ 10.7 อนุลอกมัลติมิเตอร์

มัลติมิเตอร์ดังกล่าวแสดงผลด้วยขีดสเกล ซึ่งต้องมีการประมาณค่าระหว่างขีดสเกล ปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์มาพัฒนา มัลติมิเตอร์ให้แสดงผลเป็นตัวเลข เรียกว่า ดิจิตัลมัลติมิเตอร์ ดังรูปที่ 10.8



รูปที่ 10.8 ดิจิตัลมัลติมิเตอร์

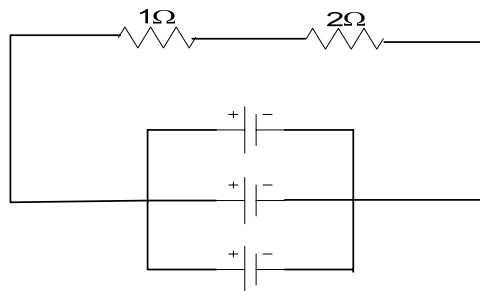
แบบฝึกหัดบทที่ 10

1. ลวดโลหะเส้นหนึ่งที่มีพื้นที่ภาคตัดขวาง 1 ตารางมิลลิเมตร ถ้ามีกระแสไฟฟ้าจำนวนหนึ่งไหลผ่านลวดนี้ในเวลา 4 วินาที โดยขนาดความเร็วลอยเลื่อนของอิเล็กตรอนเท่ากับ 0.02 เซนติเมตรต่อวินาที กำหนดให้ความหนาแน่นอิเล็กตรอนอิสระของโลหะชนิดนี้เท่ากับ 1×10^{29} ต่อลูกบาศก์เมตร และประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอนอิสระเท่ากับ 1.6×10^{-19} คูโลมน์ จงหาปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านเส้นลวดนี้ในเวลาดังกล่าว
2. ลวดซึ่งมีความต้านทาน 6 โอห์ม ถูกรีดออกให้ยาวเป็น 4 เท่าของความยาวเดิม ถ้าสภาพต้านทานและความหนาแน่นของเส้นลวดนี้มีค่าคงเดิม จงหาค่าความต้านทานใหม่
3. ลวดต้านทานเส้นหนึ่งมีความต้านทาน 10 โอห์ม เมื่อต่อปลายทั้งสองเข้ากับความต่างศักย์ 1.5 โวลต์ จะมีค่ากระแสไฟฟ้าผ่านลวดนี้กี่เท่าใด
4. จงหาความต้านทานรวมของตัวต้านทาน 4 ตัว ซึ่งมีความต้านทาน $1\ \Omega$ $2\ \Omega$ $4\ \Omega$ และ $8\ \Omega$ เมื่อต่อแบบ

ก. แบบอนุกรม

ข. แบบขนาน

5. แบตเตอรี่ตัวหนึ่งประกอบด้วยเซลล์ไฟฟ้า 3 เซลล์ มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเซลล์ละ 1.5 โวลต์ ความต้านทานภายในเซลล์ละ 0.18 โอห์ม ต่อกับความต้านทานภายนอกดังรูป จงหากระแสไฟฟ้าในวงจร



6. ให้นักศึกษาทำการทดลองเสมือนจริงเรื่อง สภาพนำไฟฟ้าและความต้านทานของตัวนำที่

<http://www.rmutphysics.com/charud/virtualexperiment/virtual2/ohm/index.html>

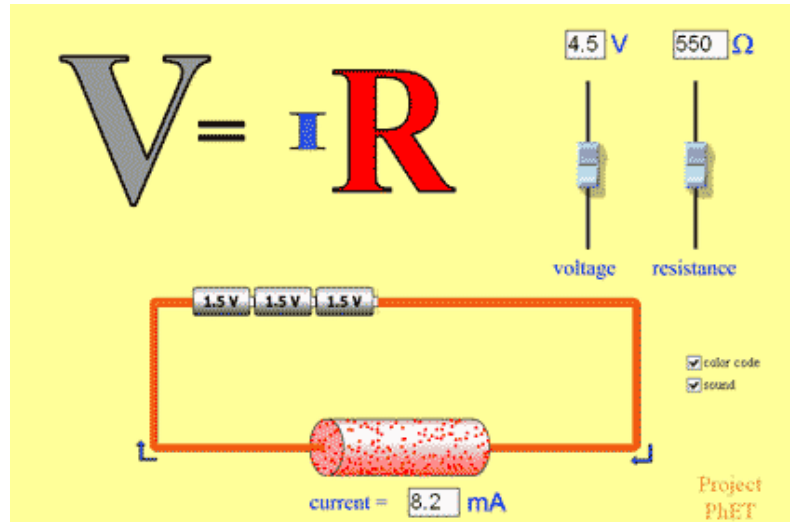
The screenshot shows a virtual experiment interface. On the left, the formula $R = \frac{\rho L}{A}$ is displayed in large red letters. Above the formula, a text box shows 'resistance = 1.25 ohm'. To the right of the formula, there are three vertical sliders representing parameters: ρ (resistivity), L (length), and A (cross-sectional area). Above each slider is a numerical value: 0.5 for ρ (with units $\Omega \text{ cm}$ above it), 10 for L (with units 'cm' above it), and 4.01 for A (with units cm^2 above it). Below the sliders is a 3D cylindrical wire with a dotted texture, representing the physical object being modeled.

จงตอบคำถามต่อไปนี้

1. ปรับรับค่าตัวใดที่ทำให้ความต้านทานลดลง
2. จุดสีดำในเส้นลวดใช้แทนอะไร

7. ให้นักศึกษาทำการทดลองเสมือนจริง เรื่องกฎของโอห์มที่

<http://www.rmutphysics.com/charud/virtualexperiment/virtual2/ohm/ohm2.html>



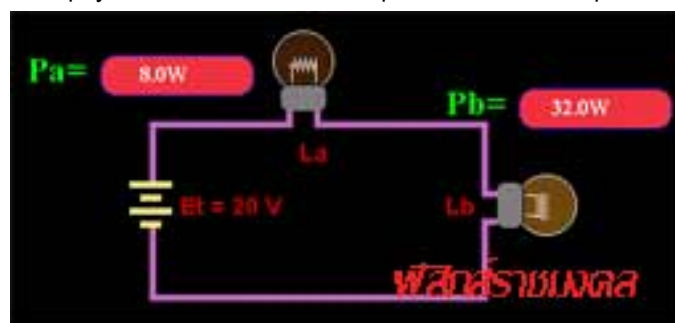
ตอบคำถามลงในตารางด้วยตนเอง 4 ค่า (ใส่เป็นตัวอย่างให้ดู 1 ค่า)

V	R	ทดลอง(mA)	คำนวณ(mA)
4.5	550	8.2	8.18

$I \text{ คำนวณ} = V/R = 4.5/550 = 8.18 \times 10^{-3} \text{ A} = 8.18 \text{ mA}$

8. ให้นักศึกษาทำการทดลองเสมือนจริง เรื่องหลอดไฟที่

<http://www.rmutphysics.com/charud/virtualexperiment/virtual1/experiment2/flur.html>

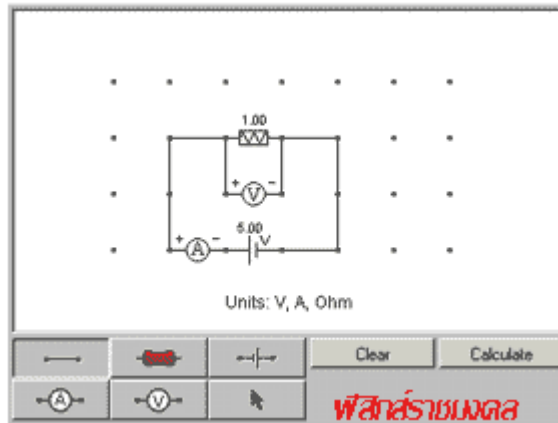


จากภาพการทดลองดังกล่าว หลอดไฟฟ้า 2 หลอดคือหลอด A และหลอด B ต่ออนุกรมกับเครื่องจ่ายไฟ 20 V ดังรูป เมื่อเราเปลี่ยนค่าความต้านทานของหลอดไฟ A และหลอดไฟ B จะได้ภาพของหลอดไฟที่มีความสว่างแตกต่างกันออกไป ซึ่งหาได้จากสูตร $P = E^2 / R$

9. ให้นักศึกษาทำการทดลองเสมือนจริง เรื่องวงจรไฟฟ้ากระแสตรงที่

<http://www.rmutphysics.com/charud/virtualexperiment/Explore/DirectCurrent/DirectCurrentthai.htm>

สร้างวงจรดังรูป



กำหนดค่า V , I และ R ตามความเหมาะสม

V (โวลต์)	I (กระแส) แอมแปร์
1	
2	
3	
4	
5	

วาดกราฟระหว่าง V (แกน y) กับ I (แกน x)



ความชันของกราฟ $V / I =$ _____ มีค่าเท่ากับค่าความต้านทาน R

หนังสืออิเล็กทรอนิกส์	
ฟิสิกส์ 1(ภาคกลศาสตร์(ฟิสิกส์ 1 (ความร้อน)
ฟิสิกส์ 2	กลศาสตร์เวกเตอร์
โลหะวิทยาฟิสิกส์	เอกสารคำสอนฟิสิกส์ 1
ฟิสิกส์ 2 (บรรยาย(แก้ปัญหาฟิสิกส์ด้วยภาษา C
ฟิสิกส์พิศวง	สอนฟิสิกส์ผ่านทางอินเทอร์เน็ต
ทดสอบออนไลน์	วิดีโอการเรียนการสอน
หน้าแรกในอดีต	แผ่นใสการเรียนการสอน
เอกสารการสอน PDF	กิจกรรมการทดลองทางวิทยาศาสตร์
แบบฝึกหัดออนไลน์	สุดยอดสิ่งประดิษฐ์
การทดลองเสมือน	
บทความพิเศษ	ตารางธาตุไทย1) 2 (Eng)
พจนานุกรมฟิสิกส์	ลับสมองกับปัญหาฟิสิกส์
ธรรมชาติมหัศจรรย์	สูตรพื้นฐานฟิสิกส์
การทดลองมหัศจรรย์	ดาราศาสตร์ราชมงคล
แบบฝึกหัดกลาง	
แบบฝึกหัดโลหะวิทยา	แบบทดสอบ
ความรู้รอบตัวทั่วไป	อะไรเอ่ย ?
ทดสอบ)เกมเศรษฐี(คติปริศนา
ข้อสอบเอนทรานซ์	เฉลยกลศาสตร์เวกเตอร์
คำศัพท์ประจำสัปดาห์	
ความรู้รอบตัว	
การประดิษฐ์ของโลก	ผู้ได้รับโนเบลสาขาฟิสิกส์
นักวิทยาศาสตร์เทศ	นักวิทยาศาสตร์ไทย
ดาราศาสตร์พิศวง	การทำงานของอุปกรณ์ทางฟิสิกส์
การทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ	

 การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ 1 	
1. การวัด	2. เวกเตอร์
3. การเคลื่อนที่แบบหนึ่งมิติ	4. การเคลื่อนที่บนระนาบ
5. กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน	6. การประยุกต์กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน
7. งานและพลังงาน	8. การดลและโมเมนตัม
9. การหมุน	10. สมดุลของวัตถุแข็งเกร็ง
11. การเคลื่อนที่แบบคาบ	12. ความยืดหยุ่น
13. กลศาสตร์ของไหล	14. ปริมาณความร้อน และ กลไกการถ่ายโอนความร้อน
15. กฎข้อที่หนึ่งและสองของเทอร์โมไดนามิก	16. คุณสมบัติเชิงโมเลกุลของสสาร
17. คลื่น	18. การสั่น และคลื่นเสียง
 การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ 2 	
1. ไฟฟ้าสถิต	2. สนามไฟฟ้า
3. ความกว้างของสายฟ้า	4. ตัวเก็บประจุและการต่อตัวต้านทาน
5. ศักย์ไฟฟ้า	6. กระแสไฟฟ้า
7. สนามแม่เหล็ก	8. การเหนี่ยวนำ
9. ไฟฟ้ากระแสสลับ	10. ทรานซิสเตอร์
11. สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและเสาอากาศ	12. แสงและการมองเห็น
13. ทฤษฎีสัมพัทธภาพ	14. กลศาสตร์ควอนตัม
15. โครงสร้างของอะตอม	16. นิวเคลียร์
 การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ทั่วไป 	
1. จลศาสตร์ (kinematic)	2. จลพลศาสตร์ (kinetics)
3. งานและโมเมนตัม	4. ซิมเปิลฮาร์โมนิก คลื่น และเสียง
5. ของไหลกับความร้อน	6. ไฟฟ้าสถิตกับกระแสไฟฟ้า
7. แม่เหล็กไฟฟ้า	8. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับแสง
9. ทฤษฎีสัมพัทธภาพ อะตอม และนิวเคลียร์	

