บทที่ 2
กระแสไฟฟ้าและวงจรไฟฟ้ากระแสตรง

เอกสารประกอบการสอนรายวิชา

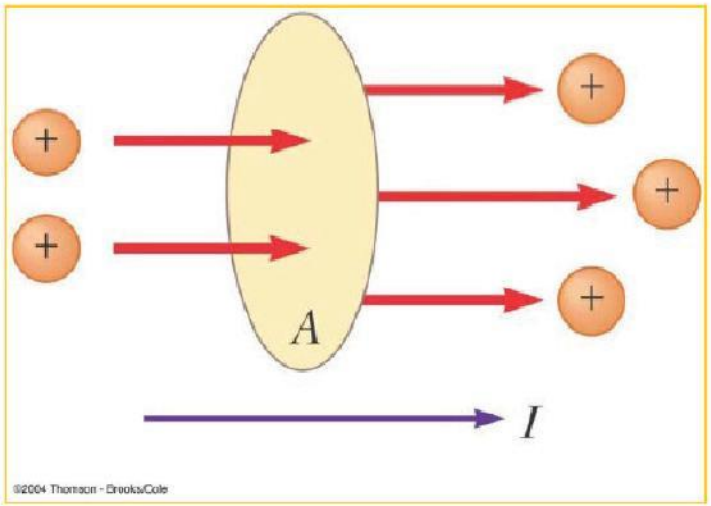
PHYS 1103 ฟิสิกส์ทั่วไป 2

กระแสไฟฟ้าและวงจรไฟฟ้ากระแสตรง

- ความหมายของกระแสไฟฟ้า
- สภาพต้านทานไฟฟ้า และ สภาพนำไฟฟ้า
- กฎของโอห์ม
- วงจรไฟฟ้ากระแสตรง
- กฎของเคิร์ชฮอฟฟ์
- วงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

กระแสไฟฟ้า

- <u>กระแสไฟฟ้า</u> คืออัตราการไหลของประจุผ่านพื้นที่หน้าตัดหนึ่งของตัวนำ



- *จากรูปถ้าประจุ* ΔQ *ไหลผ่านพื้นที่* A *ในเวลา* Δt *กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยจะมีค่าเป็น*

$$I_{av} = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

กระแสไฟฟ้า (ต่อ)

- ถ้าอัตราการไหลของประจุดังกล่าวเป็นฟังก์ชันของเวลาจะได้ <u>กระแสไฟฟ้าบัดดล</u> (instantaneous current) มีค่าเป็น

$$I = \frac{dQ}{dt}$$ มีหน่วยเป็นแอมแปร์ (Ampere, A) หรือ C/s

- *ประจุที่ไหลนี้อาจเป็นได้ทั้งบวกและลบ หรือทั้งสองอย่าง*
- ทิศทางการไหลของกระแสจะเป็นทิศของประจุบวกหรือตรงข้ามกับการไหลของอิเล็กตรอน
- *เราเรียกประจุที่เคลื่อนที่นี้ว่า "พาหะประจุ (charge carrier)"*

อันตรายจากกระแสไฟฟ้า

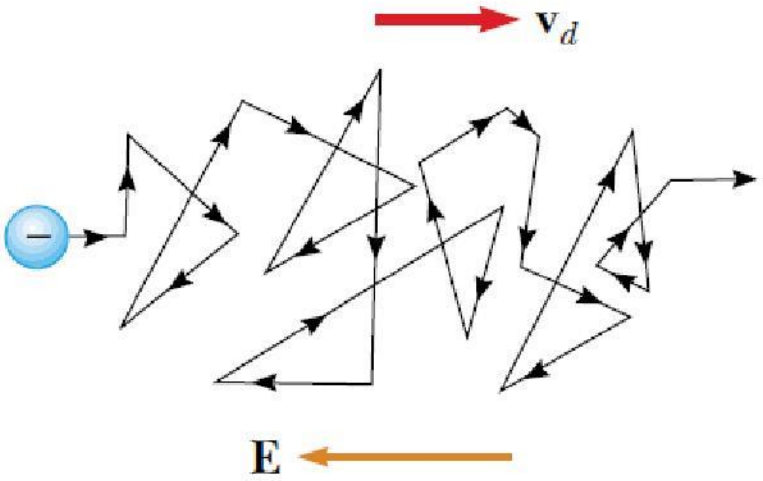
ขนาดกระแสไฟฟ้าที่ผ่านร่างกาย	ผลกระทบ	อันตราย ?
1 mA	ทำให้สะดุ้ง	ไม่ตาย
5 mA	รู้สึกเจ็บ	ไม่ตาย
10 mA	กล้ามเนื้อหยุดทำงาน	ไม่ตาย
20 mA	หยุดหายใจ	เป็นนาทีตาย
100 mA	หัวใจหยุดทำงาน	เป็นวินาทีตาย
1000 mA	ไหม้เกรียม	ตายทันที

กระแสและอัตราเร็วลอยเลื่อน (drift speed)

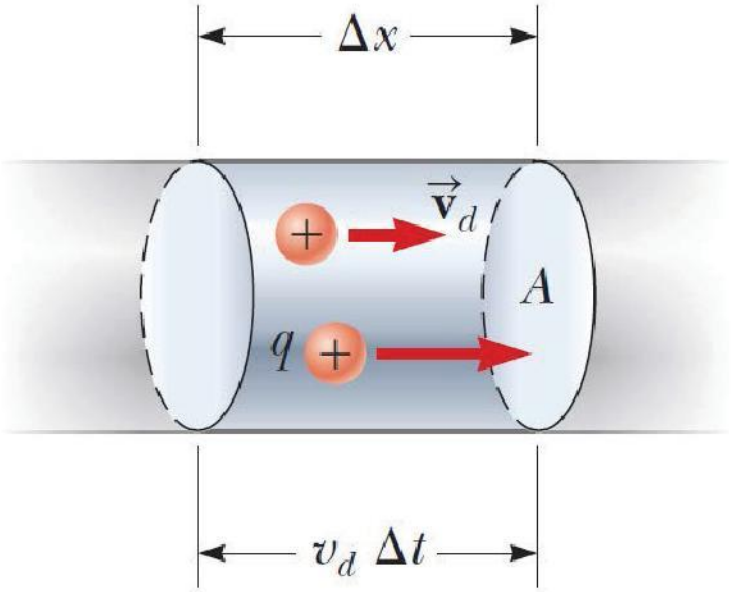
- ภายในสายไฟ : อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่อย่างช้า ๆ ด้วย *อัตราเร็วลอยเลื่อน* (drift speed) ประมาณ *0.2 mm/s* (ในทองแดง) หรือเคลื่อนที่ได้ระยะ 1 เมตร ใช้เวลาประมาณ 1.4 ชั่วโมง !!

การเปลี่ยนทิศทางของการเคลื่อนที่ของประจุเกิดจากการชนกับอนุภาคอื่น ๆ โดยถ้าเป็นอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ในทิศตรงข้ามกับสนามไฟฟ้า ดังรูป

เมื่อมีศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมเส้นลวดตัวนำไฟฟ้า จะทำให้เกิดสนาม $\vec{E}$ ขึ้นทำให้อิเล็กตรอนเกิดการเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้าด้วยความเร็ว $\vec{v}_d$



- จากรูปประจุ q เคลื่อนที่ในตัวนำผ่านพื้นที่หน้าตัด A เป็นระยะทาง Δx



- *ถ้า n คือความหนาแน่นของพาหะประจุ* $nA\,\Delta x$ *จะเป็นจำนวนพาหะประจุรวม*
- จำนวนประจุทั้งหมดจะมีค่าเป็น $\Delta Q = (nA\,\Delta x)q$
- *ถ้าให้* $\Delta x = v_d\,\Delta t$ *จะได้* $\Delta Q = (nAv_d\,\Delta t)q$
- ดังนั้นกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยจะมีค่าเป็น

$$I_{\text{avg}} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = nqv_dA$$

ตัวอย่างที่ 1 อนุภาคประจุไหลผ่านไส้หลอดไฟฟ้า จำนวน 1.67 C ในเวลา 2.00 s

a) กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไส้หลอดเป็นเท่าใด

b) จำนวนอิเล็กตรอนที่ผ่านไส้หลอดในเวลา 5.00 s

ตัวอย่างที่ 2 ลวดทองแดงมีพื้นที่หน้าตัด $3.00\times10^{-6}\ m^2$ มีกระแสไหล 10.0 A จงหาความเร็วของอิเล็กตรอนที่วิ่งในลวดทองแดง ถ้าทองแดงมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนเท่ากับ 8.46×10^{28} ตัว/m^3

กฎของโอห์ม

ถ้ามีกระแสไฟฟ้า I ที่ไหลผ่านพื้นที่ A,
ความหนาแน่นกระแส J นิยามดังนี้คือ

$$J \equiv \frac{I}{A} = nqv_d$$

- กฎของโอห์ม (Ohm's law) กล่าวว่า สำหรับวัตถุบางชนิดจะมีอัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นกระแสต่อสนามไฟฟ้าเป็นค่าคงตัวหรือเท่ากับค่าสภาพนำไฟฟ้าของตัวนำ

$$J = \sigma E$$

- *วัสดุที่เป็นไปตามกฎของโอห์มเรียกชื่อว่า "ohmic" ส่วนวัสดุที่ไม่เป็นไปตามกฎของโอห์มเรียกชื่อว่า "nonohmic"*

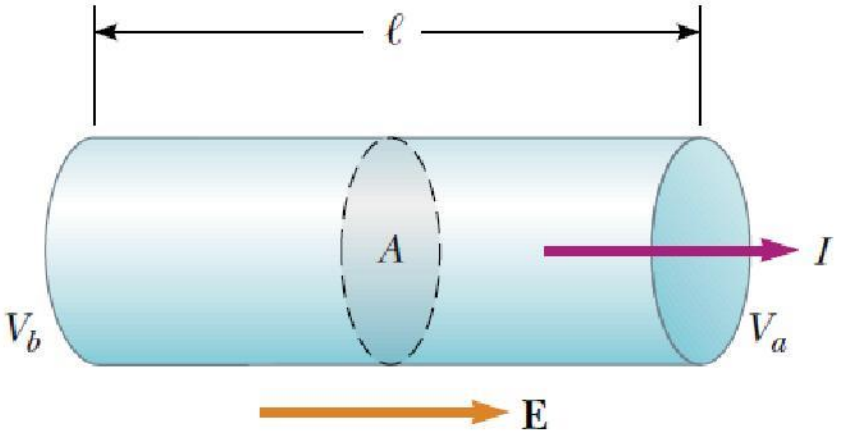
© Bettmann/Corbis

Georg Simon Ohm
German physicist (1789–1854)

σ คือสภาพนำไฟฟ้า (conductivity) ของตัวนำซึ่งเป็นค่าคงตัวของตัวนำแต่ละชนิด

ความต้านทาน

- พิจารณาเส้นลวดตรงพื้นที่หน้าตัดสม่ำเสมอ A ยาว l ดังรูป ความต่างศักย์ $\Delta v = v_b - v_a$ ในเส้นลวดทำให้เกิดสนามไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ คือ



$$\Delta V = V_b - V_a = E\ell$$

เนื่องจากว่า

$$J = \sigma E = \sigma \frac{\Delta V}{\ell}$$

จะได้

$$\Delta V = \frac{\ell}{\sigma} J = \left(\frac{\ell}{\sigma A}\right) I = RI$$

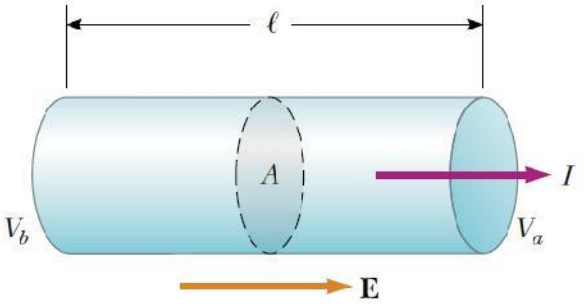
โดยการกำหนดให้ $R = \ell / \sigma A$ ซึ่งปริมาณนี้เรียกว่า *ความต้านทาน* (resistance) จะได้

$$R \equiv \frac{\Delta V}{I}$$

ค่าความต้านทาน R มีหน่วยเป็นโอห์ม (Ohm) หรือ Ω โดยที่ $1\ \Omega \equiv 1\ \mathrm{V/A}$

ส่วนกลับของสภาพนำไฟฟ้า σ เราเรียกว่า *สภาพต้านทานไฟฟ้า* (resistivity) ρ นิยามดังนี้คือ

$$\rho = \frac{1}{\sigma}$$



เมื่อ ρ มีหน่วยเป็น โอห์ม-เมตร $(\Omega \cdot \mathrm{m})$

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจะขึ้นกับสมบัติของวัสดุและอุณหภูมิ

ค่าความต้านทานเกิดเนื่องจากอิเล็กตรอนชนกับอะตอมอื่น ๆภายในตัวนำ ดังนั้น *ความต้านทานจึงขึ้นอยู่กับรูปร่างและชนิดของลวดตัวนำ* นั่นคือ

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

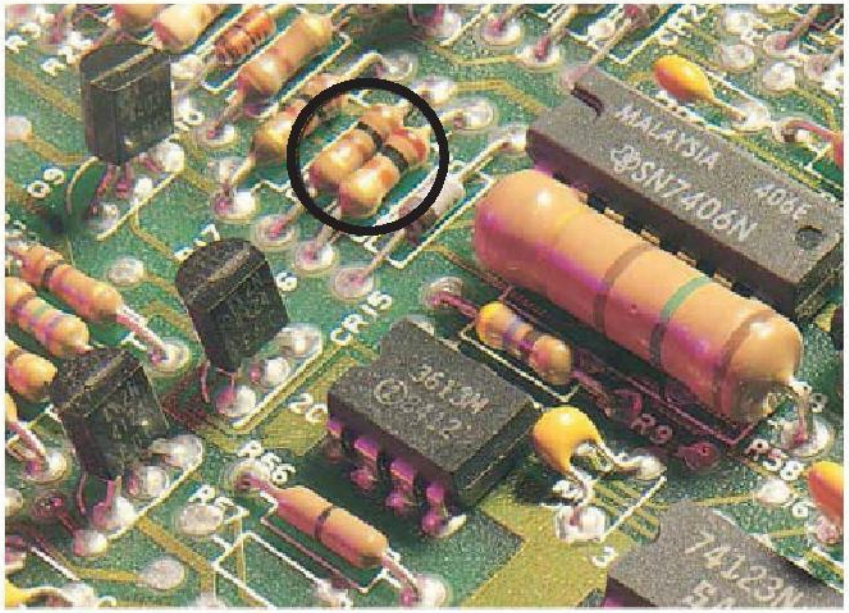
เมื่อ ℓ และ A คือความยาวและพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำตามลำดับ

ตารางค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของวัตถุ

Material	Resistivity[a] ($\Omega \cdot m$)	Temperature Coefficient[b] $\alpha[(^\circ C)^{-1}]$
Silver	1.59×10^{-8}	3.8×10^{-3}
Copper	1.7×10^{-8}	3.9×10^{-3}
Gold	2.44×10^{-8}	3.4×10^{-3}
Aluminum	2.82×10^{-8}	3.9×10^{-3}
Tungsten	5.6×10^{-8}	4.5×10^{-3}
Iron	10×10^{-8}	5.0×10^{-3}
Platinum	11×10^{-8}	3.92×10^{-3}
Lead	22×10^{-8}	3.9×10^{-3}
Nichrome[c]	1.00×10^{-6}	0.4×10^{-3}
Carbon	3.5×10^{-5}	-0.5×10^{-3}
Germanium	0.46	-48×10^{-3}
Silicon[d]	2.3×10^{3}	-75×10^{-3}
Glass	10^{10} to 10^{14}	
Hard rubber	$\sim 10^{13}$	
Sulfur	10^{15}	
Quartz (fused)	75×10^{16}	

ตัวต้านทาน

- ในวงจรไฟฟ้าจะมีตัวต้านทานเพื่อควบคุมระดับของกระแสไฟฟ้า



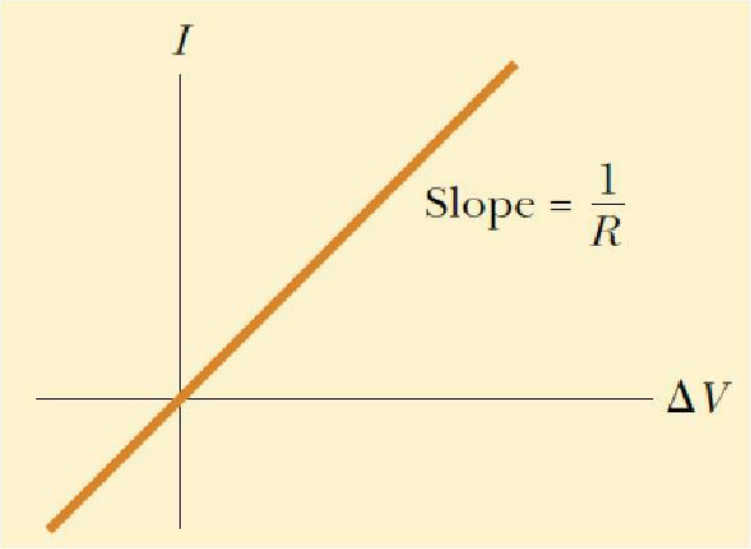
- ตัวต้านทานจะมีค่าแตกต่างกันตามสีที่เป็นสัญลักษณ์ดังตาราง

Color Coding for Resistors

Color	Number	Multiplier	Tolerance
Black	0	1	
Brown	1	10^1	
Red	2	10^2	
Orange	3	10^3	
Yellow	4	10^4	
Green	5	10^5	
Blue	6	10^6	
Violet	7	10^7	
Gray	8	10^8	
White	9	10^9	
Gold		10^{-1}	5%
Silver		10^{-2}	10%
Colorless			20%

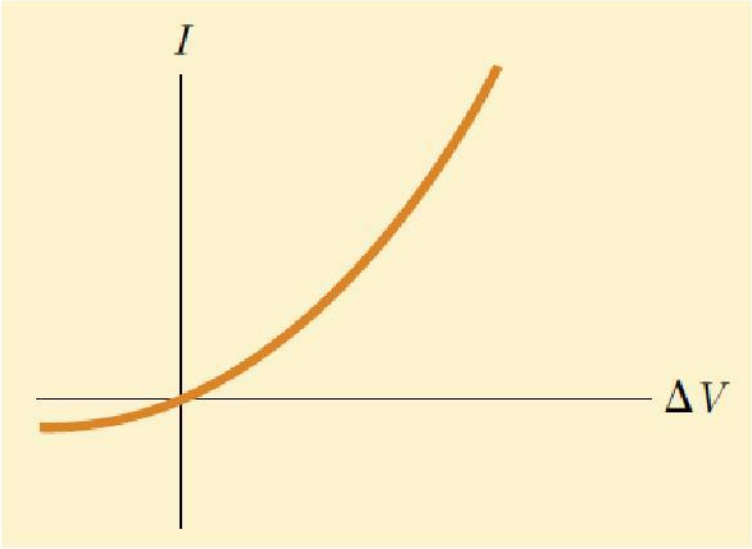
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์

- วัสดุชนิด ohmic จะมีกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I และ ΔV แบบเชิงเส้นดังรูป โดยมีความชันเท่ากับส่วนกลับของ R



(a)

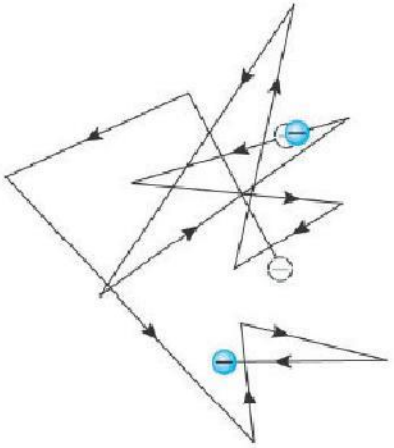
- วัสดุชนิด nonohmic เช่น ไดโอด (diode) จะมีกราฟความสันพันธ์ระหว่าง I และ ΔV ไม่เป็นแบบเชิงเส้นดังรูป



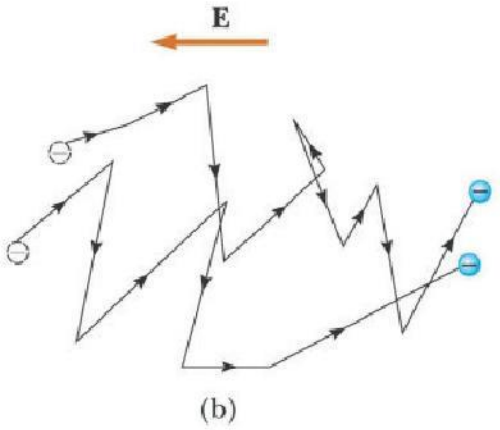
(b)

การเกิดความต้านทานในตัวนำ

- ความต้านทานในตัวนำเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระในตัวนำซึ่งจะเป็นแบบสุ่มดังรูปในกรณีที่ไม่มีสนามไฟฟ้าในตัวนำ



- *เมื่อให้สนามไฟฟ้ากับตัวนำการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระจะมีระเบียบมากขึ้นโดยจะเลื่อนลอยไปในทิศตรงข้ามกับสนามไฟฟ้า ดังรูป*



- อิเล็กตรอนอิสระจะชนกับอะตอมในตัวนำทำให้อะตอมเกิดการสั่นและตัวนำมีอุณหภูมิสูงขึ้นจึงเกิดความต้านทาน

17

©2004 Thomson - Brooks/Cole

ตัวอย่างที่ 3 เส้นลวดทองแดงเส้นหนึ่งยาว 50 cm มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm จะมีความต้านทานเท่าใด

ตัวอย่างที่ 4 เส้นลวดทองแดงเส้นหนึ่งยาว 50 cm มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm จะมีความต้านทานเท่าใด

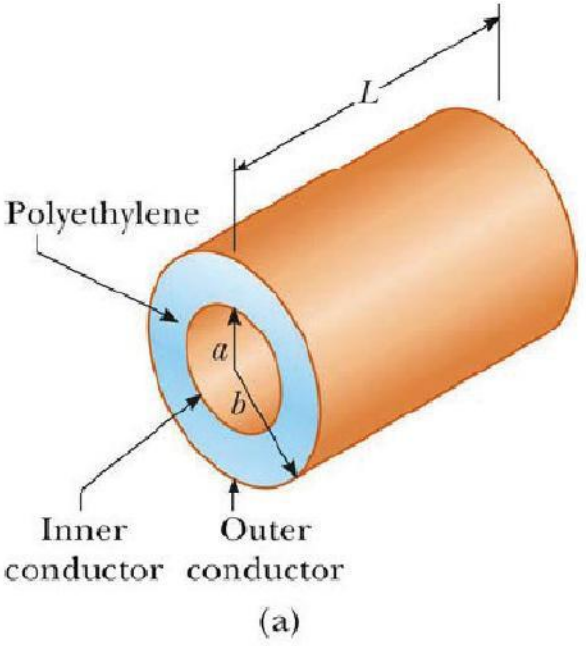
ตัวอย่างที่ 5 ความต้านทานของสายเคเบิ้ล

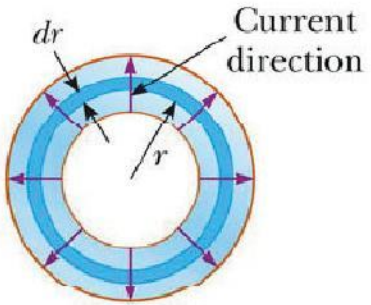
- เราสามารถหาค่าความต้านทานของสายเคเบิลรูปทรงกระบอกได้ดังนี้
- ให้วงกลมเล็ก ๆ ของสายเคเบิลซึ่งหนา dr มีความต้านทานเป็น

$$dR = \frac{\rho}{2\pi r L} dr$$

$$\Rightarrow R = \int_a^b dR = \frac{\rho}{2\pi L} ln\left(\frac{b}{a}\right)$$

- ค่าความต้านทานในแนวรัศมีจะมีค่าสูงมาก ซึ่งเป็นสิ่งที่เราปรารถนาเพราะเราไม่ต้องการให้กระแสไหลในแนวรัศมี





© Thomson Higher Education

ตัวอย่างที่ 6 เส้นประสาทแอกซอน(Axon)มีลักษณะเป็นท่อรูปทรงกระบอก รัศมี $5\times10^{-6}\,mm$ ยาว $5mm$ ภายในบรรจุของเหลวที่มีสภาพต้านทาน $0.5\,\Omega.m$ ถ้าความต่างศักย์ระหว่างปลายเส้นประสาทนี้เท่ากับ $20\,mV$ จงคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเส้นประสาท

ตัวอย่างที่ 7 จงคำนวณหากระแสที่ไหลในกระบอกไฟฉาย ถ้ากำหนดให้หลอดไฟฉายมีความต้านทาน 15 Ω และแบตเตอรี่ที่ใช้มีความต่างศักย์ 3 V

ตัวอย่างที่ 8 จงคำนวณหาความต้านทานของเครื่องคิดเลขที่ใช้แบตเตอรี่ที่มีความต่างศักย์ 1.5 V และมีกระแสไหลวงจรรวม 0.5 mA

ความต้านทานและอุณหภูมิ

- ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นของอุณหภูมิ หรือ

$$\rho = \rho_o \left[1 + \alpha \left(T - T_o \right) \right]$$

ρ_o คือค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิ T_0

α คือค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ (temperature coefficient) มีหน่วยเป็น $C^{\circ -1}$

$$\alpha = \frac{1}{\rho_0} \frac{\Delta \rho}{\Delta T}$$

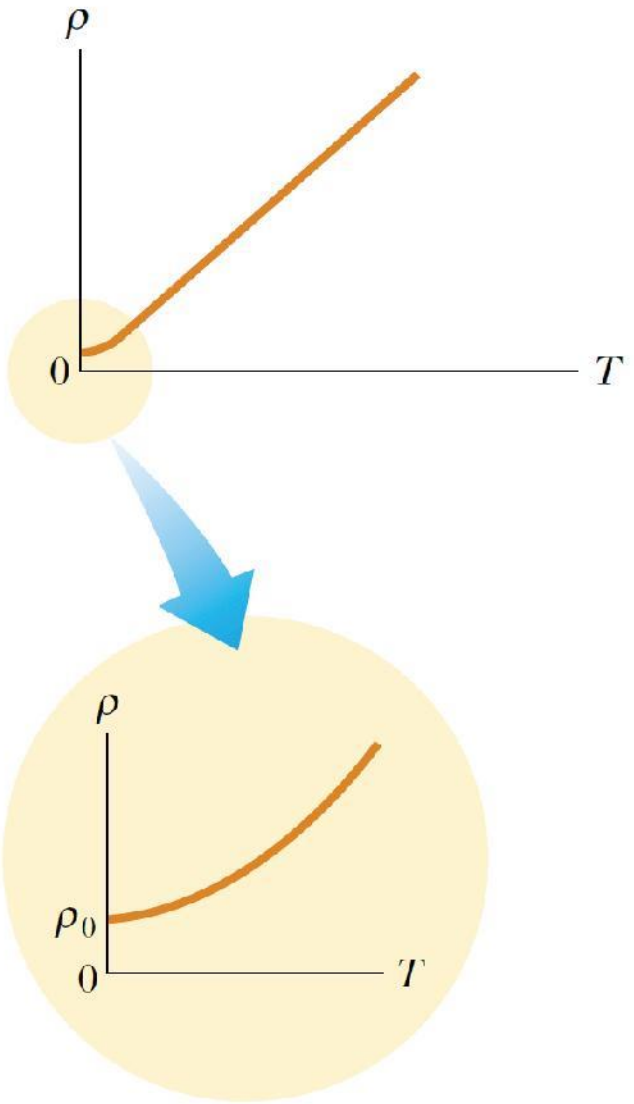
- เนื่องจากความต้านทานเป็นสัดส่วนกับค่าสภาพต้านทาน ดังนั้น

$$R = R_o \left[1 + \alpha \left(T - T_o \right) \right]$$

กราฟระหว่างสภาพต้านทานและอุณหภูมิ

- กราฟระหว่างสภาพต้านทานและอุณหภูมิจะเป็นเชิงเส้นโดยสภาพต้านทานจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นดังรูป

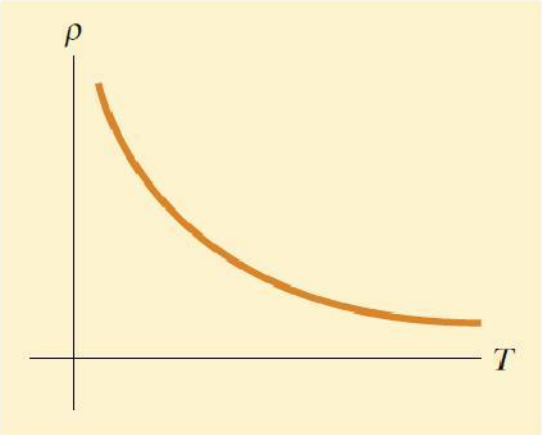
- แต่ ณ อุณหภูมิต่ำ ๆ กราฟจะไม่เป็นเชิงเส้น



สารกึ่งตัวนำและตัวนำยิ่งยวด

สารกึ่งตัวนำ (semiconductor)

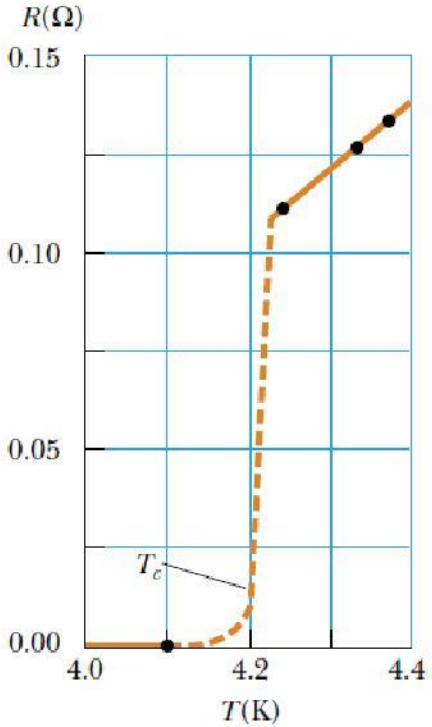
- สารกึ่งตัวนำจะมีสภาพต้านทานไฟฟ้าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น



กราฟระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้าและอุณหภูมิของสารกึ่งตัวนำ

ตัวนำยิ่งยวด (superconductor)

- เหนือ T_c ความต้านทานจะเหมือนกับโลหะทั่วไป แต่เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า T_c ความต้านทานจะลดลงเป็นศูนย์ทันทีกลายเป็นตัวนำยิ่งยวด (super conductor)

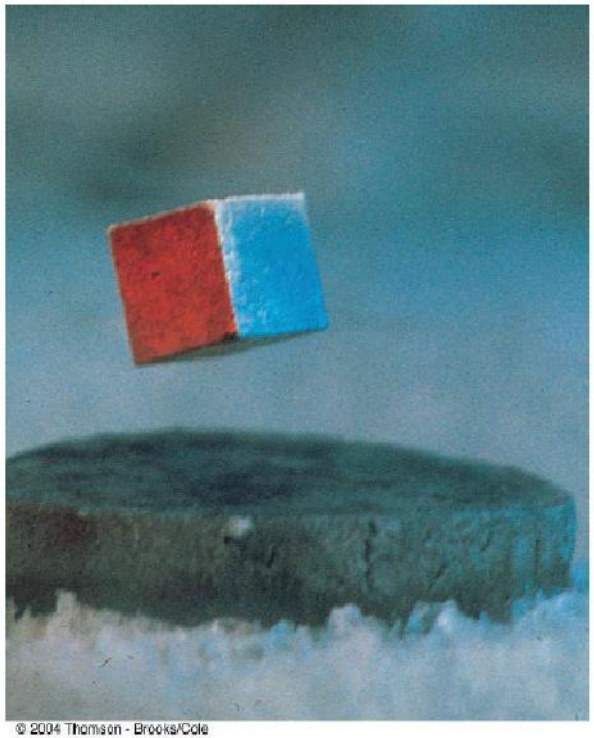


กราฟระหว่างความต้านทานไฟฟ้าและอุณหภูมิของสารตัวนำยิ่งยวด

การประยุกต์ใช้ตัวนำยิ่งยวด

- เนื่องจาก R=0 เมื่อให้กระแสกับตัวนำยิ่งยวด กระแสจะยังคงอยู่โดยไม่ต้องมีความต่างศักย์ระหว่างขั้วของตัวนำ

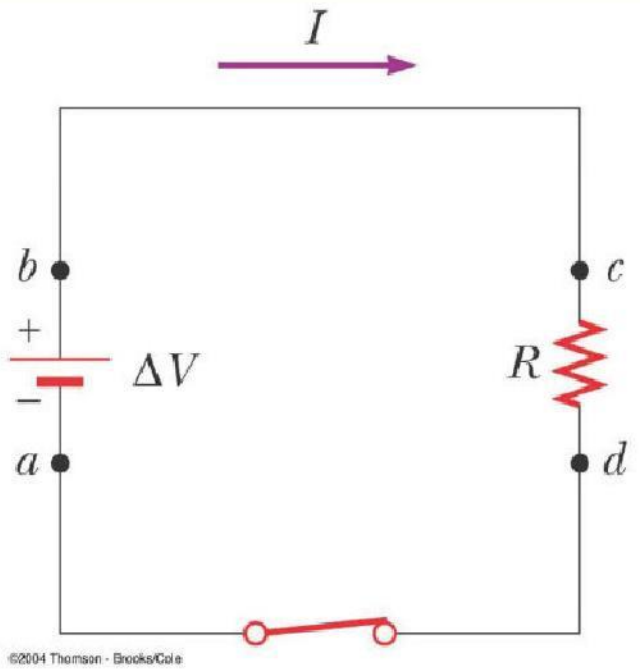
- *เนื่องจากขนาดของสนามไฟฟ้าแม่เหล็กมีค่าเป็น 10 เท่าของแม่เหล็กไฟฟ้าจึงสามารถนำตัวนำยิ่งยวดมาทำเป็นแม่เหล็กกำลังสูงซึ่งสามารถยกก้อนเหล็กขนาดใหญ่ได้ดังรูป*



- ปกติจะใช้ตัวนำยิ่งยวดใน MRI

กำลังไฟฟ้า

- ในวงจรไฟฟ้าที่มีแบตเตอรี่ดังรูป เมื่อประจุเคลื่อนที่จาก a สู่ b พลังงานศักย์ไฟฟ้าของระบบจะเพิ่มขึ้นเท่ากับ $Q\Delta V$ ซึ่งทำให้พลังงานเคมีจากแบตเตอรี่ลดลงในจำนวนเท่ากัน



- *เมื่อประจุเคลื่อนที่จาก c สู่ d ระบบจะสูญเสียพลังศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากการชนของอิเล็กตรอนกับอะตอมของตัวต้านทานทำให้ตัวต้านทานมีอุณหภูมิสูงขึ้น*
- ตัวต้านทานจะถ่ายเทพลังงานความร้อนให้กับอากาศและมีอุณหภูมิคงตัวเมื่อเกิดการสมดุลระหว่างความร้อนที่ได้รับและความร้อนที่ถ่ายเท

กำลังไฟฟ้า (ต่อ)

- อัตราการสูญเสียพลังงานศักย์ไฟฟ้าของระบบจะเท่ากับอัตราการเพิ่มพลังงานภายในของตัวต้านทานในรูปของพลังงานความร้อน

- เนื่องจาก กำลังไฟฟ้า คือ อัตราการถ่ายเทพลังงานให้กับตัวต้านทาน กำลังไฟฟ้าจึงมีค่าเป็น

$$P = I\Delta V$$

- เมื่อใช้กฎของโอห์มจะได้

$$P = I^2 R = \frac{(\Delta V)^2}{R}$$

มีหน่วยเป็นวัตต์ (Watt, W)

ตัวอย่างที่ 9 เตาไฟฟ้าสร้างได้โดยการให้ความต่างศักย์ 120 V ผ่านลวดนิโครมที่มีความต้านทาน 8.0 Ω จงหากระแสที่ไหลในเส้นลวดและอัตรากำลังไฟฟ้าเตาไฟฟ้า

วงจรกระแสไฟฟ้าตรง

- ถ้ากระแสไฟฟ้าในวงจรมีขนาดและทิศทางคงตัวเราเรียกกระแสนั้นว่า ไฟฟ้ากระแสตรง (direct current)

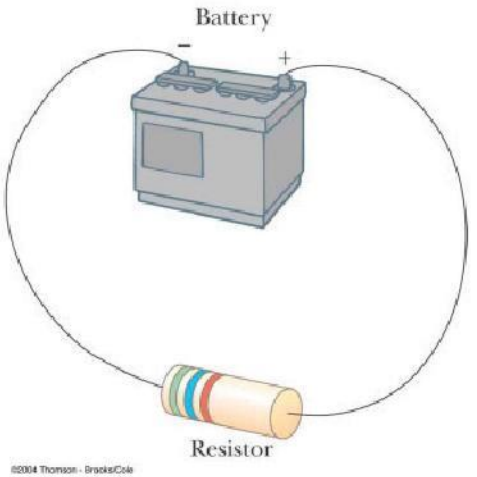
- *เนื่องจากความต่างศักย์ระหว่างขั้วของแบตเตอรี่มีค่าคงตัว แบตเตอรี่จะผลิตไฟฟ้ากระแสตรง*

- *แบตเตอรี่จึงเป็นแหล่งกำเนิด "แรงเคลื่อนไฟฟ้า (electromotive force)" หรือเป็นแหล่งกำเนิดของพลังงานในวงจรไฟฟ้า*

- ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของแบตเตอรี่ คือ ค่าความต่างศักย์สูงสุดที่แบตเตอรี่สามารถผลิตได้ระหว่างขั้วของแบตเตอรี่

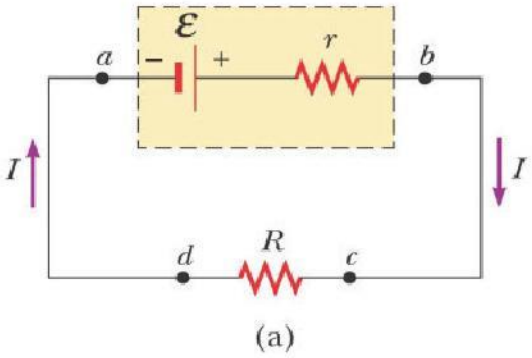
องค์ประกอบของวงจรไฟฟ้า

- วงจรไฟฟ้าจะประกอบด้วยแบตเตอรี่ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ออยู่กับตัวต้านทานภายนอกด้วยลวดที่ไม่มีความต้านทาน



- *ขั้วบวกของแบตเตอรี่จะมีศักย์ไฟฟ้าที่สูงกว่าขั้วลบ*
- เนื่องจากแบตเตอรี่มีความต้านทานภายใน r ความต่างศักย์ระหว่างขั้วของแบตเตอรี่จะมีค่าเป็น

$$\Delta V = \varepsilon - Ir$$



(a)

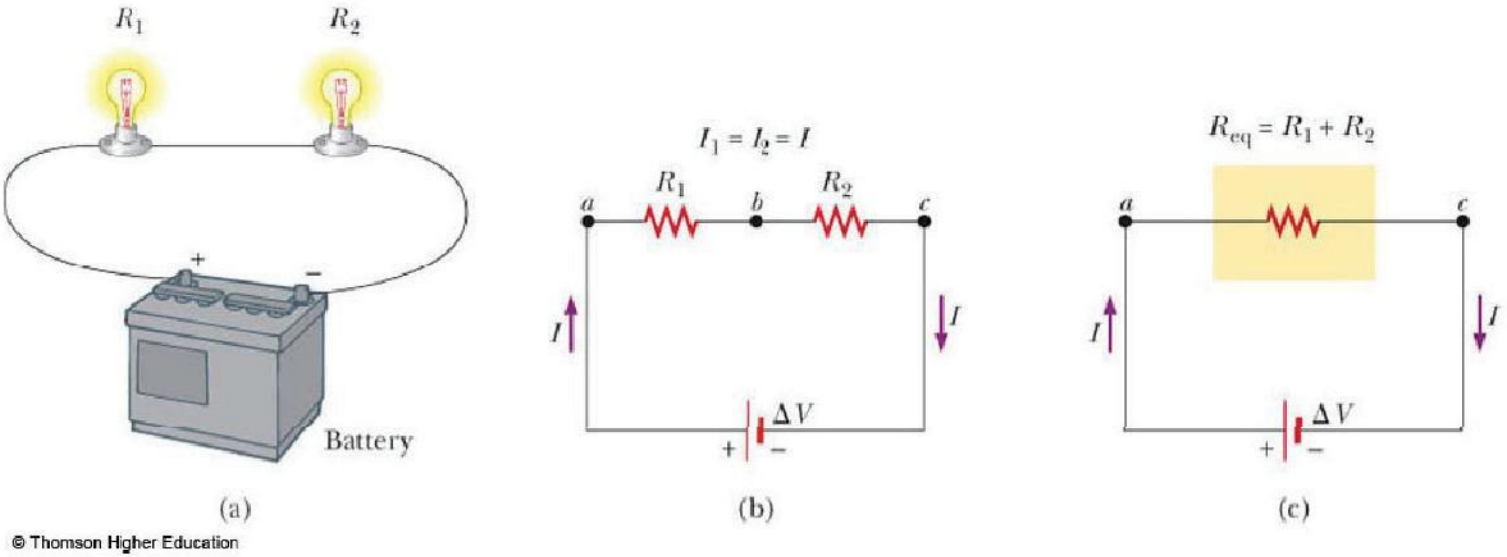
- *จากรูปจะเห็นว่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วของแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวต้านทานภายนอก*

ตัวอย่างที่ 10 จงหากำลังของเครื่องใช้ไฟฟ้าเครื่องหนึ่ง ถ้าแบตเตอรี่ในเครื่องใช้ไฟฟ้ามีขนาด 9 V และมีกระแสไหลผ่านวงจรในเครื่อง 0.5 mA

ตัวอย่างที่ 11 จงหาความต้านทานของขดลวดในเตารีดขนาด 1.5 kW ที่ใช้ไฟฟ้า 220 V

การต่อตัวต้านทานแบบอนุกรม

- การต่อตัวต้านทานมี 2 แบบ คือ แบบอนุกรมและแบบขนาน
- ในกรณีการต่อแบบอนุกรมจะดังรูปซ้ายมือ และวงจรที่สมมูลกันจะเป็นดังรูปขวามือ



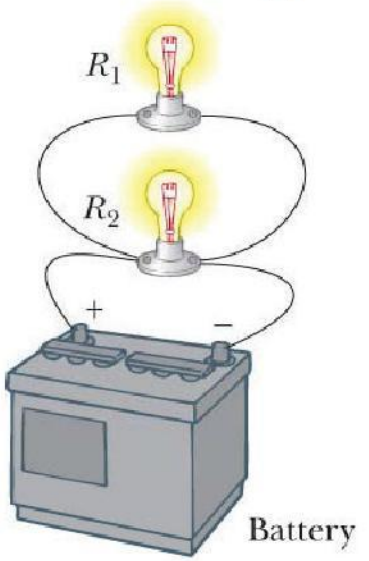
© Thomson Higher Education

- ถ้าต่อตัวต้านทานสมมูลเข้ากับแบตเตอรี่ ความต่างศักย์ระหว่างขั้วของแบตเตอรี่จะเท่ากับผลบวกของความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวต้านทานแต่ละตัว

$$\Delta V = IR_1 + IR_2 \quad \Rightarrow IR = IR_1 + IR_2 \quad \Rightarrow R = R_1 + R_2$$

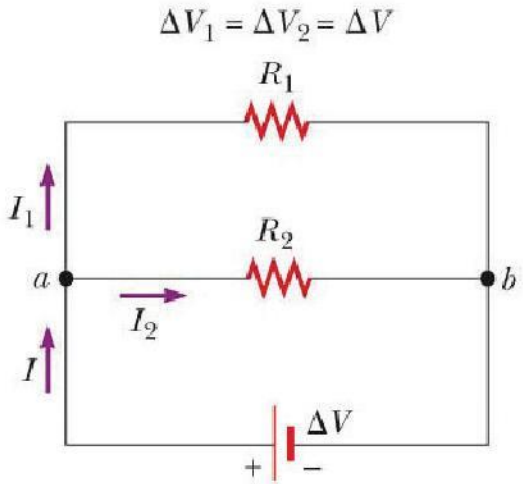
การต่อตัวต้านทานแบบขนาน

- วงจรของการต่อตัวต้านทานแบบขนานและวงจรที่สมมูลกันจะมีลักษณะดังรูป

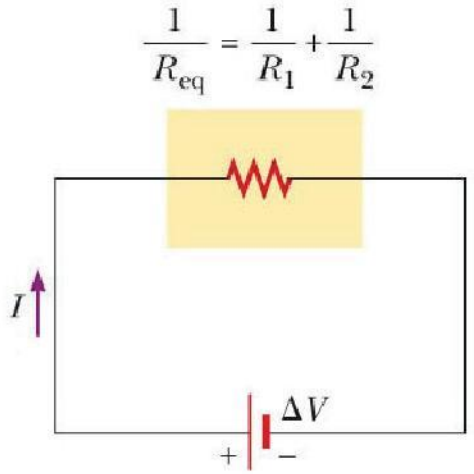


(a)

© Thomson Higher Education



(b)



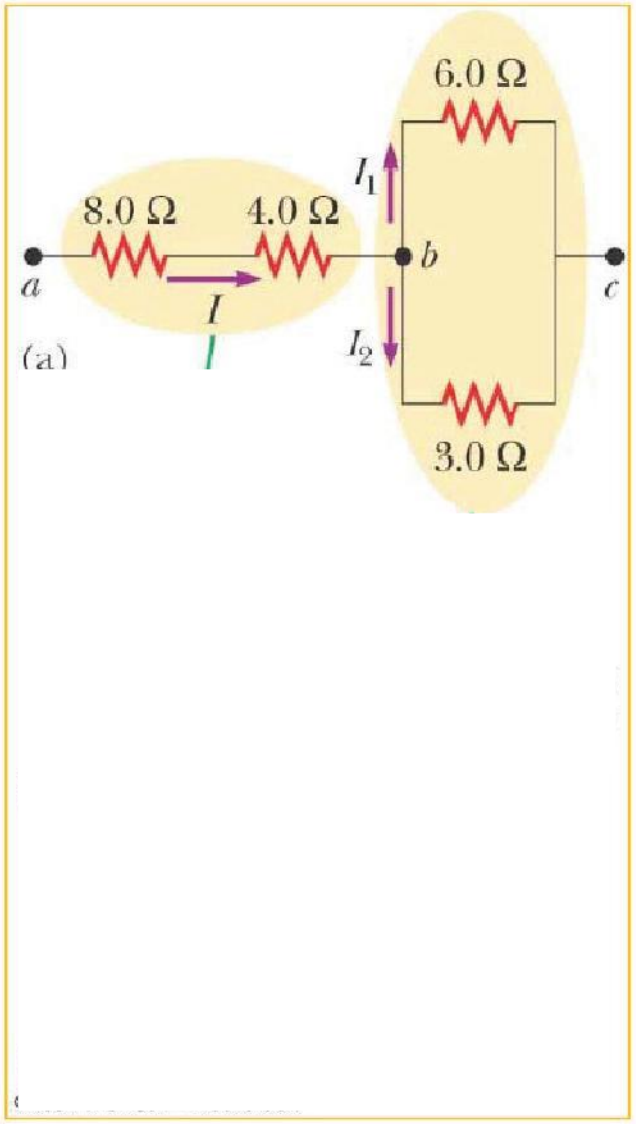
(c)

$$\Delta V = \Delta V_1 = \Delta V_2 \Rightarrow \quad I = I_1 + I_2$$

$$I = \frac{\Delta V}{R_{eq}} = \frac{\Delta V_1}{R_1} + \frac{\Delta V_2}{R_2} \rightarrow \frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

ตัวอย่างที่ 12: ตัวอย่างการต่อตัวต้านทานแบบผสม

- ตัวอย่างการต่อตัวต้านทานแบบผสมจะเป็นดังรูป



ตัวอย่างที่ 13 ตัวต้านทาน 3 ตัว มีค่าความต้านทาน 30 Ω, 40 Ω และ 50 Ω ต่อกันแบบอนุกรมเข้ากับแบตเตอรีขนาด 12 V (สมมติไม่คิดค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่)

a) จงหาค่าความต้านทานรวมของวงจร

b) จงหาค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทานแต่ละตัว

ตัวอย่างที่ 13(ต่อ) ตัวต้านทาน 3 ตัว มีค่าความต้านทาน 30 Ω, 40 Ω และ 50 Ω ต่อกันแบบอนุกรม เข้ากับแบตเตอรี่ขนาด 12 V (สมมติไม่คิดค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่)

c) จงหาศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานแต่ละตัว

ตัวอย่างที่ 14 ตัวต้านทาน 3 ตัว มีค่าความต้านทาน 30 Ω, 40 Ω และ 50 Ω ต่อกันแบบขนานเข้ากับแบตเตอรขนาด 12 V (สมมติไม่คิดค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่)

a) จงหาค่าความต้านทานรวมของวงจร

ตัวอย่างที่ 14(ต่อ) ตัวต้านทาน 3 ตัว มีค่าความต้านทาน 30 Ω, 40 Ω และ 50 Ω ต่อกันแบบขนาน เข้ากับแบตเตอรีขนาด 12 V (สมมติไม่คิดค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่)

b) จงหาค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทานแต่ละตัว

c) จงหาศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานแต่ละตัว

กฎของเคิร์ชฮอฟฟ์ (Kirchhoff's Rules)

- ในวงจรไฟฟ้าที่ซับซ้อนบางชนิดเราไม่สามารถใช้วิธีง่าย ๆ เพื่อหากระแสไฟฟ้าของส่วนต่าง ๆ ของวงจร จำเป็นต้องใช้กฎของเคิร์ชฮอฟฟ์ (Kirchhoff's Rules)

- *กฎของเคิร์ชฮอฟฟ์มี 2 ข้อคือ*
  - **Junction Rule**: ผลรวมของกระแสที่ไหลเข้าสู่จุดใดจุดหนึ่งของวงจรจะเท่ากับผลรวมของกระแสที่ไหลออก

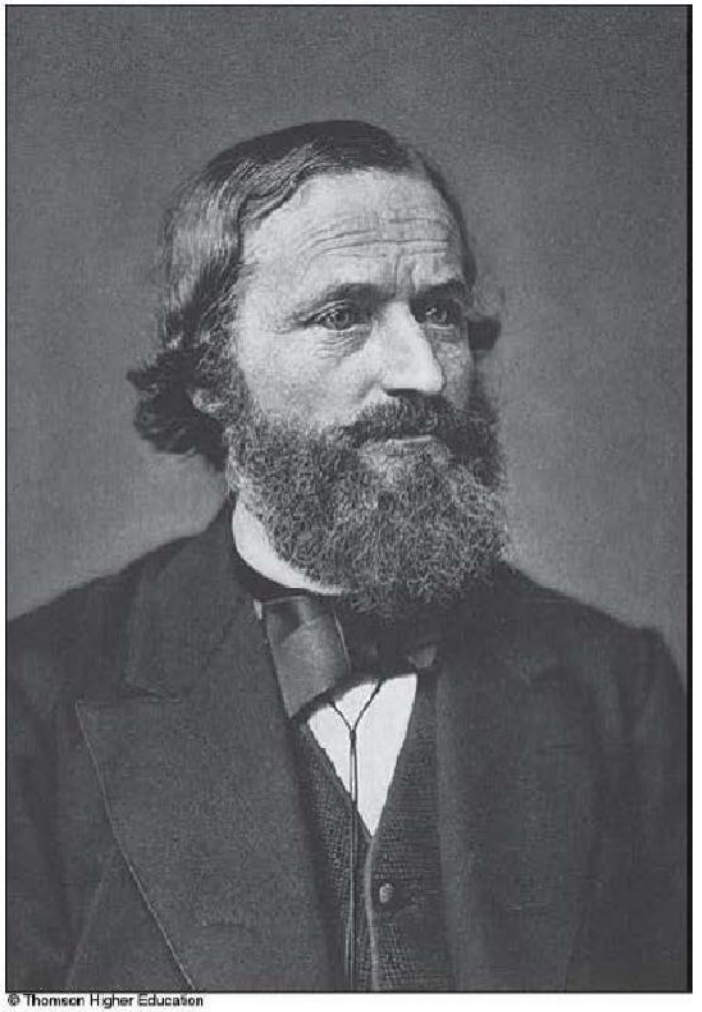
$$\sum I_{in} = \sum I_{out} \quad \text{หรือ} \quad \sum_{\text{junction}} I = 0$$

  - **Loop Rule**: ผลรวมของความต่างศักย์คร่อมส่วนต่าง ๆ ของวงจรปิดจะมีค่าเป็นศูนย์

$$\sum_{\substack{\text{closed} \\ \text{loop}}} \Delta V = 0$$

Gustav Kirchhoff

- 1824 – 1887
- German physicist
- Worked with Robert Bunsen
- They
  - Invented the spectroscope and founded the science of spectroscopy
  - Discovered the elements cesium and rubidium
  - Invented astronomical spectroscopy

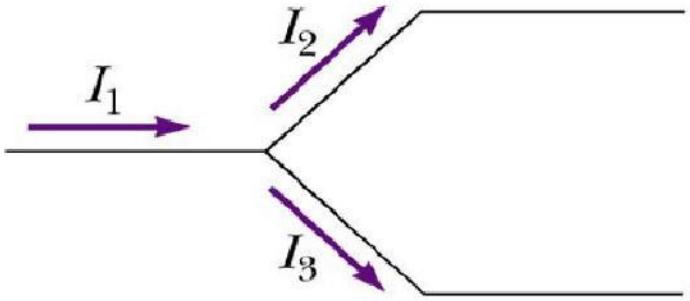

© Thomson Higher Education

การเปรียบเทียบ Junction Rule กับการไหลของน้ำในท่อ

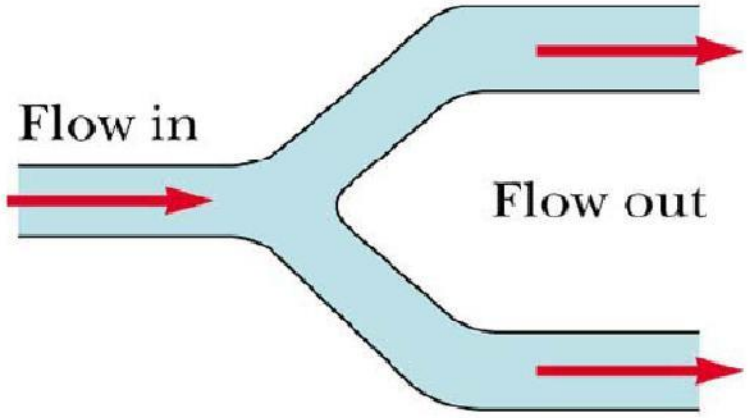
- รูปบนเป็นการไหลของกระแสเข้าสู่และออกจากรอยต่ออันหนึ่งของวงจร ซึ่งเขียนเป็นสมการของกระแสไฟฟ้าได้ดังนี้

$$I_1 = I_2 + I_3$$

- *การไหลของกระแส ณ รอยต่อดังกล่าวจะเปรียบได้กับการไหลของน้ำในท่อดังรูปข้างล่าง*



(a)



(b)

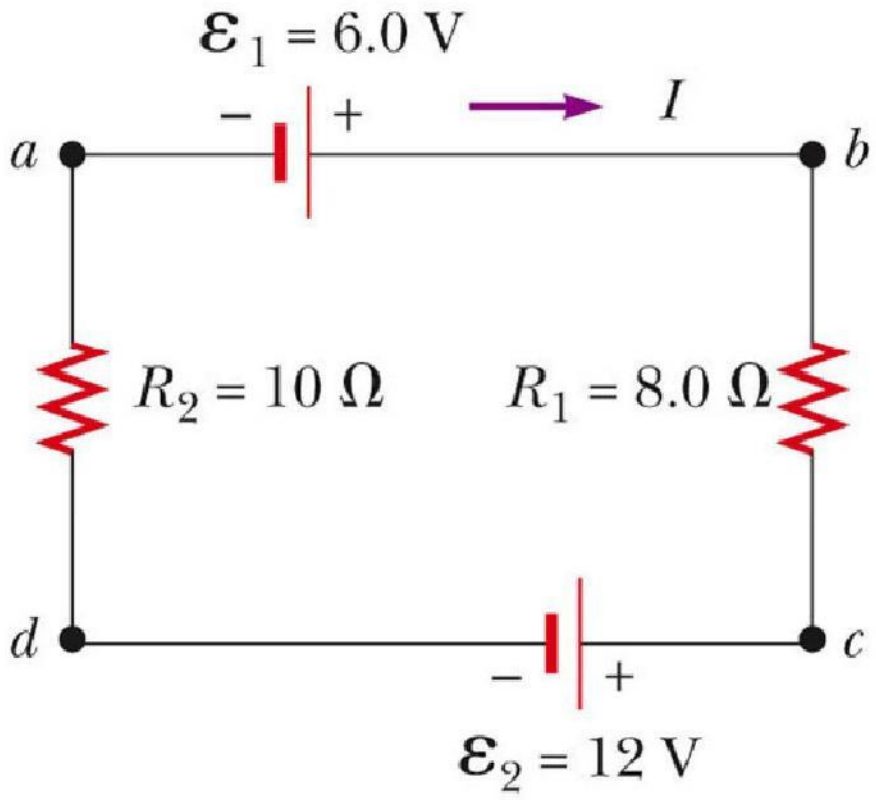
© 2003 Thomson - Brooks Cole

คำแนะนำในการใช้กฎเคิร์ชฮอฟฟ์

- เขียนวงจรพร้อมกับเขียนค่าต่าง ๆ ของส่วนประกอบของวงจรกำกับ แล้วกำหนดทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในส่วนต่าง ๆ ของวงจร
- *ทิศทางของตัวแปรต่าง ๆ จะเป็นอย่างไรก็ได้ แต่เมื่อประยุกต์เข้ากับกฎของเคิร์ชฮอฟฟ์ต้องมีเครื่องหมายตามทิศที่กำหนด*
- ประยุกต์ **Junction Rule** เข้ากับกระแสที่รอยต่อต่าง ๆ ที่สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ของกระแสได้ไม่ซ้ำเดิม
- *ประยุกต์ **Loop Rule** เข้ากับวงจรปิดต่าง ๆ ที่ไม่ซ้ำกันโดยต้องเขียนสมการของความต่างศักย์ที่สอดคล้องกับทิศทางการเคลื่อนที่ผ่านจุดต่าง ๆ ของวงจรปิดแล้วแก้สมการเพื่อหาค่ากระแสและความต่างศักย์*

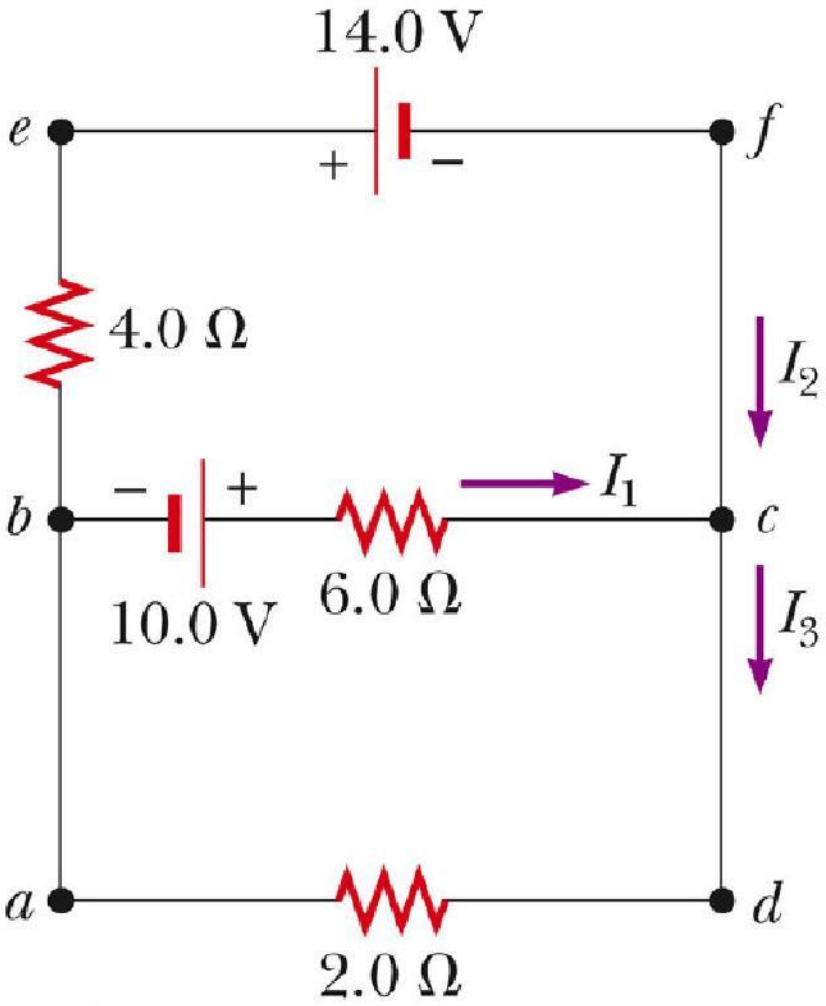
ตัวอย่างที่ 15: การคำนวณโดยใช้กฎของเคิร์ชฮอฟฟ์สำหรับวงจรลูปเดียว

จากรูป วงจรเดี่ยว (Single-loop circuit) จงหากระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจร (กำหนดให้ ความต้านทานภายในแบตเตอรี่เป็นศูนย์) และถ้าขั้วไฟฟ้า ε_2 สลับขั้ว กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรจะเป็นเท่าใด



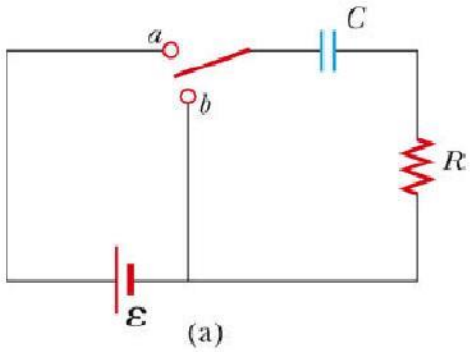
ตัวอย่างที่ 16: การคำนวณโดยใช้กฎของเคร์ชฮอฟฟ์สำหรับวงจรสองลูป

จากรูปเป็น วงจรแบบหลายลูป (Multiple-loop circuit) จงหา กระแสไฟฟ้า I_1 , I_2, และ I_3

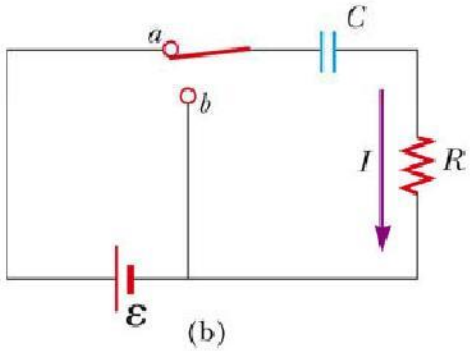


วงจร RC

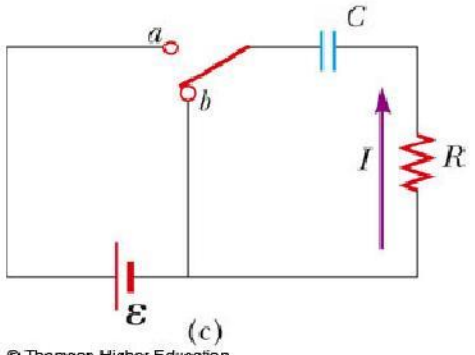
- วงจร RC จะมี 2 แบบ คือ วงจรอัดประจุและวงจรคายประจุ ซึ่งประกอบ ด้วย R และ C ต่อกันอยู่อย่างอนุกรมแล้วต่อเข้าแรงเคลื่อนไฟฟ้า $\mathcal{E}$ ดังรูป



(a)



(b)



(c)

© Thomson Higher Education

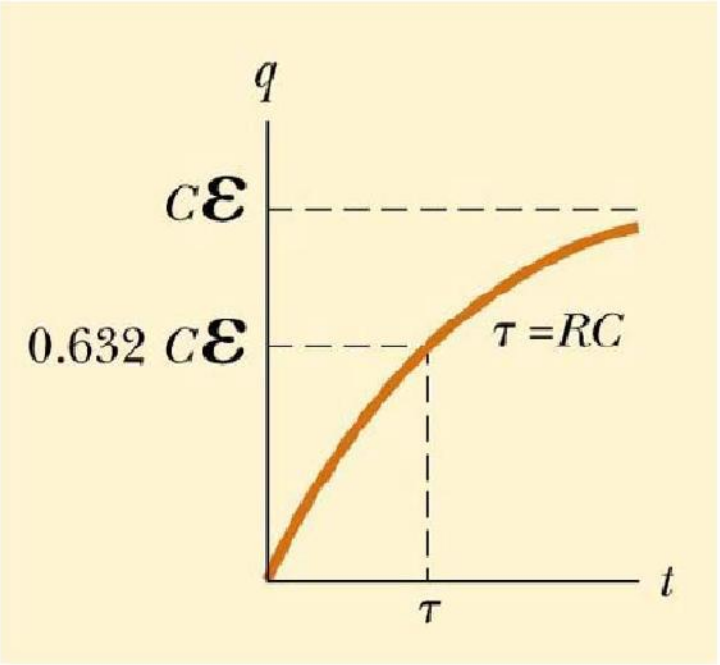
วงจรอัดประจุ

- เกิดขึ้นเมื่อสับสวิตช์ไปที่ a ซึ่งจะเป็นการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ
- จำนวนประจุในตัวเก็บประจุจะเพิ่มขึ้นเป็นฟังก์ชันของเวลาตามสมการ

$$q = C\varepsilon\left(1 - e^{-t/RC}\right) = Q\left(1 - e^{-t/RC}\right)$$

วงจรอัดประจุ (ต่อ)

- ประจุในตัวเก็บประจุจะเพิ่มขึ้นตามเวลาดังรูปและจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ $C\varepsilon$ เมื่อเวลาเป็นอนันต์



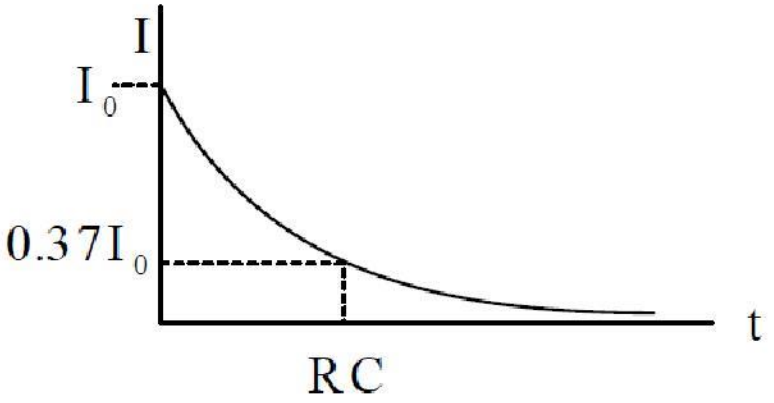
- เมื่อเวลา $t=\tau=RC=$ ค่าคงตัวของเวลา ประจุจะมีค่าเป็น 63% ของประจุสูงสุด

- เนื่องจาก $I(t)=dq/dt$ ดังนั้นกระแสของวงจรจะเป็นฟังก์ชันของเวลาตามสมการ

$$I(t)=\frac{\varepsilon}{R}e^{-t/RC}$$

กระแสในวงจรอัดประจุ

- กระแสในวงจรอัดประจุจะเป็นดังรูป โดยมีค่าสูงสุดเมื่อเริ่มต้นอัดประจุ (t=0) เป็น



$$I_0 = \frac{\varepsilon}{R}$$

- กระแสจะมีค่าเป็นศูนย์เมื่ออัดประจุเต็มแล้ว $(t = \infty)$ ทั้งนี้เพราะความต่างศักย์คร่อมตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับความต่างศักย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้า

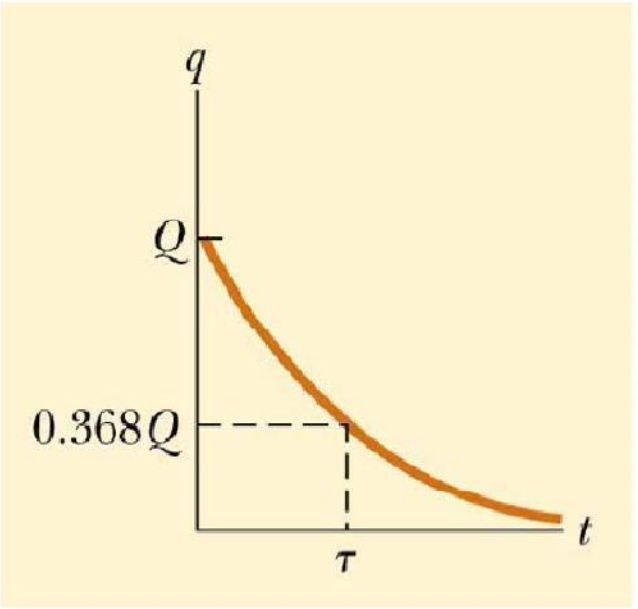
- พลังงานไฟฟ้าที่เก็บสะสมในตัวเก็บประจุจะมีค่าเป็น

$$U = \frac{1}{2}Q\varepsilon = \frac{1}{2}C\varepsilon^2$$

วงจรคายประจุ

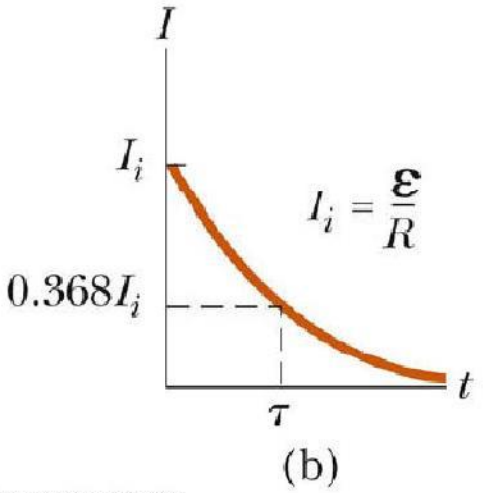
- เกิดขึ้นเมื่อสับสวิตซ์ไปที่ b หลังจากที่อัดประจุเต็มที่แล้วซึ่งจะเกิดการคายประจุจากตัวเก็บประจุทำให้เกิดกระแสไหลในวงจรดังรูป
  - *ประจุจะลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลตามสมการ*

$$q = Qe^{-t/RC}$$



- *เมื่อเวลา t=RC ประจุจะลดลง 63% ของประจุเริ่มต้นหรือเหลือประจุเพียง 37% ของประจุสูงสุด*
- กระแสของวงจรจะลดลงตามสมการ

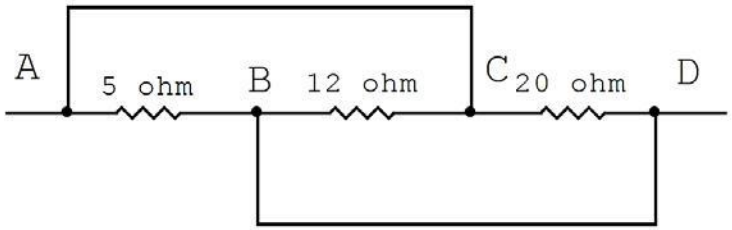
$$I(t) = \frac{dq}{dt} = -\frac{Q}{RC}e^{-t/RC} = -\frac{\varepsilon}{R}e^{-t/RC}$$



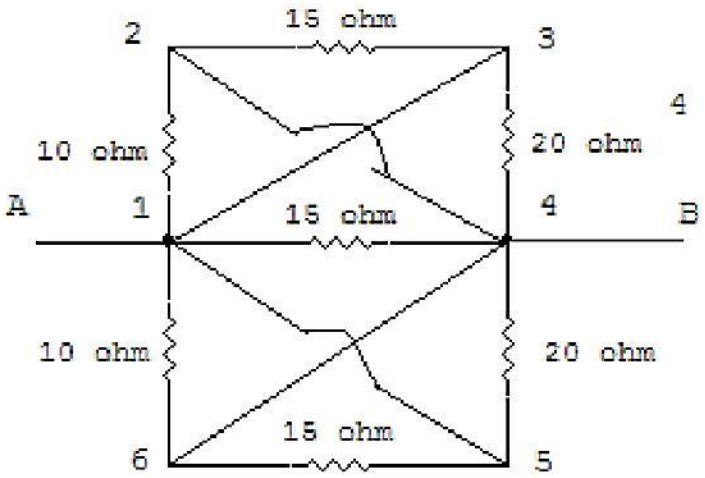
© Thomson Higher Education

แบบฝึกหัดที่ 1 จงหาความต้านทานรวมระหว่างจุด A และ B

1.

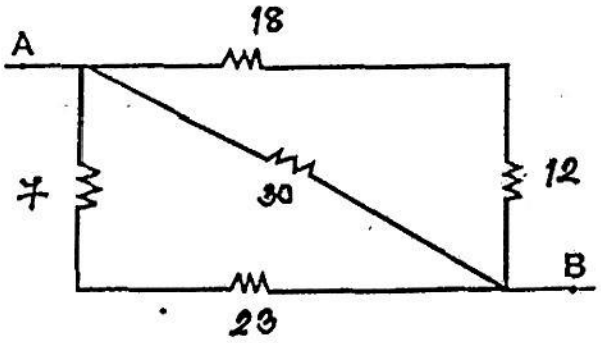


2.

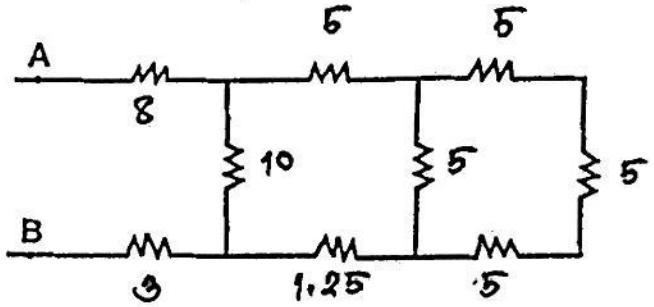


แบบฝึกหัดที่ 2 จงหาความต้านทานรวมระหว่างจุด A และ B

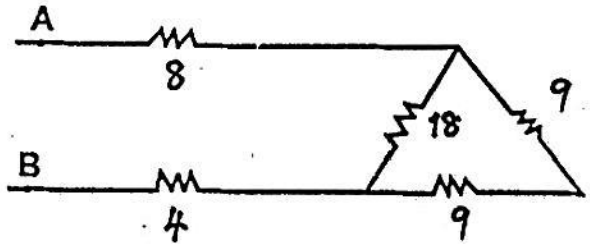
1.



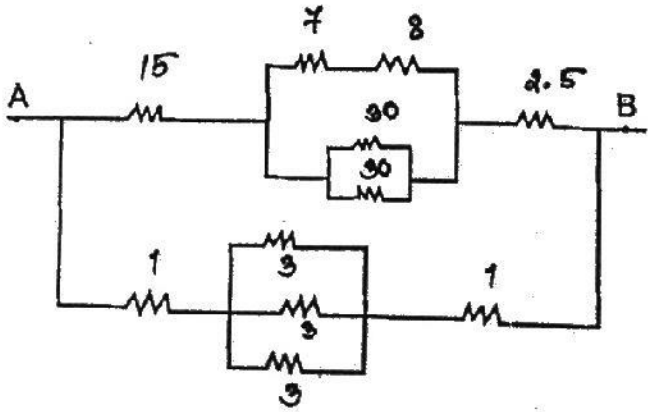
2.



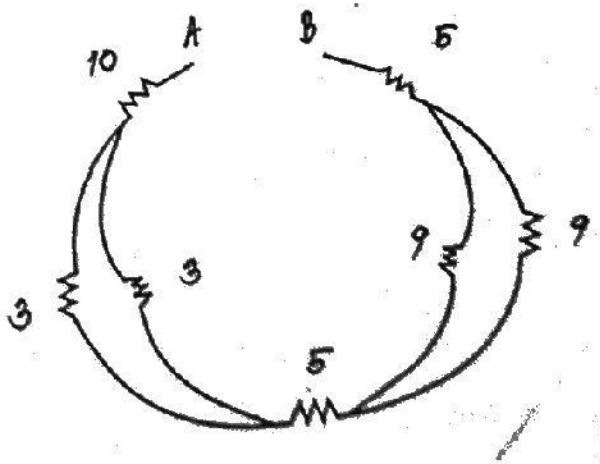
3.



4.



5.



แบบฝึกหัดที่ 3

ปลายของเส้นลวดอลูมิเนียมซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 mm ถูกนำมาหล่อให้ต่อกับลวดทองแดงซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.8 mm ลวดผสมดังกล่าวมีกระแสไหลผ่าน 1.3 A จงหาความหนาแน่นกระแสในลวดแต่ละส่วน และขนาดของความเร็วลอยเลื่อนของอิเล็กตรอนในลวดทองแดง *(ดูวิธีทำจากประมวลสาระฯ)*

แบบฝึกหัดที่ 4

ลวดทองแดงเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1.02 mm มีกระแสไหลผ่าน 1.67 A จงหาว่า

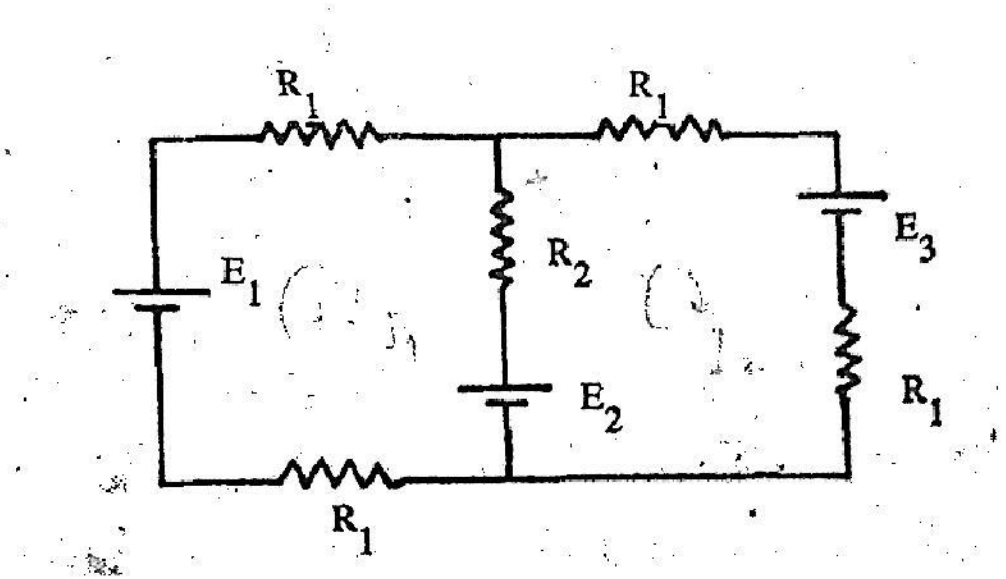
(1) ขนาดของสนามไฟฟ้าในเส้นลวดทองแดงนี้มีค่าเท่าใด

(2) ความต่างศักย์ระหว่างจุด 2 จุดบนเส้นลวดที่อยู่ ห่างกัน (ตามแนวเส้นลวด) เป็นระยะ 50 m

(3) ความต้านทานของเส้นลวดนี้ซึ่งยาว 50 m

แบบฝึกหัดที่ 5

จากรูป กำหนดให้



$R_1 = 1.0\ \Omega$

$R_2 = 2.0\ \Omega$

$E_1 = 2.0\ \text{V}$

$E_2 = E_3 = 4.0\ \text{V}$

จงหาค่ากระแสที่ไหลในแต่ละกิ่ง

เอกสารอ้างอิง

(1) J. W. Jewett, Jr. and R. A. Serway, Physics for scientist and engineers with modern physics, 7th Ed., Brook/Cole, Singapore, 2008.

(2) R. A. Serway, Physics for scientist and engineers with modern physics, 5th Ed., Brook/Cole, Singapore, 2004.

(3) ฟิสิกส์ 2: Course Comprehensive Text, สาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2549

(4) รศ.ดร.สันติ แม้นศิริ, เอกสารประกอบการสอนรายวิชา ฟิสิกส์ 2, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี