

5

ARUS, RESISTANSI DAN TEGANGAN GERAK LISTRIK

Setelah mempelajari bab ini, Anda akan memahami:

- Pengertian arus listrik, dan bagaimana muatan bergerak dalam sebuah konduktor.
- Apa yang dimaksud dengan resistivitas dan konduktivitas.
- Bagaimana cara menghitung resistansi konduktor berdasarkan ukuran dan resistivitasnya.
- Bagaimana sebuah tegangan gerak listrik (tgl) memungkinkan arus mengalir dalam sebuah rangkaian listrik.
- Bagaimana cara menghitung energi dan daya dalam rangkaian listrik.

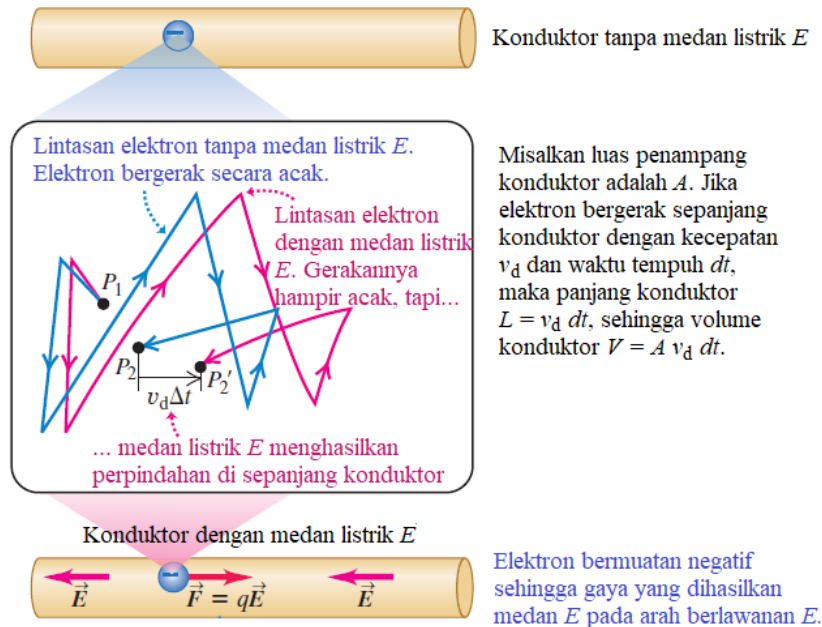
5.1 Arus Listrik

Arus (*current*) adalah banyaknya muatan yang mengalir melalui luas tertentu per satuan waktu. Arus disimbolkan dengan I dan satuan dari arus listrik adalah ampere ($1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$).

$$I = dQ/dt \quad (5.1)$$

Meskipun dalam situasi elektrostatik tidak ada medan listrik di dalam sebuah konduktor, tidak berarti bahwa semua muatan di dalam konduktor itu diam. Hal ini disebabkan karena sejumlah elektron bebas bergerak secara acak dalam semua arah, sehingga tidak ada arus listrik. Namun ketika konduktor itu berada dalam sebuah medan listrik konstan, elektron bebas itu akan dipengaruhi oleh gaya listrik $F = qE$ yang menghasilkan kecepatan penyimpang (*drift velocity*) v_d pada elektron bebas. Akibatnya timbul sebuah arus dalam konduktor tsb.

Misalkan sebuah konduktor berbentuk silinder dengan luas penampang A dan panjang L berada dalam medan listrik E . Jika elektron bebas bergerak sepanjang konduktor dengan kecepatan v_d dan waktu tempuh dt , maka panjang konduktor $L = v_d dt$, sehingga volume konduktor $V = A v_d dt$.



Gambar 5.1 Kecepatan penyimpang

Jika terdapat n partikel bermuatan per satuan volume, maka banyaknya partikel di dalamnya adalah $nAv_d dt$. Setiap partikel mempunyai muatan q , sehingga muatan dQ yang mengalir keluar dari ujung silinder selama waktu dt adalah

$$dQ = q(nAv_d dt) = n q v_d A dt$$

Jika muatan yang bergerak tersebut adalah negatif, kecepatan penyimpang berlawanan dengan arah E . Tetapi arus tersebut masih berada dalam arah yang sama dengan E di setiap titik dalam konduktor. Maka arus dan kerapatan arus tidak bergantung pada tanda muatan, sehingga

$$I = dQ/dt = n |q| v_d A \quad (5.2)$$

arus per satuan luas penampang dinamakan kerapatan arus dan disimbolkan dengan J .

$$J = \frac{I}{A} = n |q| v_d \quad (5.3)$$

Resistivitas atau hambatan jenis dari sebuah material disimbolkan dengan ρ dan didefinisikan sebagai rasio medan listrik dan kerapatan arus. Satuan SI dari resistivitas adalah ohm meter ($\Omega \cdot m$). Konduktor yang baik memiliki resistivitas kecil dan isolator yang baik mempunyai resistivitas besar.

$$\rho = \frac{E}{J} \quad (5.4)$$

Hukum Ohm menyatakan bahwa resistivitas adalah konstan, namun resistivitas meningkat dengan bertambahnya suhu. Untuk perubahan suhu yang kecil, secara aproksimasi perubahan resistivitas dapat dinyatakan oleh:

$$\rho(T) = \rho_0[1 + \alpha (T-T_0)] \quad (5.5)$$

di mana α adalah koefisien suhu resistivitas.

5.2 Hambatan (Resistansi)

Hukum Ohm menyatakan bahwa selisih potensial V yang melewati sebuah material sebanding dengan arus I yang melalui material tersebut,

$$V = IR \quad (5.6)$$

di mana R adalah resistansi material tersebut. Jika dinyatakan dalam resistivitas ρ , panjang L , dan luas penampang A ,

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (5.7)$$

Satuan SI untuk resistansi adalah ohm ($1 \Omega = 1 \text{ V/A}$). Karena resistivitas sebuah material berubah dengan suhu, maka resistansi sebuah konduktor juga berubah dengan suhu. Untuk jangkauan suhu yang tidak terlalu besar,

$$R(T) = R_0[1 + \alpha (T-T_0)] \quad (5.8)$$

Dalam persamaan ini, $R(T)$ adalah resistansi pada suhu T dan R_0 adalah resistansi pada suhu T_0 , seringkali diambil sebagai 0°C atau 20°C .

Contoh soal 1. Medan listrik, selisih potensial listrik dan resistansi dalam

Sebuah kawat tembaga mempunyai luas penampang $8,2 \times 10^{-7} \text{ m}^2$. Kawat itu mengangkut arus $1,67 \text{ A}$ dan resistivitas tembaga adalah $1,72 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$. a) Carilah medan listrik dalam kawat, b) Selisih potensial antara dua titik dalam kawat yang terpisah sejauh 50 m , c) Resistansi kawat sepanjang 50 m .

Solusi

Diketahui: $A = 8,2 \times 10^{-7} \text{ m}^2$, $L = 1,67 \text{ A}$

Ditanya : E , V dan $R = ?$

Jawab:

$$\begin{aligned} \text{a) Medan listrik dalam kawat diberikan oleh } E &= \rho J = \frac{\rho L}{A} = \frac{(1,72 \times 10^{-8})(1,67)}{8,2 \times 10^{-7}} \\ &= 0,035 \text{ V/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b) Selisih potensial diberikan oleh } V &= Ed = (0,035 \text{ V/m})(50 \text{ m}) \\ &= 1,70 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\text{c) Resistansi kawat diberikan oleh } R = \frac{V}{I} = \frac{1,70 \text{ V}}{1,67 \text{ A}} = 1,0 \Omega$$

Resistor yang digunakan dalam rangkaian elektronik biasanya berbentuk silinder yang diameter dan panjangnya beberapa milimeter dengan kawat-kawat yang keluar dari ujung-ujungnya. Resistansi dapat ditentukan dengan kode standar yang menggunakan tiga atau empat pita warna dimulai dari yang terdekat ke salah satu ujungnya. Sebagaimana yang diperlihatkan dalam Tabel 5.1, dua pita pertama adalah angka-angka dan pita ketiga adalah pengali. Pita keempat adalah toleransi dengan kode warna emas 5% dan perak 10%.

Tabel 5.1 Kode warna untuk resistor.

WARNA	NILAI SEBAGAI ANGKA	NILAI SEBAGAI PENGALI
Hitam	0	1
Cokelat	1	10
Merah	2	10^2
Jingga	3	10^3
Kuning	4	10^4
Hijau	5	10^5
Biru	6	10^6
Ungu	7	10^7
Abu-abu	8	10^8
Putih	9	10^9

5.3 Tegangan Gerak Listrik

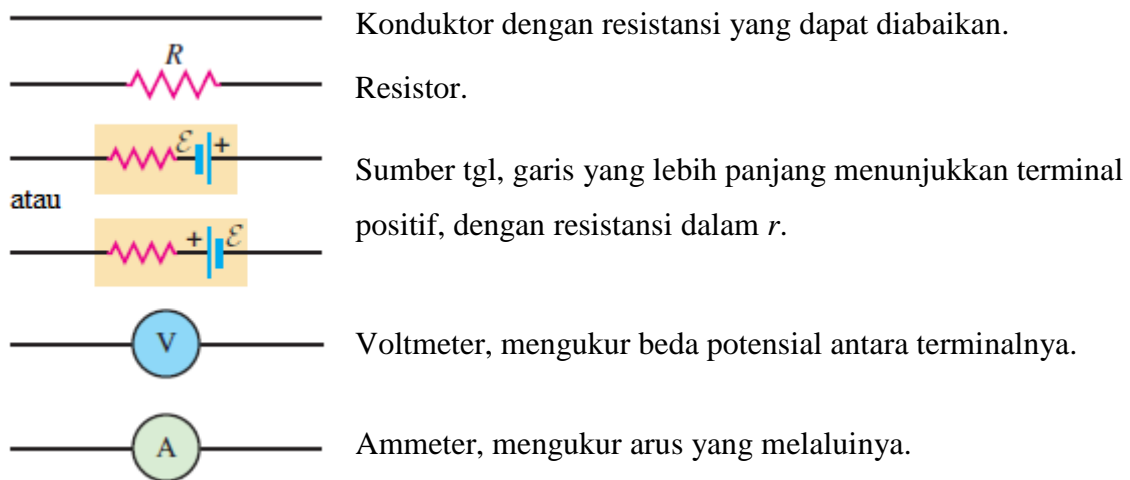
Sebuah rangkaian lengkap yang mengangkut arus kontinu harus mengandung sebuah sumber tegangan gerak listrik (tgl) disimbolkan dengan ε . Satuan tgl adalah volt (V). Sebuah sumber tgl mempertahankan selisih potensial yang konstan dan mempunyai suatu resistansi dalam r . Jika sebuah arus mengalir melalui sebuah sumber dari terminal negatif b ke terminal positif a , selisih potensial V_{ab} di antara terminal-terminal tersebut adalah,

$$V_{ab} = \varepsilon - Ir \quad (5.9)$$

di mana $V_{ab} = IR$. Jika digabungkan, $\varepsilon - Ir = IR$, atau

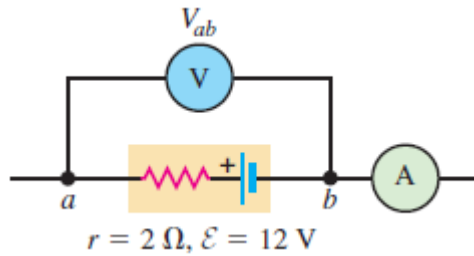
$$I = \frac{\varepsilon}{R + r} \quad (5.10)$$

Sebuah langkah penting dalam menganalisis sebuah rangkaian listrik adalah dengan menggambar skema diagram rangkaian. Sebuah voltmeter yang diidealkan mempunyai resistansi tak berhingga sehingga tidak ada arus yang dapat melaluinya. Sedangkan ammeter yang diidealkan mempunyai resistansi nol dan tidak memiliki beda potensial antara terminalnya.



Gambar 5.3 Simbol-simbol diagram rangkaian.

Contoh soal 2. Sumber tgl dalam sebuah rangkaian terbuka

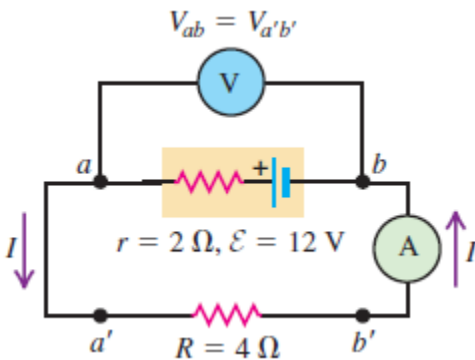


Gambar di sebelah menunjukkan sebuah sumber tgl dengan $\varepsilon = 12 \text{ V}$ dan resistansi dalam $r = 2 \Omega$. Kabel ke kiri a dan kanan ammeter dalam keadaan terbuka. Tentukanlah pembacaan V_{ab} dan I dari voltmeter dan ammeter yang diidealkan.

Solusi

Tidak ada arus yang melewati voltmeter yang diidealkan karena resistansinya besar tak berhingga, sehingga $V_{ab} = \varepsilon - Ir = \varepsilon$ dan pembacaan voltmeter adalah 12 V . Juga tidak ada arus yang melewati ammeter karena tidak ada rangkaian lengkap, sehingga pembacaan ammeter adalah 0 A .

Contoh soal 3. Sumber tgl dalam sebuah rangkaian lengkap



Gambar di sebelah menunjukkan sebuah sumber tgl dengan $\varepsilon = 12 \text{ V}$ dan resistansi dalam $r = 2 \Omega$ dalam rangkaian lengkap dengan menambahkan $R = 4 \Omega$. Tentukanlah sekarang pembacaan voltmeter dan ammeter yang diidealkan.

Solusi

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r} = \frac{12 \text{ V}}{4 \Omega + 2 \Omega} = 2 \text{ A. Ammeter membaca } I = 2 \text{ A.}$$

Ammeter yang diidealkan mempunyai resistansi nol dan tidak ada selisih potensial antara titik a dan a' atau antara titik b dan b' sehingga $V_{ab} = V_{a'b'}$.

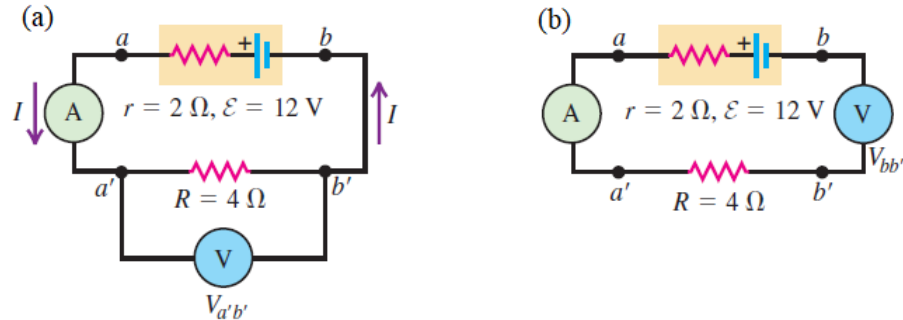
$$V_{a'b'} = IR = (2 \text{ A})(4 \Omega) = 8 \text{ V}$$

$$V_{ab} = \varepsilon - Ir = 12 \text{ V} - (2 \text{ A})(2 \Omega) = 8 \text{ V}$$

Cara yang mana saja menyimpulkan bahwa pembacaan voltmeter adalah 8 V .

Contoh soal 4. Menggunakan voltmeter dan ammeter

Voltmeter dan ammeter pada contoh soal sebelumnya dipindahkan ke beberapa posisi. Pada kedua gambar tentukanlah pembacaan voltmeter dan ammeter yang diidealkan.



Solusi

Pada gambar (a) voltmeter sekarang mengukur beda potensial antara titik a' dan b' . Seperti pada soal sebelumnya $V_{ab} = V_{a'b'}$ dan pembacaan voltmeter adalah $V_{a'b} = 8 \text{ V}$. Sedangkan arus dalam sebuah rangkaian adalah sama di setiap titik sehingga pembacaan ammeter adalah 2 A .

Pada gambar (b) voltmeter disambung secara seri dengan rangkaian sehingga tidak ada arus yang mengalir melalui rangkaian dan pembacaan ammeter adalah 0 A . Sedangkan voltmeter mengukur beda potensial $V_{bb'}$ antara titik b dan b' . Karena tidak ada arus yang mengalir $V_{a'b'} = IR = 0$ dan $V_{aa'}$ juga sama dengan 0 A , maka $V_{ab} = V_{bb'}$ sehingga pembacaan voltmeter adalah 8 V .

5.4 Energi dan Daya Listrik

Rangkaian dengan selisih potensial V_{ab} dan arus I memberi energi ke dalam sebuah rangkaian jika arah arus adalah dari potensial yang lebih rendah ke potensial yang lebih tinggi dalam tgl itu, dan mengambil energi ke luar dari rangkaian itu jika arus itu berada dalam arah yang berlawanan. Daya atau laju transfer energi disimbolkan dengan P , diberikan oleh

$$P = V_{ab} I \quad (5.11)$$

Sebuah resistansi R selalu mengambil energi listrik keluar dari sebuah rangkaian, yang mengkonversikannya menjadi energi termal dengan laju yang diberikan oleh

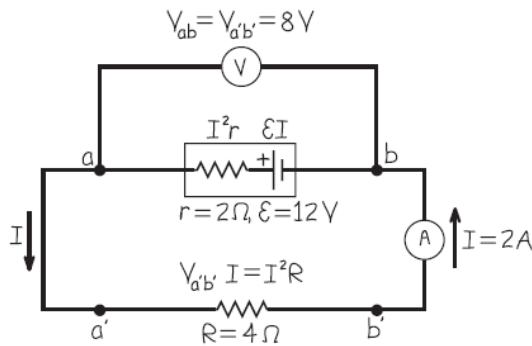
$$P = V_{ab} I = I^2 R = \frac{V_{ab}^2}{R} \quad (5.12)$$

Dalam sebuah rangkaian lengkap, keluaran daya netto dari aki diberikan oleh

$$P = V_{ab}I = \mathcal{E}I - I^2r \quad (5.13)$$

Di mana laju konversi energi kimia ke energi listrik dalam aki adalah $\mathcal{E}I$ dan laju disipasi energi dalam aki adalah I^2r .

Contoh soal 5. Masukan dan keluaran daya dalam rangkaian lengkap



Carilah laju konversi energi kimia ke energi listrik dan laju disipasi energi dalam aki dan keluaran daya netto dari aki tsb.

Solusi

Laju konversi energi dalam aki adalah $\mathcal{E}I = (12 \text{ V})(2 \text{ A}) = 24 \text{ W}$

Laju disipasi energi dalam aki adalah $I^2r = (2 \text{ A})^2(2 \Omega) = 8 \text{ W}$

Keluaran daya netto dari aki adalah $\mathcal{E}I - I^2r = 16 \text{ W}$

5.5 Kesimpulan

1. Arus listrik I adalah banyaknya muatan yang mengalir melalui luas tertentu per satuan waktu,

$$I = dQ/dt = n/q/v_d A$$

2. Kerapatan arus J adalah arus persatuan luas A ,

$$J = n/q/v_d$$

3. Resistivitas ρ dari material adalah rasio antara medan listrik dan kerapatan arus,

$$\rho = E/J.$$

4. Beda potensial (tegangan) V yang melintasi material mengikuti hukum Ohm, yakni sebanding dengan arus yang melalui material dikali dengan resistansi R ,

$$V_{ab} = IR.$$

5. Dalam sebuah rangkaian tertutup beda potensial dua titik setara dengan tgl sebuah sumber dikurangi disipasi resistansi dalam r ,

$$V_{ab} = \varepsilon - Ir.$$

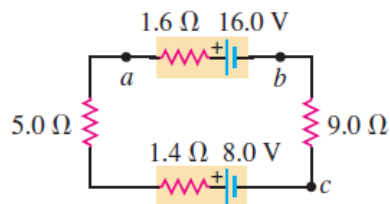
6. Daya P (laju transfer energi) sebuah sumber tgl diberikan oleh $P = V_{ab}I$.

7. Sebuah resistansi R selalu mengambil energi listrik keluar dari sebuah rangkaian, yang mengonversikannya menjadi energi termal dengan laju yang diberikan oleh

$$P = V_{ab}I = I^2R = \frac{V_{ab}^2}{R}$$

5.6 Soal Latihan

- Sebuah kawat perak yang diameternya 2,6 mm memindahkan muatan sebesar 420 C dalam waktu 80 menit. Perak mengandung $5,8 \times 10^{28}$ elektron bebas per meter kubik. a) Berapakah arus dalam kawat itu? b) Berapakah besarnya kecepatan penyimpang elektron dalam kawat?
- Anda memberikan selisih potensial sebesar 4,50 V di antara ujung-ujung sebuah kawat yang panjangnya 2,50 m dan jari-jarinya 0,654 mm. Arus yang dihasilkan melalui kawat itu adalah 17,0 A. Berapakah resistivitas kawat itu?
- Rangkaian yang diperlihatkan dalam gambar di bawah memiliki dua aki yang masing-masing memiliki tgl, resistansi dalam dan dua resistor. Carilah a) Besar dan arah arus dalam rangkain tersebut, b) Tegangan terminal V_{ab} dari aki 16,0 V, c) Selisih potensial V_{ac} dari titik a terhadap titik c d) Gambarkanlah grafik kenaikan dan penurunan potensial dalam rangkaian ini.



4. Dalam rangkaian yang diperlihatkan dalam gambar di bawah, hitunglah a) laju konversi energi dalam (energi kimia) menjadi energi listrik di dalam aki itu, b) laju disipasi energi listrik dalam aki itu, c) laju disipasi energi listrik dalam resistor luar.

