

Bab 3

LISTRIK ARUS SEARAH

Pada bab terhadulu focus pembahasan kita adalah gejala yang dihasilkan oleh muatan listrik yang diam. Topik tersebut dinamakan elektrostatika. Pada bab ini kita akan belajar tentang besaran-besaran yang terkait dengan muatan yang bergerak. Dan pada bab-bab selanjutnya kita akan mempelajari fenomena yang ditimbulkan oleh muatan yang bergerak. Kita akan mulai dengan mempelajari arus searah dan rangkaian arus searah. Arus bolak-balik dan rangkaian arus bolak-balik akan dipelajari di Bab 7 setelah kita mempelajari induksi elektromagnetik. Ini disebabkan adanya keterkaitan antara arus bolak-balik dengan induksi elektromagnetik.

3.1 Arus listrik

Kita mulai dengan definisi umum tentang arus listrik. Arus listrik didefinisikan aliran muatan listrik. Arus listrik mengukur berapa banyak muatan listrik yang mengalir per satuan waktu. Jika dalam selang waktu Δt jumlah muatan listrik yang mengalir adalah ΔQ , maka besarnya arus listrik didefinisikan sebagai

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (3.1)$$

Satuan muatan listrik adalah coulomb dan disingkat C dan satuan arus listrik adalah ampere, yang disingkat A. Dengan demikian 1 ampere = 1 coulomb/detik.

Muatan listrik ada yang bertanda positif dan ada yang bertanda

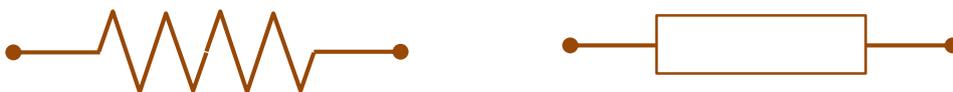
Bab 3 Listrik Arus Searah

negatif. Arah arus listrik didefinisikan searah dengan arah aliran muatan positif. Pada logam-logam sebenarnya yang mengalir adalah electron-elektron yang memiliki muatan negative. Muatan positif berupa atom-atom yang ditinggalkan electron tidak dapat mengalir karena terikat kuat membangun logam tersebut. Mengingat definisi arus listrik searah dengan aliran muatan positif maka arah arus listrik dalam logam berlawanan dengan arah aliran electron. Jadi, ketika kita menggambar arah arus dalam kawat dari kanan ke kiri sebenarnya yang terjadi adalah aliran electron dari kiri ke kanan.

Muatan listrik dapat mengalir dari satu tempat ke tempat lain karena adanya beda potensial. Tempat yang memiliki potensial tinggi melepaskan muatan ke tempat yang memiliki potensial rendah. Besarnya arus yang mengalir berbanding lurus dengan beda potensial, V , antara dua tempat, atau $I \propto V$. Kesebandingan di atas selanjutnya dapat ditulis

$$I = \frac{1}{R}V \quad (3.2)$$

dengan R didefinisikan hambatan listrik antara dua titik. Satuan hambatan listrik adalah Ohm dan disingkat Ω . Mengapa R disebut hambatan listrik? Karena R berperan menghambat mengalirnya muatan listrik. Makin besar R maka arus listrik makin sulit mengalir yang ditandai dengan arus yang makin kecil. Persamaan (3.2) dinamakan hukum Ohm. Simbol untuk hambatan listrik tampak pada **Gambar 3.1**.

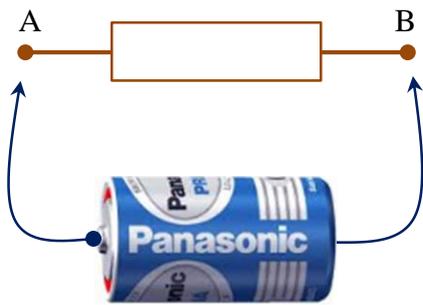


Gambar 3.1 Simbol hambatan listrik

Contoh 3.1

Diilustrasikan pada **Gambar 3.2**, titik A memiliki potensial lebih tinggi dari titik B. hambatan tersebut dihubungkan dengan baterai yang memiliki potensial 1,5 V. Jika hambatan listrik antara titik A dan B adalah 100 Ω , (a) berapa arus yang mengalir melalui hambatan dan ke mana arahnya? (b) berapa besar muatan yang berpindah selama 5 s?

Bab 3 Listrik Arus Searah



Gambar 3.2 Gambar untuk Contoh 3.1

Jawab

(a) Arus yang mengalir

$$I = \frac{V}{R} = \frac{1,5}{100} = 0,015 \text{ A}$$

Karena titik A memiliki potensial lebih tinggi dari titik B maka arus listrik dalam hambatan mengalir dari A ke B. Ini berarti pula bahwa electron mengalir dari titik B ke titik A.

(b) Muatan yang berpindah selama selang waktu tersebut adalah

$$\Delta Q = I \Delta t = 0,015 \times 5 = 0,075 \text{ C}$$

3.2 Arus pada percabangan

Selanjutnya mari kita analisis arus yang melalui suatu percabangan. Misalkan di suatu titik percabangan dalam rangkaian listrik, muatan mengalir masuk pada sebagian cabang dan muatan mengalir keluar pada sebagian cabang yang lain. Muatan listrik bersifat kekal, yang artinya muatan listrik tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan. Dengan demikian

Jumlah muatan yang masuk titik percabangan = jumlah muatan yang keluar titik percabangan

Ungakapan ini dapat dinyatakan dalam bentuk matematis sebagai berikut

Bab 3 Listrik Arus Searah

$$\sum_{\text{masuk}} Q = \sum_{\text{keluar}} Q$$

atau

$$Q_{m,1} + Q_{m,2} + \dots + Q_{m,N} = Q_{k,1} + Q_{k,2} + \dots + Q_{k,M} \quad (3.3)$$

dengan

m adalah indeks untuk masuk,

k adalah indeks untuk keluar,

N adalah jumlah cabang tempat arus masuk, dan

M adalah jumlah cabang tempat arus keluar.

Jumlah total cabang adalah $N+M$. Jika muatan yang keluar dan masuk tersebut dicatat dalam selang waktu Δt maka sisi kiri dan kanan persamaan (3.3) sama-sama dapat dibagi Δt dan kita peroleh

$$\frac{Q_{m,1} + Q_{m,2} + \dots + Q_{m,N}}{\Delta t} = \frac{Q_{k,1} + Q_{k,2} + \dots + Q_{k,M}}{\Delta t}$$

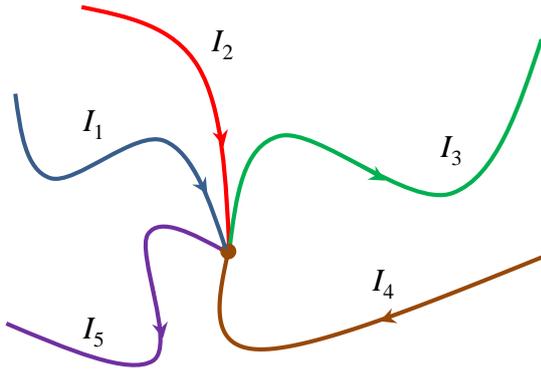
$$\frac{Q_{m,1}}{\Delta t} + \frac{Q_{m,2}}{\Delta t} + \dots + \frac{Q_{m,N}}{\Delta t} = \frac{Q_{k,1}}{\Delta t} + \frac{Q_{k,2}}{\Delta t} + \dots + \frac{Q_{k,M}}{\Delta t}$$

$$I_{m,1} + I_{m,2} + \dots + I_{m,N} = I_{k,1} + I_{k,2} + \dots + I_{k,M} \quad (3.4)$$

Persamaan (3.4) menyatakan bahwa jumlah total arus masuk ke suatu percabangan sama dengan jumlah total arus yang keluar di percabangan tersebut. Ungkapan ini dikenal dengan hukum kekekalan muatan listrik, dan dikenal pula dengan **hukum Kirchoff I**. Pada **Gambar 3.3** arus masuk adalah $I_1 + I_2 + I_4$ dan arus keluar adalah $I_3 + I_5$. Dengan hukum Kirchoff I kita dapatkan hubungan

$$I_1 + I_2 + I_4 = I_3 + I_5$$

Rumus ini pun menyatakan bahwa tidak ada muatan listrik yang terakumulasi di titik percabangan. Begitu ada muatan yang mengalir menuju ke percabangan maka pasti ada muatan yang mengalir keluar dari percabangan yang jumlahnya totalnya sama besar.



Gambar 3.3 Arus yang masuk dan keluar dari percabangan. Jumlah total arus yang masuk ke titik percabangan sama dengan jumlah total arus yang keluar titik percabangan tersebut.

3.3 Sumber potensial listrik

Perbedaan potensial listrik pada titik yang berbeda dalam suatu rangkaian terjadi jika dalam rangkaian dipasang sumber potensial listrik yang dikenal juga dengan GGL (gaya gerak listrik) atau dalam bahasa Inggris disebut *electromotive force* (EMF). Contoh GGL adalah baterai, aki, dynamo, sel surya, dan lain-lain. GGL memiliki dua terminal atau kutub yang memiliki potensial yang berbeda. Jika kutub-kutub GGL dihubungkan ke rangkaian, maka arus listrik mengalir keluar dari kutub yang memiliki potensial lebih tinggi, menuju rangkaian, dan mengalir masuk ke kutub yang memiliki potensial lebih rendah. Kutub GGL yang potensialnya lebih tinggi sering disebut **kutub positif** dan kutub yang potensialnya lebih rendah disebut **kutub negatif**. Simbol untuk GGL tampak dalam **Gambar 3.4**. Diperlihatkan juga posisi baterai yang sesuai dengan arah simbol tersebut.

Pada simbol GGL dalam **Gambar 3.4**, bagian yang bergaris lebih panjang adalah kutub positif, sedangkan yang bergaris lebih pendek adalah kutub negatif. Jika GGL dihubungkan dengan rangkaian listrik maka arus keluar dari kutub positif menuju rangkaian dan dari rangkaian masuk ke kutub negatif. Dalam GGL sendiri arus mengalir dari kutub negatif ke kutub positif.

Sebagai contoh, perhatikan rangkaian pada **Gambar 3.5**. Sebuah GGL dihubungkan dengan sebuah hambatan. Jika beda potensial antara dua kutub GGL adalah ε maka beda potensial antara dua ujung hambatan adalah ε juga. Dengan menggunakan persamaan (3.2) maka arus yang mengalir dalam hambatan memenuhi

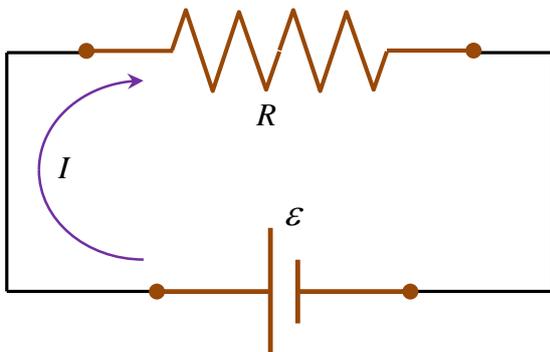
Bab 3 Listrik Arus Searah

$$I = \frac{\varepsilon}{R} \quad (3.5)$$

Arus yang mengalir dalam hambatan persis sama dengan arus yang mengalir dalam rangkaian.



Gambar 3.4 Simbol ggl dan posisi baterai yang bersesuaian dengan symbol tersebut.



Gambar 3.5 Rangkaian yang mengandung ggl dan hambatan

3.4 Hambatan listrik

Semua material memiliki hambatan listrik. Besi, kayu, batu, karet, air, udara, dan lain-lain memiliki hambatan listrik. Namun, hambatan listrik yang dimiliki batu, kayu kering, karet, dan lain-lain sangat besar sehingga begitu diberi beda potensial antar dua ujungnya, hampir tidak ada

Bab 3 Listrik Arus Searah

arus yang mengalir. Benda yang tidak dapat dialiri arus listrik dinamakan **isolator**. Sebaliknya, logam memiliki hambatan yang sangat kecil. Dengan memberi beda potensial yang kecil saja antar dua ujungnya, arus yang mengalir cukup besar. Material yang mudah dialiri arus listrik dinamakan **konduktor**.

Hambatan listrik yang dimiliki bahan memiliki sifat-sifat sebagai berikut:

i) Makin besar jika bahan makin panjang ($R \propto L$)

ii) Makin kecil jika ukuran penampang bahan makin besar ($R \propto 1/A$).

Hubungan antara hambatan listrik yang dimiliki bahan dengan ukuran bahan memenuhi

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (3.6)$$

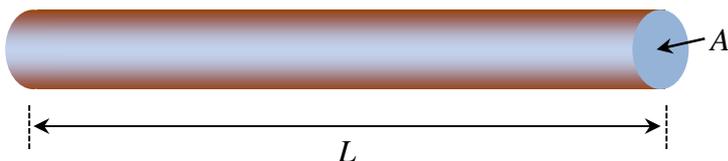
dengan

R hambatan yang dimiliki bahan

L panjang bahan, A luas penampang bahan

ρ disebut hambatan jenis bahan.

Gambar 3.6 memperlihatkan parameter-parameter tersebut. Hambatan jenis beberapa bahan tampak pada Tabel 3.1



Gambar 3.6 Parameter-parameter kawat yang menentukan hambatan listrik yang dimiliki kawat tersebut.

Contoh 3.2

Misalkan kamu ingin menghubungkan tape stereo dengan speaker yang lokasinya cukup jauh. a) Jika masing-masing kawat panjangnya 20 meter dan kawat tersebut terbuat dari tembaga, berapakah diameter kawat agar hambatannya $0,1 \Omega$? b) Jika besar arus yang mengalir ke masing-masing speaker $2A$, berapakah penurunan tegangan listrik sepanjang kawat?

Bab 3 Listrik Arus Searah

Tabel 3.1 Hambatan jenis beberapa bahan pada suhu 20 °C.

Jenis bahan	Hambatan jenis, ρ (Ω m)	Koefisien suhu, α ($^{\circ}\text{C}$) ⁻¹
karbon	$1,0 \times 10^{-8}$	-0,0002
Perak	$1,59 \times 10^{-8}$	0,0061
Tembaga	$1,68 \times 10^{-8}$	0,0068
Emas	$2,44 \times 10^{-8}$	0,0034
Aluminum	$2,65 \times 10^{-8}$	0,00429
Tungsten	$5,6 \times 10^{-8}$	0,0045
seng	$5,90 \times 10^{-8}$	0,0037
nikel	$6,99 \times 10^{-8}$	0,006
Besi	$9,71 \times 10^{-8}$	0,00651
Platina	$10,6 \times 10^{-8}$	0,003927
timah	$10,9 \times 10^{-8}$	0,0045
timbal	$22,0 \times 10^{-8}$	0,0039
tanium	$42,0 \times 10^{-8}$	0,0038
mangan	$48,2 \times 10^{-8}$	0,000002
Air raksa	98×10^{-8}	0,0009
Nikrom	100×10^{-8}	0,0004
Gelas	$10^9 - 10^{12}$	
Karet keras	$10^{13} - 10^{15}$	

Jawab

Tampak dari Tabel 3.1 bahwa hambatan jenis tembaga adalah $\rho = 1,68 \times 10^{-8} \Omega$ m.

(a) Luas penampang kawat yang diperlukan

$$A = \frac{\rho L}{R} = \frac{1,68 \times 10^{-8} \cdot 20}{0,1} = 3,4 \times 10^{-6} \text{ m}^2.$$

Jika d adalah diameter kawat maka $A = \pi d^2 / 4$ sehingga

$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 3,4 \times 10^{-6}}{3,16}} = 2,1 \times 10^{-3} \text{ m} = 2,1 \text{ mm}$$

(b) Berdasarkan hukum Ohm, penurunan tegangan listrik sepanjang kawat adalah

$$V = IR = 2 \times 0,1$$

$$= 0,1 \text{ V}$$

3.5 Kebergantungan hambatan pada suhu

Hambatan suatu material berubah dengan terjadinya perubahan suhu. Umumnya, makin tinggi suhu maka makin besar hambatan benda. Untuk kebanyakan bahan logam, kebergantungan hambatan pada suhu memenuhi persamaan

$$R = R_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (3.7)$$

dengan T suhu, T_0 suhu acuan, R nilai hambatan pada suhu T , R_0 ilai hambatan pada suhu acuan T_0 , dan α koefisien suhu dari hambatan ($^{\circ}\text{C}$)⁻¹. Tabel 3.1 memperlihatkan nilai koefisien suhu untuk hambatan beberapa jenis material.

Pada kebanyakan zat cair seperti elektrolit, kebergantungan hambatan pada suhu memenuhi persamaan Arrhenius sebagai berikut

$$R(T) = R_{\infty} e^{\beta/T} \quad (3.8)$$

di mana

β adalah konstanta

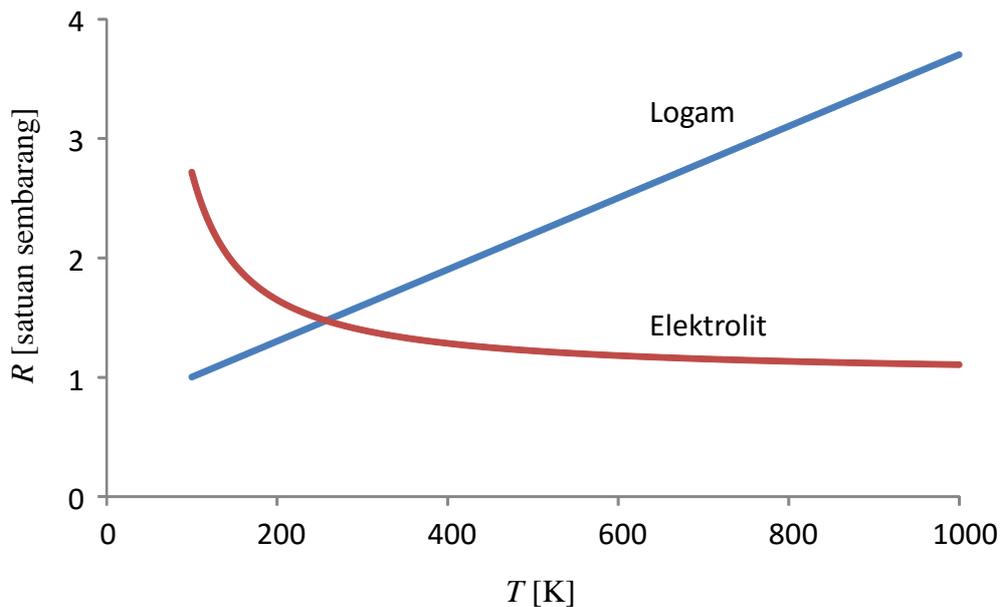
R_{∞} adalah nilai hambatan pada suhu menuju tak berhingga.

Gambar 3.7 adalah ilustrasi perubahan hambatan listrik logam dan elektrolit ketika suhu diubah. Secara umum hambatan logam makin besar jika suhu makin besar. Sebaliknya, hambatan elektrolit makin kecil ketika suhu makin besar.

Contoh 3.3

Sepotong kawat platina digunakan untuk menentukan hambatan suatu larutan. Misalkan pada suhu 20 $^{\circ}\text{C}$ hambatan kawat tersebut 164,2 Ω . Kawat tersebut kemudian dicelupkan ke dalam larutan dan tahannya meningkat menjadi 187,4 Ω . Berapa suhu larutan tersebut?

Bab 3 Listrik Arus Searah



Gambar 3.7 Ilustrasi perubahan hambatan logam dan elektrolit terhadap perubahan suhu. Hambatan logam makin besar jika suhu makin besar. Sebaliknya, hambatan elektrolit makin kecil ketika suhu makin besar.

Jawab

Berdasarkan Tabel 3.1, $\alpha = 0,003927$ ($^{\circ}\text{C}$)⁻¹. Berdasarkan persamaan (3.6) kita dapat menulis

$$\frac{R}{R_0} = 1 + \alpha(T - T_0)$$

$$\frac{187,4}{164,2} = 1 + 0,003927(T - 20)$$

$$1,14 = 1 + 0,003927(T - 20)$$

$$0,003927(T - 20) = 0,14$$

$$T - 20 = 0,14/0,003927 = 35,7$$

atau

$$T = 35,7 + 20 = 55,7 \text{ } ^{\circ}\text{C}.$$

3.6 Kebergantungan hambatan pada tegangan

Pada sejumlah piranti elektronika, hambatan tidak hanya bergantung pada dimensi bahan maupun suhu, tetapi juga bergantung pada

Bab 3 Listrik Arus Searah

tegangan listrik yang ada dalam bahan. Untuk membuktikan sifat tersebut kita kembali ke hukum Ohm yang dapat ditulis

$$\frac{1}{R} = \frac{I}{V}$$

Persamaan ini sebenarnya benar jika arus merupakan fungsi linier dari potensial, atau arus berbanding lurus dengan potensial. Namun, pada kebanyakan bahan semikonduktor seperti dioda dan transistor, arus tidak berbanding lurus dengan potensial. Kadang arus merupakan fungsi kuadratik, fungsi kubik, atau fungsi lain dari potensial. Jika arus merupakan fungsi kuadratik potensial maka kita dapat menulis

$$I = aV + bV^2 \quad (3.9)$$

dengan a dan b adalah konstanta. Jika fungsi arus seperti ini maka hambatan tidak dapat ditulis dalam bentuk hukum Ohm standar tapi harus ditulis dalam bentuk diferensial berikut ini

$$\frac{1}{R} = \frac{dI}{dV} \quad (3.10)$$

Dengan memasukkan I dalam persamaan (3.10) maka kita peroleh

$$\frac{1}{R} = a + 2bV$$

atau hambatan menjadi

$$R = \frac{1}{a + 2bV}$$

Tampak bahwa hambatan bergantung pada potensial. Makin besar potensial maka hambatan makin kecil. Jika potensial sangat kecil sehingga $a \gg 2bV$ maka hambatan mendekati konstan yaitu $R = 1/a$.

Pada dioda atau transistor, kebergantungan arus pada potensial memenuhi bentuk umum

Bab 3 Listrik Arus Searah

$$I = a(e^{\alpha V} - 1)$$

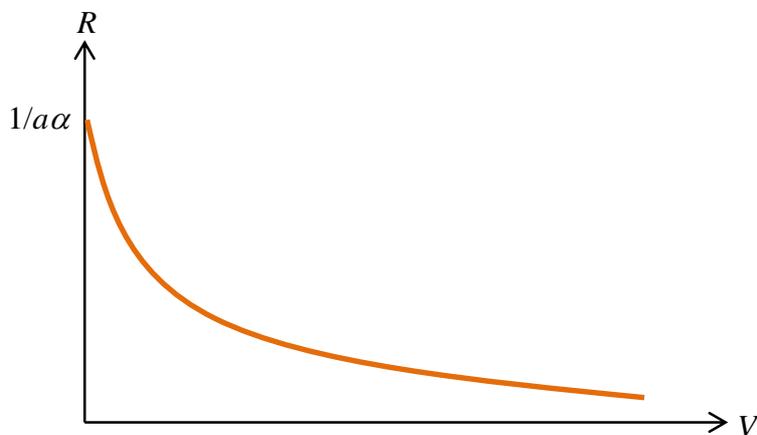
dengan a dan α adalah parameter yang secara umum bergantung suhu. Dengan persamaan ini maka hambatan memenuhi

$$\begin{aligned}\frac{1}{R} &= \frac{dI}{dV} \\ &= a\alpha e^{\alpha V}\end{aligned}$$

atau

$$R = \frac{1}{a\alpha} e^{-\alpha V} \quad (3.11)$$

Tampak bahwa hambatan sangat bergantung pada potensial dan turun sangat cepat dengan bertambahnya potensial. Pada potensial yang sangat besar, hambatan mendekati nol. Pada potensial yang sangat kecil hambatan mendekati $1/a\alpha$. **Gambar 3.8** adalah plot hambatan terhadap potensial



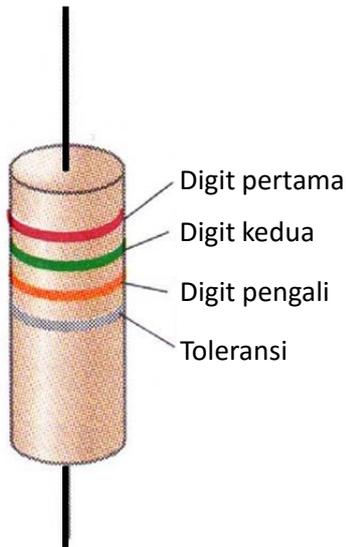
Gambar 3.8 Kebergantungan hambatan terhadap potensial seperti diberikan oleh persamaan (3.11). Hambatan turun secara monoton dengan naiknya potensial.

3.7 Hambatan komersial

Di pasar kita menjumpai hambatan listrik pada berbagai nilai hambatan. Hambatan-hambatan tersebut digunakan dalam perancangan rangkaian elektronika. Nilai hambatan bervariasi mulai dari di bawah 1Ω hingga di atas $10^7 \Omega$ ($10 \text{ M}\Omega$). Nilai yang dimiliki hambatan tersebut tidak

Bab 3 Listrik Arus Searah

tertera pada komponen. Nilai hambatan dinyatakan dalam kode-kode warna yang melingkar pada komponen seperti diilustrasikan pada **Gambar 3.9**. Jumlah kode umumnya 3 buah. Tetapi untuk hambatan yang lebih teliti, jumlah kode warna ada empat buah.



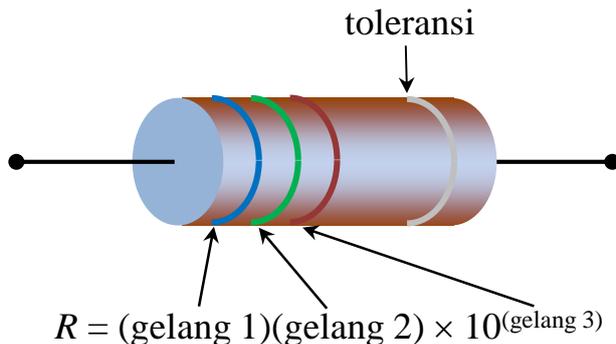
Gambar 3.9 Kode warna pada hambatan

Tabel 3.2 Angka yang berkaitan dengan kode-kode warna hambatan.

Warna	Nilai	Toleransi (%)
Hitam	0	
Coklat	1	
Merah	2	
Oranye	3	
Kuning	4	
Hijau	5	
Biru	6	
Ungu	7	
Abu-abu	8	
Putih	9	
Emas	-1	5%
Perak	-2	10%
Tidak berwarna		20%

Bab 3 Listrik Arus Searah

Nilai hambatan ditentukan oleh tiga kode warna pertama. Kode warna keempat disebut toleransi yang menentukan ketelitian nilai hambatan. Angka yang berkaitan dengan kode-kode warna tampak pada Tabel 3.2. Cara membaca nilai hambatan suatu hambatan berdasarkan kode warna diilustrasikan pada **Gambar 3.10**.



Gambar 3.10 Cara menentukan nilai hambatan berdasarkan kode warna

Hambatan = (nilai gelang pertama)(nilai gelang kedua) \times 10^(nilai gelang ketiga)

Contoh 3.4

Sebuah hambatan memiliki tiga gelang. Gelang pertama berwarna orange, gelang kedua hijau, dan gelang ketiga merah. Berapa nilai hambatannya? Berapakah toleransinya?

Jawab

Berdasarkan Tabel 3.2, angka-angka yang berkaitan dengan gelang warna adalah

Gelang pertama: orange = 3

Gelang kedua: hijau = 5

Gelang ketiga: merah = 2

Dengan demikian nilai hambatan adalah

$$R = 35 \times 10^2 \Omega = 3500 \Omega = 3,5 \text{ k}\Omega.$$

Karena hambatan tidak memiliki gelang keempat, atau gelang keempat tidak berwarna, maka toleransi hambatan tersebut adalah 20%. Dengan demikian, nilai hambatan sebenarnya berada dalam rentang 3,5 k Ω - 20% sampai 3,5

Bab 3 Listrik Arus Searah

$k\Omega + 20\%$ atau $2,8 k\Omega$ sampai $4,2 k\Omega$.

Contoh 3.5

Sebuah hambatan memiliki empat gelang. Gelang pertama berwarna coklat, gelang kedua kuning, gelang ketiga hitam, dan gelang keempat berwarna emas. Berapa nilai hambatannya? Berapakah toleransinya?

Jawab

Nilai-nilai gelang warna adalah

Gelang pertama : coklat = 1

Gelang kedua : kuning = 4

Gelang ketiga : hitam = 0

Gelang keempat : emas = 5%

Dengan demikian nilai hambatan yang dimiliki adalah

$$R = 14 \times 10^0 \Omega = 14 \Omega$$

Karena gelang keempat emas maka toleransinya 5%. Dengan demikian, nilai hambatan sebenarnya berada dalam rentang $14 \Omega - 5\%$ sampai $14 \Omega + 5\%$ atau $13,3 \Omega$ sampai $14,7 \Omega$.

3.8 Potensiometer

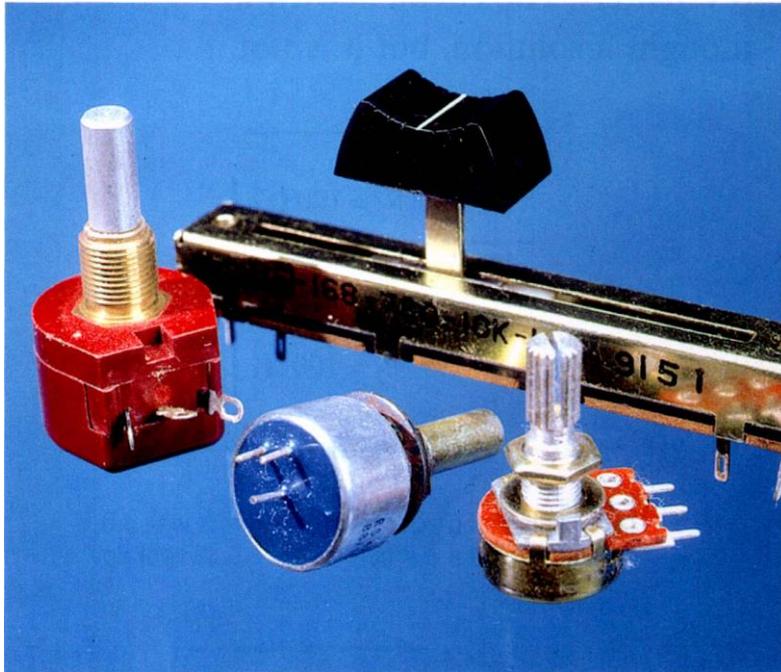
Potensiometer adalah hambatan listrik yang nilai hambatannya dapat diubah-ubah. Perubahan hambatan dilakukan dengan memutar atau menggeser knob. Contoh potensiometer diperlihatkan pada **Gambar 3.11**, sedangkan simbol potensiometer tampak pada **Gambar 3.12**.

Potensiometer kebanyakan memiliki tiga kaki. Dua kaki yang posisinya paling jauh memiliki hambatan yang tetap. Kaki tengah dapat digeser-geser yang menghasilkan perubahan nilai hambatan. Penggeseran tersebut menyebabkan hambatan antara kaki tengah dengan kaki ujung berubah: salah satu memiliki hambatan makin besar dan yang lainnya memiliki hambatan makin kecil. Dengan demikian, saat menggunakan potensiometer untuk mendapatkan hambatan yang berubah-ubah nilai kita memiliki kaki tengah dan satu kaki ujung yang mana saja.

Tidak semua nilai hambatan dapat dijumpai pada hambatan yang dijual di pasar. Untuk mendapatkan nilai hambatan yang tidak tersebut, kita dapat menggunakan potensiometer. Potensiometer tersebut dapat

Bab 3 Listrik Arus Searah

digunakan sendiri dengan menggeser knob sehingga diperoleh nilai hambatan yang diinginkan. Dapat pula diseri atau diparalel dengan hambatan lain dan mengatur knob sehingga diperoleh hambatan total sesuai dengan yang diinginkan.



Gambar 3.11 Contoh potensiometer. Hambatan potensiometer dapat diubah-ubah dengan memutar atau menggeser knob. Aada potensial yang sangat teliti dan kurang teliti. Potensimeter kurang teliti umumnya memiliki jangkauan putaran penuh hanya satu kali keliling. Potensiameter yang teliti memiliki jangkauan putaran penuh beberapa kali keliling.



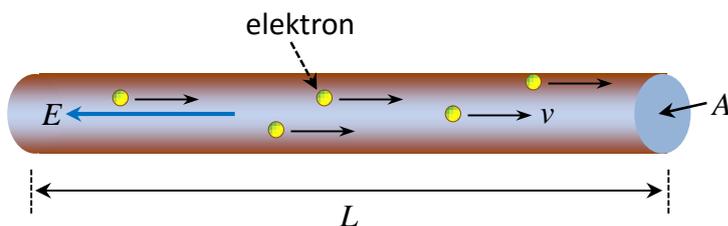
Gambar 3.12 Simbol potensiometer

3.9 Konduktivitas listrik

Gambar 3.13 adalah ilustrasi sebuah kabel konduktor. Dalam kabel terdapat elektron-elektron yang bergerak bebas. Jika tidak ada beda potensial antara dua ujung kabel maka peluang elektron bergerak ke kiri dan ke kanan sama sehingga arus total yang mengalir dalam kabel nol. Jika

Bab 3 Listrik Arus Searah

diberikan beda potensial antara dua ujung kabel maka muncul medan listrik dalam kabel. Medan listrik menarik elektron-elektron bergerak dalam arah yang berlawanan dengan arah medan. Akibatnya elektron memiliki percepatan dalam arah yang berlawanan dengan arah medan. Percepatan tersebut menyebabkan kecepatan elektron dalam arah berlawanan dengan medan bertambah. Tetapi karena dalam konduktor terdapat atom-atom yang posisi rata-ratanya tetap tetapi selalu bergetar maka terjadi tumbukan antara elektron yang sedang dipercepat dengan atom-atom tersebut. Tumbukan tersebut melahirkan gaya hambat pada elektron dalam arah yang berlawanan dengan arah gerak. Mekanisme ini menyebabkan electron hanya sanggup mencapai kecepatan maksimum tertentu yang disebut kecepatan terminal. Fenomena ini mirip dengan gerakan bola yang jatuh dalam zat cair. Akibat gaya gravitasi, bola memiliki percepatan sehingga kecepatannya bertambah. Tetapi pada akhirnya bola bergerak dengan kecepatan terminal akibat adanya gaya gesekan fluida yang mengimbangi gaya gravitasi.



Gambar 3.13 Ilustrasi kabel konduktor yang dialiri arus listrik

Dari hasil pengukuran didapatkan bahwa kecepatan terminal elektron dalam konduktor berbanding lurus dengan kuat medan di dalam bahan, atau

$$v = \mu E \quad (3.12)$$

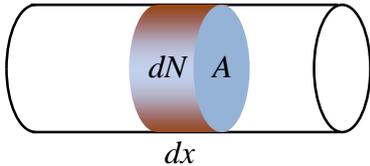
dengan μ adalah sebuah konstanta yang dikenal dengan mobilitas elektron.

Sekarang kita akan mencari rumusan formal untuk mengukur mudah tidaknya sebuah benda dialiri arus listrik. Perhatikan elemen kecil kawat sepanjang dx seperti diilustrasikan pada **Gambar 3.14**. Misalkan luas penampang kawat adalah A . Misalkan pula kerapatan elektron (jumlah

Bab 3 Listrik Arus Searah

elektron per satuan volum) adalah n . Volum elemen kawat sepanjang dx adalah $dV = Adx$. Jumlah elektron dalam elemen volum tersebut adalah

$$\begin{aligned}dN &= ndV \\ &= nAdx\end{aligned}$$



Gambar 3.14 Elemen kecil kawat yang dialiri arus listrik.

Karena satu elektron memiliki muatan e maka jumlah muatan elektron dalam elemen volum tersebut adalah

$$\begin{aligned}dQ &= edN \\ &= neAdx\end{aligned}$$

Arus yang mengalir dalam kawat adalah

$$\begin{aligned}I &= \frac{dQ}{dt} = \frac{neAdx}{dt} \\ &= neA \frac{dx}{dt} \\ &= neAv \\ &= neA\mu E\end{aligned}\tag{3.13}$$

Kerapatan arus dalam kawat (arus per satuan luas penampang), J , adalah

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

Bab 3 Listrik Arus Searah

$$\begin{aligned} &= ne\mu E \\ &= \sigma E \end{aligned} \tag{3.14}$$

dengan

$$\sigma = ne\mu \tag{3.15}$$

Besaran σ pada persamaan (3.15) dikenal dengan konduktivitas listrik. Konduktivitas listrik mengukur kemampuan bahan mengantarkan arus listrik. Makin besar konduktivitas maka makin mudah bahan tersebut mengantarkan listrik. Konduktor memiliki konduktivitas tinggi sedangkan isolator memiliki konduktivitas rendah. Satuan konduktivitas listrik adalah siemens per meter (S/m).

3.10 Hubungan konduktivitas dan resistivitas

Kita sudah bahas bahwa makin besar konduktivitasnya dan makin kecil resistivitasnya maka makin mudah suatu bahan mengantarkan listrik. Jadi, ada hubungan langsung antara konduktivitas dan resistivitas. Bagaimana hubungan tersebut? Mari kita cari.

Dari persamaan (3.13) kita dapat menulis

$$I = neA\mu \frac{EL}{L}$$

dengan L adalah panjang kawat. Dengan anggapan bahwa kuat medan listrik dalam kawat konstan maka EL adalah beda potensial antara dua ujung kawat. Jadi kita dapat menulis

$$I = neA\mu \frac{V}{L} \tag{3.16}$$

Dengan menggunakan hukum Ohm, $I = V/R$ maka kita simpulkan

$$R = \frac{1}{ne\mu} \frac{L}{A} \tag{3.17}$$

Bab 3 Listrik Arus Searah

Dengan membandingkan persamaan (3.6) dan (3.17) kita peroleh

$$\begin{aligned}\rho &= \frac{1}{ne\mu} \\ &= \frac{1}{\sigma}\end{aligned}\tag{3.18}$$

Kita simpulkan bahwa konduktivitas adalah kebalikan dari resistivitas.

Tabel 3.3 adalah daftar hambatan listrik sejumlah material. Dengan mengacu pada data dalam table tersebut dan menggunakan persamaan (3.18) maka konduktivitas listrik bahan dapat ditentukan dengan mudah. Konduktivitas listrik bahan memiliki rentang yang sangat lebar, mulai dari 10^{-14} S/cm hingga 10^8 S/cm. Bahan dengan konduktivitas di atas 10^3 S/cm masuk dalam kelompok konduktor, sedangkan yang memiliki konduktivitas di bawah 10^{-3} S/cm masuk dalam kelompok isolator.

3.11 Rangkaian hambatan listrik

Dalam rangkaian listrik umumnya kita menggunakan sejumlah hambatan. Hambatan tersebut kadang terpasang secara seri, seperti pada **Gambar 3.15(a)**, secara paralel (**Gambar 3.15(b)**) atau campuran seri dan paralel seperti pada **Gambar 3.15(c)**. Pertanyaannya, apabila sejumlah hambatan dipasang semacam itu, berapakah hambatan total yang dihasilkannya?

Hambatan seri

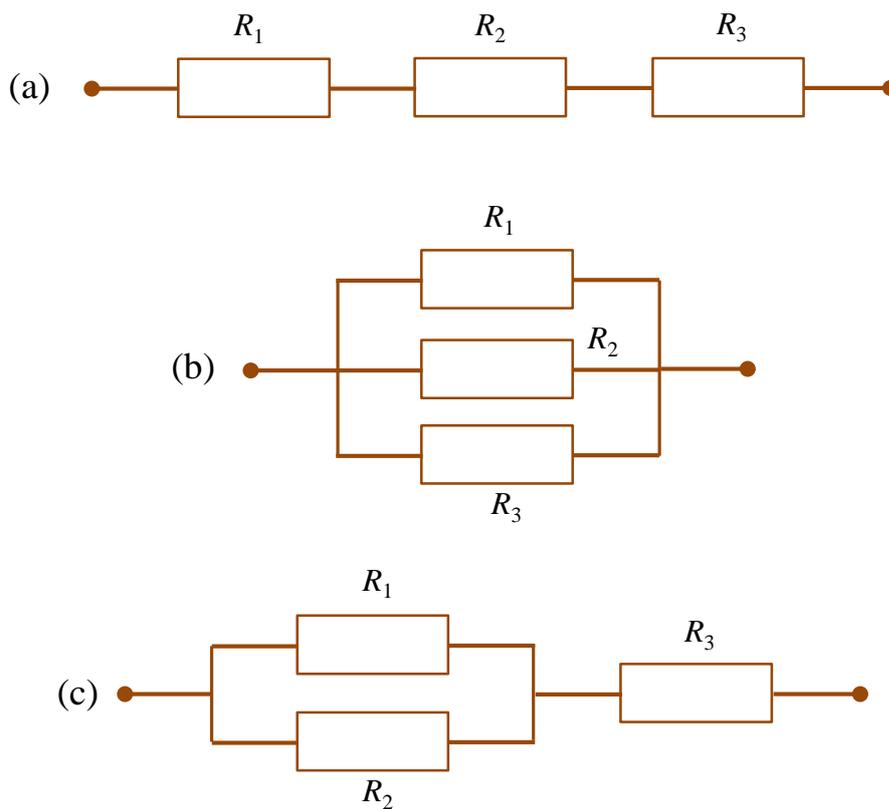
Mari kita tinjau hambatan yang disusun secara seri. Contohnya adalah hambatan R_1 , R_2 , dan R_3 pada **Gambar 3.16**. Terminal-terminal ujung hambatan tersebut diberi beda potensial V_{ad} sehingga mengalir arus I . Jika hambatan total adalah R maka terpenuhi

$$V_{ad} = IR\tag{3.19}$$

Jika beda potensial antar ujung masing-masing hambatan adalah V_{ab} , V_{bc} , dan V_{cd} maka terpenuhi

$$V_{ad} = V_{ab} + V_{bc} + V_{cd}$$

Bab 3 Listrik Arus Searah



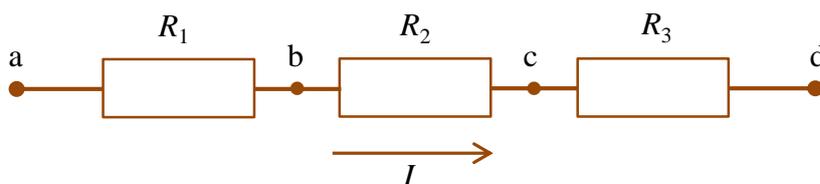
Gambar 3.15 (a) Hambatan yang disusun secara seri, (b) hambatan yang disusun secara paralel, dan (c) hambatan yang disusun campur seri dan paralel.

Karena arus yang mengalir pada semua hambatan sama maka

$$V_{ab} = I R_1$$

$$V_{bc} = I R_2$$

$$V_{cd} = I R_3$$



Gambar 3.16 Menentukan hambatan pengganti untuk sejumlah hambatan yang disusun secara seri.

Bab 3 Listrik Arus Searah

Substitusi ungkapan potensial masing-masing hambatan ke dalam persamaan (3.19) maka

$$IR = IR_1 + IR_2 + IR_3$$

Buang I pada kedua ruas diperoleh

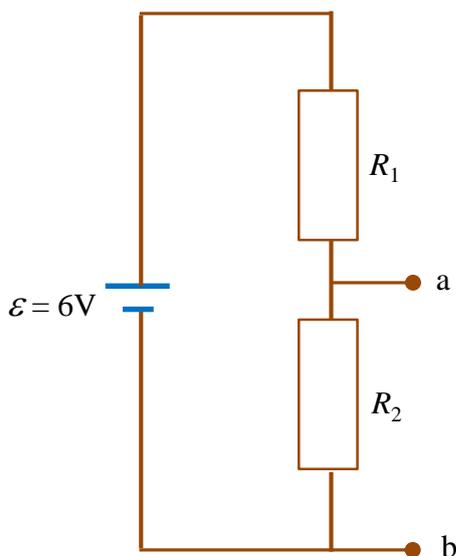
$$R = R_1 + R_2 + R_3 \quad (3.20)$$

Contoh 3.6

Misalkan kita memiliki sumber tegangan 6 V. Tetapi kita memiliki alat elektronik yang membutuhkan tegangan hanya 4 V. Tegangan 6 V dapat terlalu besar dan dapat merusak alat tersebut. Bagaimana caranya agar alat tetap bisa dioperasikan dengan menggunakan sumber tegangan 6 V tanpa merusaknya?

Jawab

Caranya adalah kita harus bisa mendapatkan tegangan 4 V dari tegangan 6 V. Setelah itu, tegangan 4 V yang diperoleh kita sambungkan ke alat. Untuk maksud tersebut kita menggunakan dua buah hambatan, yang dikenal sebagai pembagi tegangan. Rangkaian yang kita gunakan tampak pada **Gambar 3.17**



Gambar 3.17 Rangkaian pembagi tegangan

Bab 3 Listrik Arus Searah

Arus yang mengalir pada hambatan R_1 dan R_2 sama besar, yaitu

$$I = \varepsilon / (R_1 + R_2)$$

Tegangan antara titik a dan b adalah

$$\begin{aligned} V_{ab} &= I R_2 = \frac{\varepsilon}{R_1 + R_2} \times R_2 \\ &= \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times \varepsilon \end{aligned}$$

Agar diperoleh tegangan 4 V dari sumber tegangan 6 V maka $V_{ab} = 4$ V sehingga persamaan di atas menjadi

$$4 = R_2 / (R_1 + R_2) \times 6$$

atau

$$(R_1 + R_2) / R_2 = 6 / 4$$

yang menghasilkan

$$R_1 = 6R_2 / 4 - R_2 = R_2 / 2$$

Jadi, kita perlu memasang dua buah hambatan dengan hambatan R_1 setengah kali hambatan R_2 . Contohnya, $R_1 = 10 \Omega$ dan $R_2 = 20 \Omega$.

Hambatan Paralel

Berikutnya kita bahas hambatan-hambatan yang disusun secara paralel seperti diilustrasikan pada **Gambar 3.18**. Arus total yang mengalir adalah I . Ketika memasuki hambatan-hambatan, arus tersebut terbagi atas tiga jalur sehingga berdasarkan hukum Kirchoff I terpenuhi

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \tag{3.21}$$

Beda potensial antar ujung-ujung hambatan semuanya sama, yaitu V_{ab} . Jika hambatan total adalah R maka

Bab 3 Listrik Arus Searah

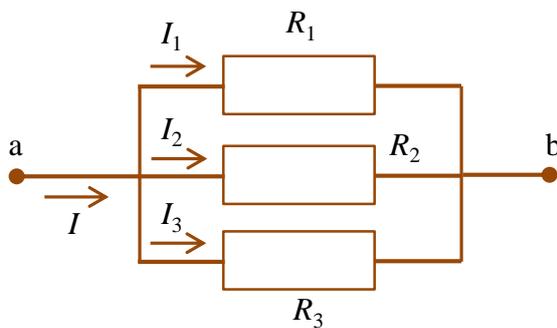
$$I = \frac{V_{ab}}{R}$$

Karena beda potensial antar ujung hambatan R_1 , R_2 , dan R_3 juga V_{ab} maka

$$I_1 = \frac{V_{ab}}{R_1}$$

$$I_2 = \frac{V_{ab}}{R_2}$$

$$I_3 = \frac{V_{ab}}{R_3}$$



Gambar 3.18 Menentukan hambatan pengganti untuk sejumlah hambatan yang disusun secara parallel.

Substitusi semua ungkapan arus ke dalam persamaan (3.21) diperoleh

$$\frac{V_{ab}}{R} = \frac{V_{ab}}{R_1} + \frac{V_{ab}}{R_2} + \frac{V_{ab}}{R_3}$$

Hilangkan V_{ab} pada kedua ruas maka kita peroleh hambatan total yang memenuhi

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (3.22)$$

Contoh 3.7

(a) Tentukan hambatan pengganti dari empat hambatan yang disusun secara parallel, $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 4 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 8 \text{ k}\Omega$, dan $R_4 = 5 \text{ k}\Omega$.

Bab 3 Listrik Arus Searah

- (b) Jika benda tengan yang dipasang antar ujung-ujung hambatan adalah 50 V, tentukan arus yang mengalir pada masing-masing hambatan.

Jawab

- (a) Hambatan pengganti memenuhi
(b)

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}$$

$$= \frac{1}{1} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \frac{1}{5} = \frac{40}{40} + \frac{10}{40} + \frac{5}{40} + \frac{8}{40} = \frac{63}{40}$$

atau

$$R = 40/63 = 0,635 \text{ k}\Omega = 635 \Omega$$

- (b) Arus yang mengalir pada masing-masing hambatan

$$\text{Hambatan } R_1: I_1 = V/R_1 = 50/1000 = 0,05 \text{ A}$$

$$\text{Hambatan } R_2: I_2 = V/R_2 = 50/5000 = 0,0125 \text{ A}$$

$$\text{Hambatan } R_3: I_3 = V/R_3 = 50/8000 = 0,00625 \text{ A}$$

$$\text{Hambatan } R_4: I_4 = V/R_4 = 50/5000 = 0,01 \text{ A}$$

Mengapa Kita Perlu Belajar Persamaan Rangkaian Resistor?

Coba perhatikan rangkaian elektronika yang sudah disolder di atas PCB. Mungkin akan kalian temukan sejumlah resistor yang disolder berdekatan. Bisa saja, pada awalnya, pembuat rangkaian tidak bermaksud menggunakan banyak resistor di situ. Itu “keterpaksaan” saja karena nilai hambatan yang ia butuhkan tidak dijual di pasar. Pabrik tidak membuat semua nilai hambatan. Kalau ini dilakukan maka jumlah resistor akan menjadi tak berhingga (semua nilai hambatan dari 0 sampai tak berhingga adalah tak berhingga bukan?). Pabrik hanya membuat resistor dengan hambatan tertentu saja.

Masalah muncul ketika kita butuh hambatan yang tidak dibuat pabrik. Apa yang harus dilakukan? Tidak ada jalan lain kecuali membeli resistor yang ada di pasar lalu merangkai sedemikian rupa sehingga menghasilkan hambatan yang diinginkan. Nah, di sinilah perlunya memahami persamaan hambatan untuk rangkaian resistor. Bentuk dasarnya adalah persamaan susunan seri dan parallel atau kombinasi keduanya.

Kembali ke rangkaian di atas, bisa saja perancang menggunakan

Bab 3 Listrik Arus Searah

jejeran resistor karena dia tidak mendapatkan di pasar nilai hambatan yang dia inginkan. Apa boleh buat.

Kemudian, dalam pembuatan alat ukur yang sangat presisi para ahli instrumentasi memerlukan komponen yang nilainya presisi juga. Namun tidak ada resistor yang presisi. Kebanyakan resistor dijual dengan toleransi 5%. Artinya jika ditulis hambatannya 10.000 ohm maka hambatan sebenarnya berada di antara 9.500 ohm sampai 10.500 ohm. Berapa tepatnya, wallahu alam. Resistor yang lebih mahal memiliki toleransi 1%. Artinya, nilai hambatan di atas berada antara nilai 9.900 ohm sampai 10.100 ohm.

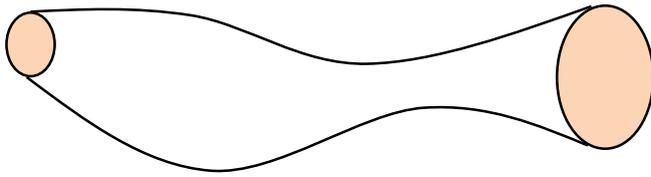
Bagaimana kalau kita butuh hambatan yang tepat 10.000 ohm, sedangkan tidak ada pabrik yang membuatnya? Maka yang dilakukan adalah kembali memanfaatkan persamaan rangkaian resistor. Salah satu cara adalah menghubungkan secara seri sebuah resistor yang lebih kecil dari 10.000 ohm dengan sebuah potensiometer. Setelah dihubungkan, nilai potensiometer dinaikkan pelan-pelan sambil dilakukan pengukuran secara teliti sehingga diperoleh nilai hambatan tepat 10.000 ohm. Biasanya potensiometer yang digunakan adalah potensiometer kecil yang sering disebut trimmer. Kalau kalian lihat ada trimmer dalam rangkaian, bisa jadi komponen tersebut berfungsi untuk meng-eksak-kan nilai hambatan.

Jadi, tidak ada alasan untuk menghindar atau bosan dengan persamaan rangkaian resistor yang kelihatan sederhana itu. Itu adalah rangkaian dasar elektronika modern. Bahkan rangkaian elektronika yang paling rumit sekalipun, dapat dipandang sebagai resistor yang terhubung seri, parallel, atau kombinasi.

3.12 Hambatan batang dengan penampang tidak konstan

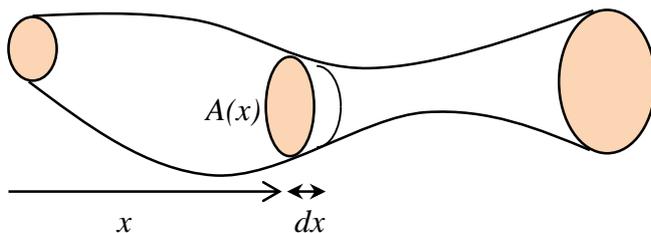
Kita sudah membahas metode menghitung hambatan batang dengan panjang tertentu dan luas penampang tertentu. Rumusnya sangat sederhana, yaitu diberikan oleh persamaan (3.6) Pertanyaan berikutnya adalah bagaimana kalau penampang batang tidak konstan, tetapi berubah-ubah menurut posisi? **Gambar 3.19** adalah ilustrasi batang dengan penampang tidak konstan. Bagaimana menghitung hambatan batang tersebut?

Bab 3 Listrik Arus Searah



Gambar 3.19 Contoh batang dengan penampang tidak konstan. Hambatan jenis batang adalah ρ . Bagaimana menentukan hambatan antara dua ujung batang?

Untuk menentukan hambatan antara dua ujung batang kita gunakan metode integral. Kita bagi batang atas potongan-potongan pendek. Tiap potongan dapat dianggap memiliki luas penampang konstan (karena ukuran potongan yang sangat pendek). Sebagai ilustrasi lihat **Gambar 3.20**. Batang sendiri dapat dipandang sebagai susunan seri hambatan potongan-potongan tersebut.



Gambar 3.20 Batang dibagi atas potongan-potongan yang sangat pendek. Tiap potongan dapat dipandang sebagai sebuah batang pendek dengan luas penampang konstan. Batang sendiri dipandang sebagai susunan serial dari potongan-potongan tersebut.

Misalkan sumbu batang ditempatkan sejajar sumbu x . Misalkan pula ujung kiri batang berada pada koordinat $x = 0$. Dan misalkan luas penampang batang memenuhi fungsi $A(x)$. Lihat potongan sepanjang dx yang berjarak x dari ujung kiri batang. Panjang potongan tersebut adalah dx dan luas penampangnya adalah $A(x)$. Dengan demikian, hambatan potongan tersebut adalah

$$dR = \rho \frac{dx}{A(x)}$$

Karena batang dapat dipandang sebagai susunan seri potongan-potongan tersebut maka hambatan batang sama dengan jumlah hambatan semua

Bab 3 Listrik Arus Searah

potongan. Karena jumlah potongan ada tak berhingga maka penjumlahan dilakukan dengan integral. Dengan demikian hambatan batang adalah

$$R = \int_0^L \rho \frac{dx}{A(x)} \quad (3.23)$$

Contoh 3.8

Misalkan batang sepanjang L memiliki luas penampang yang bergantung pada x berdasarkan fungsi $A(x) = a + bx$, dengan a dan b adalah konstanta. Ujung kiri batang berada pada koordinat $x = 0$ dan ujung kanan berada pada koordinat $x = L$. Berapakah hambatan batang jika hambatan jenisnya adalah ρ ?

Jawab

Kita menggunakan persamaan (3.23)

$$R = \int_0^L \rho \frac{dx}{A(x)}$$

$$= \int_0^L \rho \frac{dx}{a + bx}$$

$$= \rho \int_0^L \frac{dx}{a + bx}$$

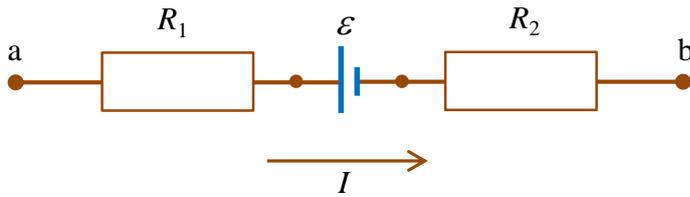
$$= \frac{\rho}{b} \ln(a + bx) \Big|_0^L$$

$$= \frac{\rho}{b} \ln\left(\frac{a + bL}{a}\right)$$

3.13 Rangkaian yang mengandung hambatan dan sumber tegangan

Dalam rangkaian listrik, kadang kita jumpai sejumlah hambatan dan sejumlah sumber tegangan seperti pada **Gambar 3.21**. Bagaimana menentukan arus yang mengalir

Bab 3 Listrik Arus Searah



Gambar 3.21 Contoh rangkaian yang mengandung hambatan dan sumber tegangan

Rumus yang menghubungkan besar arus yang mengalir dan besarnya hambatan serta tegangan adalah

$$V_{ab} = \sum_a^b IR - \sum_a^b \mathcal{E} \quad (3.24)$$

di mana

V_{ab} adalah beda potensial antara ujung-ujung rangkaian,

$\sum_a^b IR$ adalah jumlah perkalian arus dan hambatan sepanjang rangkaian antara titik a dan b, dan

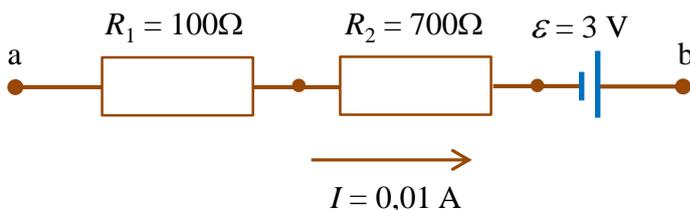
$\sum_a^b \mathcal{E}$ adalah jumlah tegangan yang dipasang sepanjang rangkaian antara titik a dan b.

Persamaan (3.24) diterapkan dengan perjanjian:

- i) I diberi harga positif jika mengalir dari a ke b
- ii) \mathcal{E} diberi harga positif jika kutub negatif sumber tegangan menghadap titik a dan kutub positif menghadap titik b.

Contoh 3.9

Perhatikan rangkaian pada **Gambar 3.22**. Berapakan tegangan listrik antara titik a dan b?



Gambar 3.22 Gambar untuk Contoh 3.9

Bab 3 Listrik Arus Searah

Jawab

Arus I yang mengalir pada R_1 dan R_2 sama besar dan dalam rangkaian hanya terdapat satu sumber tegangan. Maka persamaan (3.27) dapat ditulis

$$V_{ab} = IR_1 + IR_2 - \varepsilon$$

Berdasarkan perjanjian:

I mengalir dari a ke b sehingga diberi harga positif: $I = 0,01$ A

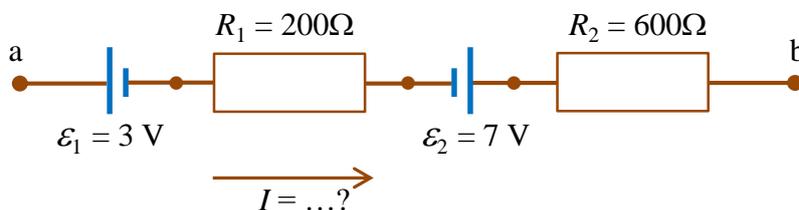
Kutub negatif ε menghadap titik a sehingga nilai ε diberi harga positif: $\varepsilon = +3$ V.

Jadi

$$V_{ab} = 0,01 \times 100 + 0,01 \times 700 - 3 = 1 + 7 - 3 = 5 \text{ V.}$$

Contoh 3.10

Berdasarkan **Gambar 3.23**, jika $V_{ab} = 5$ V, tentukan besar arus yang mengalir.



Gambar 3.23 Gambar untuk Contoh 3.10

Jawab

$$V_{ab} = \sum IR - \sum \varepsilon$$

$$V_{ab} = (IR_1 + IR_2) - (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$$

Berdasarkan perjanjian:

Kutub positif ε_1 menghadap titik a sehingga diberi harga negatif: $\varepsilon_1 = -3$ V

Kutub negatif ε_2 menghadap titik a sehingga diberi nilai positif: $\varepsilon_2 = +7$ V

Jadi

$$5 = I \times 200 + I \times 600 - (-3 + 7)$$

Bab 3 Listrik Arus Searah

$$5 = 800 I - 4$$

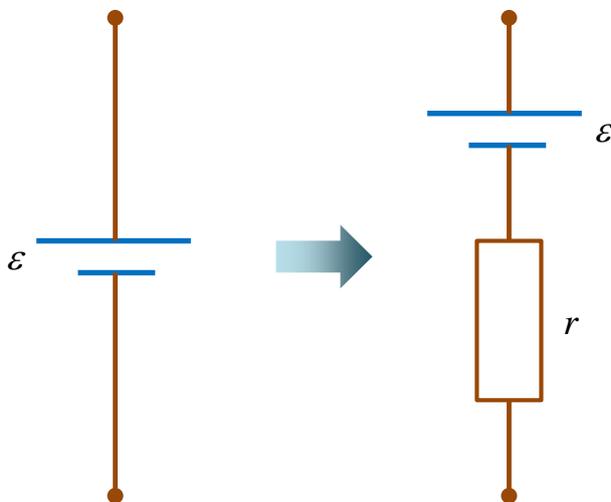
atau

$$I = 9/800 = 0,01125 \text{ A.}$$

3.14 Hambatan dalam sumber tegangan

Sumber tegangan seperti baterai dan aki sebenarnya juga memiliki hambatan. Ketika dipasang pada rangkaian maka hambatan di dalam rangkaian bukan hanya hambatan-hambatan yang dipasang, tetapi juga hambatan yang dimiliki sumber tegangan. Hambatan yang dimiliki sumber tegangan disebut **hambatan internal**. Sumber tegangan yang ideal adalah sumber tegangan yang hambatan dalamnya nol. Tetapi tidak ada sumber tegangan yang ideal. Sumber tegangan yang baik adalah sumber tegangan yang memiliki hambatan dalam sangat kecil.

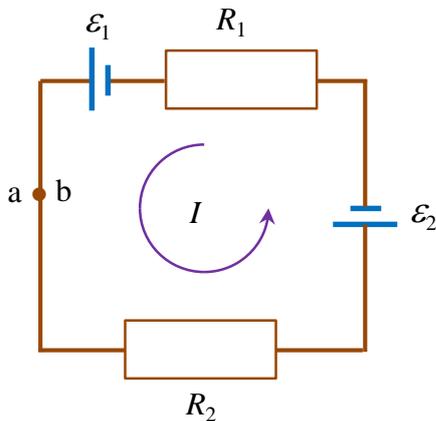
Untuk menentukan arus yang mengalir dalam rangkaian ketika dipasang sumber tegangan, maka sumber tegangan tersebut dapat digantikan dengan sebuah sumber tegangan ideal yang diseri dengan sebuah hambatan r seperti diilustrasikan pada **Gambar 3.24**. Hambatan r inilah yang disebut tahanan internal sumber tegangan.



Gambar 3.24 Sebuah sumber tegangan sembarang (a) dapat digantikan oleh sumber tegangan ideal yang diseri dengan sebuah hambatan dalam (b). Tidak ada sumber tegangan yang ideal. Semua sumber tegangan mengandung hambatan dalam dan besarnya nilai hambatan dalam bergantung pada sumber tegangan tersebut. Untuk baterai, hambatan dalam bisa meningkat dengan lama waktu pemakaian. Baterai baru memiliki hambatan dalam yang kecil sedangkan baterai lama memiliki hambatan dalam yang besar. Hal tersebut disebabkan karena perubahan sifat elektrolit dan elektroda dalam baterai setelah digunakan dalam jangka waktu yang lama.

3.15 Loop

Apa yang terjadi jika titik a dan b pada **Gambar 3.21** dihubungkan? Kita akan mendapatkan $V_{ab} = 0$ dan rangkaian menjadi tertutup. Rangkaian yang tertutup tersebut disebut loop. Contoh loop adalah **Gambar 3.25**.



Gambar 3.25 Contoh loop sederhana yang disusun oleh dua sumber tegangan dan dua hambatan. Jumlah komponen dalam suatu loop dapat berapa saja dan arah kutub sumber tegangan bisa sembarang.

Karena $V_{ab} = 0$ maka khusus untuk loop, persamaan (3.24) menjadi

$$\sum I R - \sum \varepsilon = 0 \quad (3.25)$$

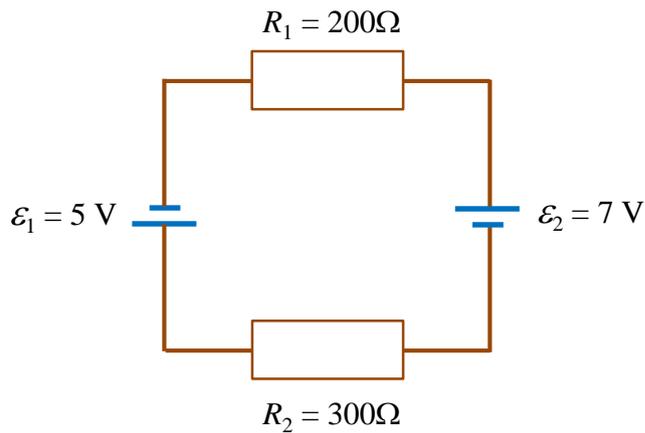
Contoh 3.11

Tentukan arus yang mengalir pada rangkaian **Gambar 3.26** jika sumber tegangan dianggap tidak memiliki hambatan dalam. Tentukan pula arus yang mengalir jika sumber tegangan memiliki hambatan dalam 50Ω .

Jawab

Kita bisa menganggap arah arus sembarang dalam loop. Jika setelah dilakukan perhitungan diperoleh arus bernilai positif maka arah arus yang dipilih benar. Tetapi jika setelah dilakukan perhitungan diperoleh arus bernilai negatif maka arah arus yang dipilih berlawanan dengan arah sebenarnya, tetapi besarnya arus benar (tinggal membalik arah saja tanpa melakukan perhitungan ulang).

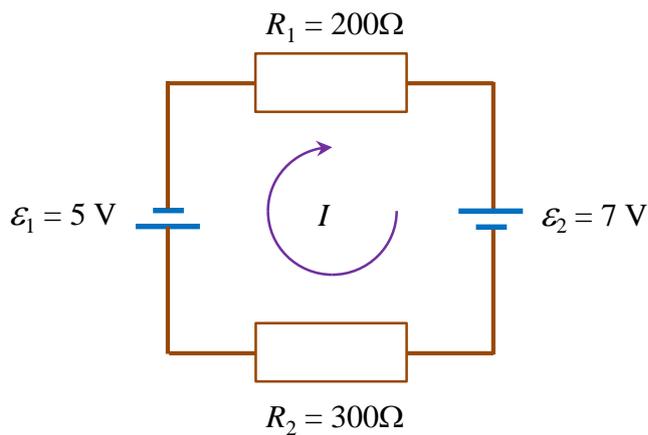
Bab 3 Listrik Arus Searah



Gambar 3.26 Gambar untuk Contoh 3.11

Untuk sumber tegangan yang tidak memiliki hambatan dalam.

Misalkan kita pilih arah arus seperti pada **Gambar 3.27**



Gambar 3.27 Jika sumber tegangan tidak memiliki hambatan dalam

$$\sum I R - \sum \varepsilon = 0$$

$$I R_1 + I R_2 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) = 0$$

Arus masuk ke ε_1 dari kutub negatif, maka ε_1 diberi harga positif: $\varepsilon_1 = +5$ V

Arus masuk ke ε_1 dari kutub positif, maka ε_2 diberi harga negatif: $\varepsilon_2 = -5$ V

Bab 3 Listrik Arus Searah

Dengan demikian

$$I \times 200 + I \times 300 - (5 - 7) = 0$$

$$500 I + 2 = 0$$

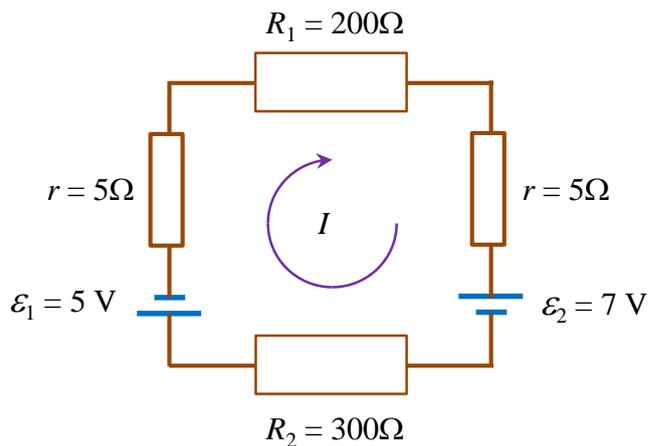
atau

$$I = -2/500 = -0,04 \text{ A}$$

Karena diperoleh arus berharga negatif, maka arah arus dalam rangkaian berlawanan dengan anak panah yang digambar. Jadi arus mengalir berlawanan dengan arah jarum jam dan besarnya 0,04 A.

Untuk sumber tegangan yang memiliki hambatan dalam.

Misalkan kita pilih arah arus seperti pada **Gambar 3.28**



Gambar 3.28 Sumber tegangan memiliki hambatan dalam. Hambatan dalam selalu disusun seri dengan sumber tegangan

$$\sum I R - \sum \varepsilon = 0$$

$$I R_1 + I R_2 + I r + I r - (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) = 0$$

$$I \times 200 + I \times 300 + I \times 50 + I \times 50 - (5 - 7) = 0$$

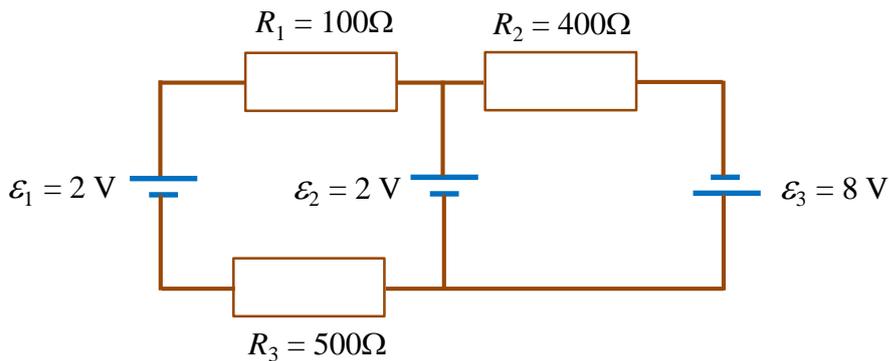
$$600 I + 2 = 0$$

atau

$$I = -2/600 = -0,003 \text{ A}$$

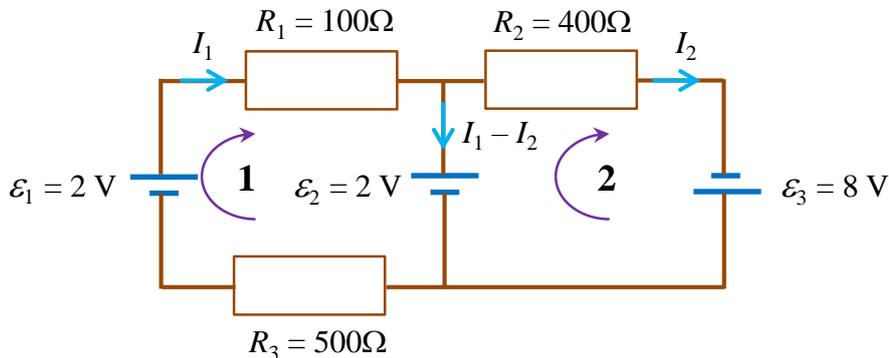
3.16 Rangkaian lebih dari satu loop

Jumlah loop dalam rangkaian tidak hanya satu, tetapi bisa banyak sekali. Sekarang kita bahas rangkaian yang terdiri dari dua loop. Prinsip yang digunakan sama dengan saat memecahkan persoalan satu loop. Hanya di sini akan muncul dua persamaan, karena ada dua arus yang harus dicari, yaitu arus yang mengalir pada masing-masing loop. Contohnya, kita tinjau rangkaian pada **Gambar 3.29**.



Gambar 3.29 Contoh rangkaian dua loop

Arus yang mengalir pada tiap loop bisa dipilih sembarang. Jika nanti diperoleh nilai positif maka arah yang dipilih sudah benar. Tetapi jika diperoleh nilai negatif, maka arah arus sebenarnya berlawanan dengan arah yang dipilih, tetapi besarnya sama. Misalkan kita pilih arah arus seperti pada **Gambar 3.30**



Gambar 3.30 Arah arus yang dipilih untuk loop pada Gambar 3.29 (catatan $e_2 = 4$)

Untuk loop 1 berlaku:

Bab 3 Listrik Arus Searah

$$\sum I R - \sum \varepsilon = 0$$

$$I_1 R_1 + I_1 R_3 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) = 0$$

Berdasarkan perjanjian untuk tanda sumber tegangan, maka dari **Gambar 3.30** kita peroleh $\varepsilon_1 = + 2V$ dan $\varepsilon_2 = - 4 V$. Dengan demikian,

$$I_1 \times 100 + I_1 \times 500 - (2 - 4) = 0$$

$$600 I_1 + 2 = 0$$

$$I_1 = -2/600 = 0,003 \text{ A}$$

Untuk loop 2 berlaku:

$$\sum I R - \sum \varepsilon = 0$$

$$I_2 R_2 - (\varepsilon_2 + \varepsilon_3) = 0$$

Berdasarkan perjanjian untuk tanda sumber tegangan maka dari **Gambar 3.30** kita peroleh $\varepsilon_2 = + 4V$ dan $\varepsilon_3 = + 8 V$. Dengan demikian

$$400 I_2 - (4 + 8) = 0$$

$$400 I_2 - 12 = 0$$

$$I_2 = 12/400 = 0,03 \text{ A}$$

Berdasarkan hasil di atas, arus yang mengalir pada loop kiri adalah 0,003 A dengan arah berlawanan dengan yang dilukiskan pada **Gambar 3.30**. Arus yang mengalir pada loop 2 adalah 0,03 A sesuai dengan arah yang dilukiskan pada **Gambar 3.30**.

Secara umum, rangkaian elektrok pada barang kebutuhan manusia seperti TV, tape recorder, radio, dan sebagainya terdiri dari banyak sekali loop. Loop yang ada biasanya sangat rumit dan besar arus serta tegangan pada bagian-bagiannya sulit diselesaikan secara sederhana seperti di atas. Loop yang dipelajari di Fisika Dasar umumnya sangat sederhana, sekedar untuk memberi pemahaman pada mahasiswa bagaimana metode penyelesaian persoalan arus listrik pada rangkaian. Metode tersebut tetap berlaku untuk loop bentuk apa pun, hanya langkah penyelesaian yang lebih panjang dan rumit. Tetapi, dengan adanya komputor yang makin canggih,

Bab 3 Listrik Arus Searah

kerumitan tersebut bukan masalah besar.

Persamaan umum banyak loop (dapat diloncat). Jika kita memiliki N buah loop maka ada N buah arus yang harus kita hitung. Dengan menerapkan persamaan Kirchoff berkali-kali maka kita dapatkan bentuk persamaan linier berikut ini

$$\begin{aligned} a_{11}I_1 + a_{12}I_2 + \dots + a_{1N}I_N &= E_1 \\ a_{21}I_1 + a_{22}I_2 + \dots + a_{2N}I_N &= E_2 \\ \dots & \\ a_{N1}I_1 + a_{N2}I_2 + \dots + a_{NN}I_N &= E_N \end{aligned} \quad (3.26)$$

di mana

A_{ij} adalah mempunyai satuan hambatan yang dapat merupakan satu hambatan tunggal atau operasi sejumlah hambatan, atau bisa saja nol.

I_j adalah arus afa loop ke- j yang akan kita hitung

E_j memiliki satuan tegangan yang dapat merupakan satu sumber tegangan tunggal atau penjumlahan atau pengurangan sejumlah sumber tegangan, atau bisa saja nol.

Persamaan (3.26) dapat ditulis dalam bentuk matrix sebagai berikut

$$AI = E$$

Dengan

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{N1} & a_{N2} & \dots & a_{NN} \end{pmatrix}$$

$$I = \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_N \end{pmatrix}$$

Bab 3 Listrik Arus Searah

$$E = \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_N \end{pmatrix}$$

Solusi untuk arus dapat diperoleh dengan melakukan perkalian ruas kiri dan kanan menggunakan invers matriks A, yaitu

$$A^{-1}(AI) = A^{-1}E$$

atau

$$I = A^{-1}E \quad (3.27)$$

Inverse suatu matriks dapat diperoleh dengan mudah menggunakan Excel seperti yang akan dibahas dalam contoh berikut ini.

Contoh 3.12

Selesaikan persoalan yang dibahas untuk rangkaian dua loop di atas menggunakan metode matriks.

Jawab

Kita sudah mendapatkan persamaan arus untuk loop pertama dan kedua sebagai berikut

$$I_1 R_1 + I_1 R_3 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) = 0$$

$$I_2 R_2 - (\varepsilon_2 + \varepsilon_3) = 0$$

Yang dapat ditulis ulang menjadi

$$(R_1 + R_3)I_1 + 0 \times I_2 = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$$

$$0 \times I_1 + R_2 I_2 = \varepsilon_2 + \varepsilon_3$$

Dari persamaan ini kita dapatkan

$$A = \begin{pmatrix} R_1 + R_3 & 0 \\ 0 & R_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 600 & 0 \\ 0 & 400 \end{pmatrix}$$

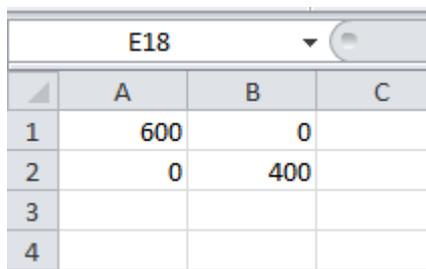
Dengan mengacu pada **Gambar 3.30** maka pada loop 1, $\varepsilon_1 = 2$ V dan $\varepsilon_2 = -4$

Bab 3 Listrik Arus Searah

V, pada loop $\varepsilon_2 = 4 \text{ V}$ dan $\varepsilon_3 = 8\text{V}$. dengan demikian

$$E = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \\ \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 - 4 \\ 4 + 8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2 \\ 12 \end{pmatrix}$$

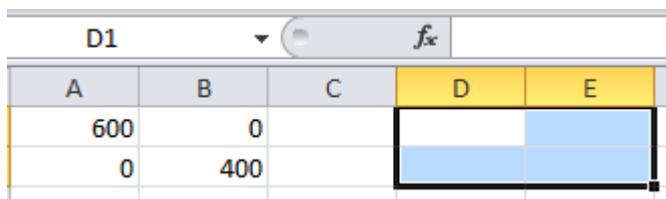
Untuk mencari solusi untuk I maka kita perlu mencari dahulu inverse dari matriks A. Kita dapat menentukan dengan mudah menggunakan Excel. Caranya, ketik elemen-elemen matriks pada excel. Misalkan kita masukkan elemen-elemen tersebut pada elemen A1 sampai B2 seperti pada **Gambar 3.31**.



	A	B	C
1	600	0	
2	0	400	
3			
4			

Gambar 3.31 Elemen-elemen matriks A

Untuk mencari invers matriks A, kita highlight sel kosong yang ukurannya sama dengan ukuran matriks A, yaitu 2×2 . Misalkan kita highlight sel D1 sampai D2 seperti pada **Gambar 3.32**. Sel kosong inilah yang akan digunakan untuk menempatkan elemen matriks inverse.



	A	B	C	D	E
1	600	0			
2	0	400			

Gambar 3.32 Highlight sel kosong untuk menempatkan matriks invers

Setelah dihighlight maka ketik persamaan **=MINVESRE(A1:A2)** seperti ditunjukkan pada **Gambar 3.33**. Kemudian silanjutkan dengan menekan secara serentak tombol **CTR+SHIFT+ENTER**. Akhirnya kita peroleh matriks inverse pada sel D1 sampai E2 seperti ditunjukkan pada **Gambar 3.34**. Jadi

Bab 3 Listrik Arus Searah

kita peroleh

$$A^{-1} = \begin{pmatrix} 0,001667 & 0 \\ 0 & 0,0025 \end{pmatrix}$$

	A	B	C	D	E	F
1	600	0		=MINVERSE(A1:B2)		
2	0	400				
3						

Gambar 3.33 Persamaan untuk menentukan matriks invers

	A	B	C	D	E
1	600	0		0.001667	0
2	0	400		0	0.0025
3					

Gambar 3.34 Matriks inverse dari A yang diperoleh terdapat di cell D1 sampai E2.

Setelah kita mendapatkan invers dari matrik A maka kita akan mengalikan invers tersebut dengan E untuk mendapatkan I. Caranya adalah mengisi elemen-elemen E ke dalam Excel. Misalkan kita isi pada cell G1 dan G2 seperti pada **Gambar 3.35**

C	D	E	F	G	H	I
	0.001667	0		-2		
	0	0.0025		12		
	invers dari A			E		

Gambar 3.35 Cell D1 sampai E2 adalah invers dari matriks A dan cell G1 sampai G2 adalah elemen matriks E.

Kita selanjutnya melakukan operasi matiks menggunakan Excel. Karena hasil perkalian menghasilkan matriks kolom dengan jumlah dua baris maka kita highlight satu kolom dengan dua baris utuk menempatkan hasil perkalian. Misalkan kita akan tempatkan hasil perkalian pada cell H1 sampai H2 seperti diilustrasikan pada **Gambar 3.36**.

Bab 3 Listrik Arus Searah

C	D	E	F	G	H	I
	0.001667	0		-2	=MMULT(D1:E2,G1:G2)	
	0	0.0025		12		
	invers dari A			E		

Gambar 3.36 Cell H1 dan H2 adalah tempat untuk melatakan hasil perkalian matiks.

Setelah highlight maka ketik persamaan **=MMULT(D1:E2,G1:G2)** yang dilanjutkan dengan menekan tombol **CTR+SHIFT+Enter** secara bersamaan sehingga diperoleh hasil paerkalian sepeti pada **Gambar 3.37**. Hari hasil ini kita simpulkan $I_1 = -0,00333$ A dan $I_2 = 0,03$ A, sama seperti yang diperoleh sebelumnya

C	D	E	F	G	H	I
	0.001667	0		-2	-0.00333	
	0	0.0025		12	0.03	
	invers dari A			E		

Gambar 3.37 Hasil perkalian invers matriks A dengan E tampak pada kolom H.

3.17 Jembatan Wheatstone

Salah satu roop yang cukup penting dalam fisika adalah rangkaian jembatan wheatstone. Rangkain ini sering digunakan sebagai sensor yang dapat mendeteksi arus yang cukup kecil. Rangkaian jembatan wheatstone diperlihatkan pada **Gambar 3.38**. Mari kita analisis sifat rangkaian ini. Untuk tujuan tersebut, kita misalkan aliran arus seperti pada **Gambar 3.39**.

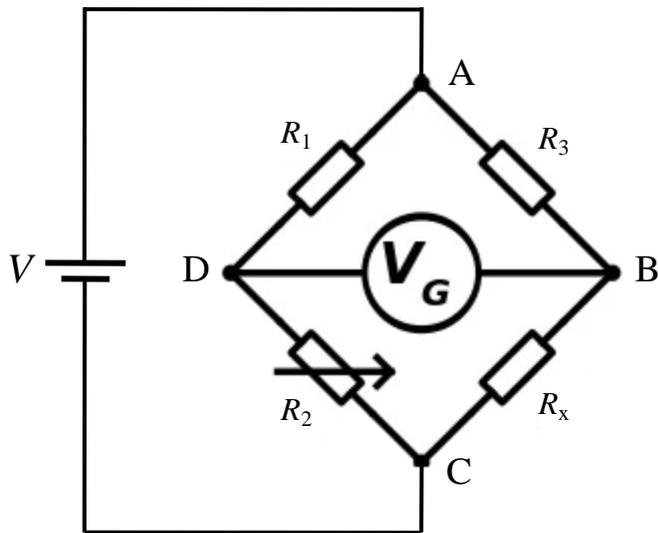
Kita gunakan hokum Kirchoff I di titik B dan titik D untuk menentukan hubungan antar arus. Di titik B berlaku

$$I_3 = I_G + I_x$$

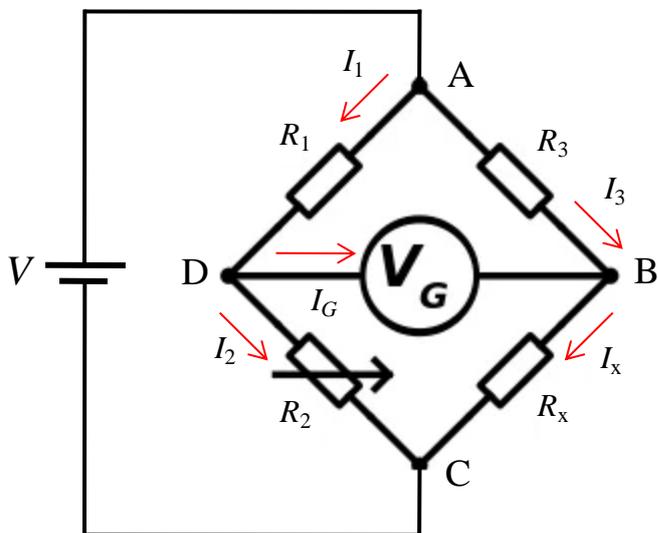
dan di titik D berlaku

Bab 3 Listrik Arus Searah

$$I_1 = I_2 + I_G$$



Gambar 3.38 Rangkaian jembatan Wheatstone



Gambar 3.39 Asumsi aliran arus dalam rangkaian

Kemudian kita gunakan hukum Kirchoff II pada loop atas dan bawah.
 Pada loop atas berlaku

$$I_3 R_3 - I_G R_G - I_1 R_1 = 0$$

Bab 3 Listrik Arus Searah

Dan pada loop bawah berlaku

$$I_x R_x - I_2 R_2 + I_G R_G = 0$$

Penggunaan jembatan Wheatstone biasa diatur sehingga arus yang mengalir melalui jembatan (arus yang mengalir dari titi D ke titik B) dibuat nol. Penola arus tersebut dilakukan dengan mengatur hambatan R_2 yang biasanya merupakan potensiometer. Hambatan R_2 diperbesar atau diperkecil sehingga arus yang mengalir pada jalur tersebut nol. Dalam kondisi setimbang tersebut maka dari hokum Kirchoff I kita peroleh $I_1 = I_2$ dan $I_3 = I_x$. Dan dari hokum Kirchoff II kita peroleh $I_3 R_3 - I_1 R_1 = 0$ dan $I_x R_x - I_2 R_2 = 0$, atau

$$I_3 R_3 = I_1 R_1$$

Dan

$$I_x R_x = I_2 R_2$$

Jika dua persamaan tersebut dibagi maka diperoleh

$$\frac{I_x R_x}{I_3 R_3} = \frac{I_2 R_2}{I_1 R_1}$$

Karena $I_1 = I_2$ dan $I_3 = I_x$ maka kita dapatkan

$$R_x = \frac{R_2 R_3}{R_1} \tag{3.28}$$

Apa makna persamaan (3.28)? Maknanya adalah kita dapat meenntukan nilai hambatan R_x menggunakan jembatan Wheatstone dengan mengatur arus yang mengalir pada jalur tengah sama dengan nol. Hambatan R_x hanya ditentukan oleh nilai hambatan R_1 , R_2 , dan R_3 .

Pertanyaan berikutnya adalah berapakah tegangan antara titik D dan B? Misalkan arus yang mengalir dari titik D ke titik B sangat kecil dan mkendekati nol maka kita tetap dapat melakukan aproksimasi $I_1 = I_2$ dan $I_3 = I_x$. Namun jika hambatan yang dimiliki VG sangat besar, maka meskipun arus yang mengalir dari titik D ke B sangat kecil, namun perkalian arus

Bab 3 Listrik Arus Searah

dengan hambatan V_G bisa cukup besar dan tidak dapat diabaikan. Untuk menentukan tegangan antara titik D dan B kita tulis ulang hukum Kirchoff II sebagai berikut. Pada loop bawah berlaku

$$I_x R_x - I_2 R_2 + V_G = 0$$

atau

$$V_G = I_2 R_2 - I_x R_x \quad (3.29)$$

Misalkan tegangan yang diterapkan adalah V_s (tegangan antara titik A dan C). dengan menggunakan hukum Kirchoff antara titik A dan C di jalur kiri kita peroleh

$$\begin{aligned} V_s &= I_1 R_1 + I_2 R_2 \\ &= I_2 (R_1 + R_2) \end{aligned}$$

atau

$$I_2 = \frac{V_s}{R_1 + R_2}$$

Dengan cara serupa, apabila kita terapkan hukum Kirchoff antara titik A dan C di jalur kanan kita peroleh

$$I_x = \frac{V_s}{R_3 + R_x}$$

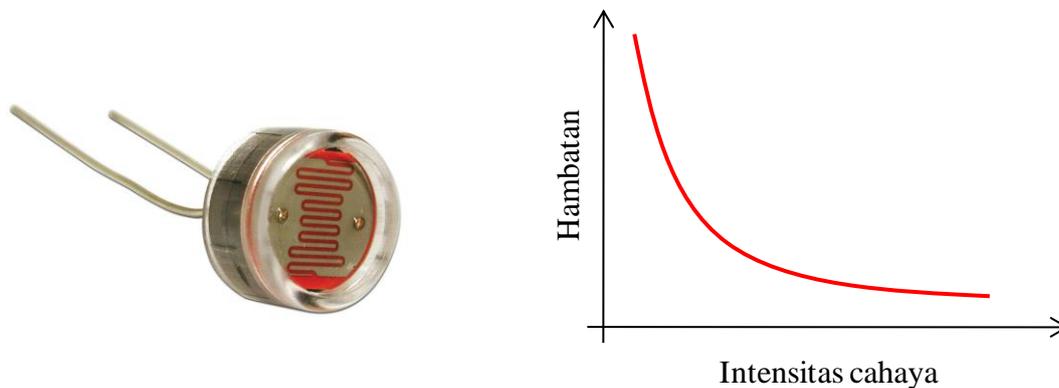
Substitusi kedua ungkapan arus di atas ke dalam persamaan (3.29) maka diperoleh

$$\begin{aligned} V_G &= \frac{V_s}{R_1 + R_2} R_2 - \frac{V_s}{R_3 + R_x} R_x \\ &= \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_x}{R_3 + R_x} \right) V_s \end{aligned} \quad (3.30)$$

Bab 3 Listrik Arus Searah

Tampak dari persamaan (3.30) bahwa jika hambatan R_x berubah-ubah maka tegangan V_G yang diukur berubah-ubah juga. Dengan demikian, jembatan Wheatstone dapat digunakan sebagai sensor, besaran fisis yang menghasilkan perubahan hambatan jika besaran fisis tersebut berubah. Sensor tersebut dipasang pada posisi R_x .

Contoh besaran fisis yang dapat diukur dengan jembatan Wheatstone adalah intensitas cahaya. Sebagai sensor kita gunakan komponen LDR (*light dependent resistor*). Komponen ini adalah sebuah hambatan yang nilai hambatannya bergantung pada intensitas cahaya yang jatuh padanya. Semakin tinggi intensitas cahaya yang jatuh maka hambatan yang dimiliki makin kecil. **Gambar 3.40** adalah contoh LDR serta contoh kurva hambatan sebagai fungsi intensitas cahaya. Komponen ini dipasang pada jembatan Wheatstone pada posisi R_x . Dengan berubahnya intensitas cahaya maka nilai R_x berubah sehingga mengubah nilai V_G . Berdasarkan nilai V_G tersebut maka nilai R_x diketahui dan dengan menggunakan kurva hubungan antara intensitas dan hambatan maka intensitas cahaya dapat ditentukan. Rangkaian ini dapat langsung dihubungkan dengan computer sehingga pengukuran dapat dilakukan secara otomatis dalam rentang waktu yang lama.

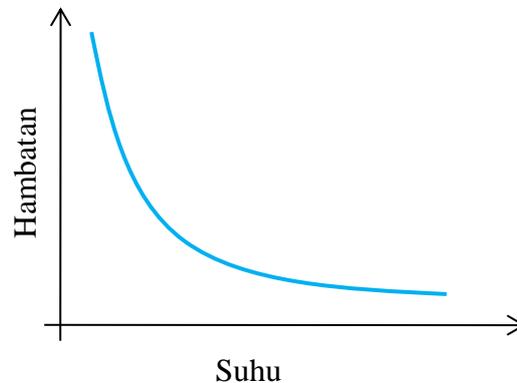
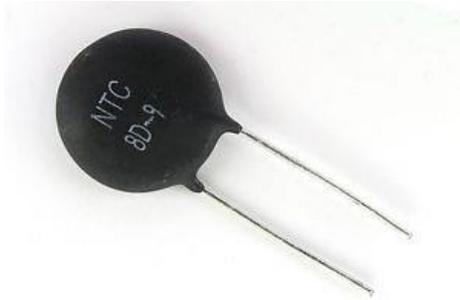


Gambar 3.40 (kiri) contoh LDR dan (kanan) contoh kurva hambatan sebagai fungsi intensitas cahaya

Aplikasi lain adalah untuk sensor suhu. Kita dapat menggunakan komponen yang namanya termistor. Komponen ini juga sebuah hambatan yang nilai hambatannya bergantung pada suhu. Nilai hambatan berkurang dengan bertambahnya suhu. **Gambar 3.41** adalah contoh termistor dan kurva hambatan sebagai fungsi suhu. Untuk mendeteksi suhu

Bab 3 Listrik Arus Searah

menggunakan jembatan wheatstone maka kita tempatkan termistor pada posisi Rx.



Gambar 3.41 (kiri) contoh termistor dan (kanan) contoh kurva hambatan sebagai fungsi suhu

3.18 Daya listrik

Jika arus listrik mengalir pada sebuah hambatan maka hambatan tersebut akan menjadi panas. Ini menunjukkan bahwa pada hambatan tersebut terjadi proses perubahan energi dari energi listrik menjadi energi panas. Pertanyaannya, berapakah energi listrik yang diubah menjadi panas per detik? Atau berapakah daya listrik yang diubah menjadi panas per detik pada suatu hambatan?

Mari kita tinjau arus yang mengalir melewati sebuah hambatan selama selang waktu Δt . Jumlah muatan yang mengalir selama waktu ini adalah $\Delta q = I\Delta t$. Arus mengalir dari satu ujung hambatan ke ujung lain yang memiliki beda potensial V . Dengan demikian, ketika muatan bergerak dari satu ujung hambatan ke ujung lainnya, muatan tersebut mendapat tambahan energi sebesar $\Delta U = \Delta qV$

Tambahan energi ini seharusnya menyebabkan energi kinetik muatan saat mencapai ujung kedua dari hambatan makin besar. Atau saat mencapai ujung kedua hambatan, kecepatan muatan makin besar sehingga arus di ujung kedua muatan juga makin besar. Tetapi, dalam rangkaian besar arus di ujung awal maupun ujung akhir hambatan sama. Ini berarti tambahan energi yang didapat muatan dibuang dalam bentuk panas sehingga energi kinetik muatan tidak berubah. Jadi, jumlah energi yang diubah menjadi panas adalah

$$\Delta Q = \Delta qV$$

Bab 3 Listrik Arus Searah

$$= I\Delta tV$$

Dengan demikian, daya yang dibuang pada hambatan adalah

$$\begin{aligned} P &= \frac{\Delta Q}{\Delta t} \\ &= IV \end{aligned} \tag{3.31}$$

Dengan menggunakan hukum Ohm $V = IR$ maka kita juga dapat menulis

$$P = I^2 R \tag{3.32}$$

Contoh 3.13

Lampu pijar 75 W, 220 V dihubungkan secara paralel dengan lampu pijar 40 W, 220 V. Berapakah hambatan total lampu? Berapa daya yang dihasilkan gabungan dua lampu jika dihubungkan dengan tegangan 110 V?

Jawab

Lampu pijar bekerja berdasarkan prinsip produksi panas pada kawat filamen. Kawat filamen memiliki hambatan yang cukup besar sehingga ketika dialiri arus listrik maka terjadi disipaya daya dalam bentuk panas dalam jumlah besar. Suhu filamen menjadi sangat tinggi (ribuan derajat celcius) sehingga filamen berpijar. Penulisan 75 W, 220 V artinya jika dihubungkan dengan tegangan 220 V maka lampu menghasilkan daya 75 W. Ini berarti, hambatan yang dimiliki kawat filamen memenuhi persamaan $R = V^2 / P$. Dengan demikian,

$$\text{Hambatan lampu pertama } R_1 = V^2/P_1 = 220^2/75 = 645 \Omega.$$

$$\text{Hambatan lampu kedua } R_2 = V^2/P_2 = 220^2/40 = 1\,210 \Omega.$$

Karena kedua lampu dihubungkan secara paralel maka filamen lampu membentuk susunan hambatan paralel. Hambatan total lampu, R memenjadi

$$1/R = 1/645 + 1/1\,210 = 0,00155 + 0,000826 = 0,002376$$

atau

$$R = 1/0,002376 = 421 \Omega$$

Karena lampu dihubungkan secara paralel maka tegangan antara dua

Bab 3 Listrik Arus Searah

ujung lampu sama. Dengan menghubungkan pada tegangan 110 V maka daya total gabungan dua lampu menjadi

$$P = \frac{V^2}{R}$$
$$= \frac{110^2}{421} = 28,7 \text{ W}$$

Contoh 3.14

Suatu loop mengandung sebuah baterai dengan tegangan 1,5 V dan sebuah hambatan dengan hambatan 2 k Ω . Anggaplah baterai memiliki hambatan dalam nol. (a) Berapakah arus yang mengalir dalam loop? (b) berapa daya listrik yang hilang pada hambatan? (c) Berapa daya listrik yang hilang pada baterai?

Jawab

(a) Arus yang mengalir dalam loop

$$I = \varepsilon / R = 1,5 / 2000 = 0,00075 \text{ A}$$

(b) daya listrik yang hilang pada hambatan

$$P = I^2 R = (0,00075)^2 \times 2000 = 0,0011 \text{ W}$$

(c) Daya listrik yang hilang pada baterai

$$P = \varepsilon I = 1,5 \times 0,00075 = 0,0011 \text{ W}$$

Kalian perhatikan bahwa daya yang hilang pada baterai sama dengan daya listrik yang diubah menjadi energi panas pada hambatan.

Contoh 3.15

Dua hambatan, ketika dihubungkan secara seri ke tegangan 110 V menghasilkan daya seperempat dari yang dihasilkan ketika kedua hambatan tersebut dihubungkan secara paralel. Jika hambatan satu hambatan 2,2 k Ω , berapakah hambatan hambatan yang lainnya?

Bab 3 Listrik Arus Searah

Jawab

Misalkan hambatan hambatan yang lain R maka:

i) Ketika dihubungkan seri, hambatan total adalah $R_s = R + 2200 \Omega$.

Daya yang dihasilkan $P_s = V^2/R_s$

ii) Ketika dihubungkan secara paralel maka hambatan total R_p memenuhi $1/R_p = 1/R + 1/2200 = (2200 + R)/2200R$ atau $R_p = 2200 R/(2200 + R)$. Daya yang dihasilkan $P_p = V^2/R_p$

Berdasarkan informasi soal $P_s = 1/4 P_p$ sehingga $V^2/R_s = (1/4) V^2/R_p$, atau $1/R_s = 1/4R_p$ atau

$$R_s = 4 R_p$$

$$R + 2200 = 4 \times 2200 R/(R + 2200)$$

$$(R + 2200)^2 = 8800 R$$

$$R^2 + 4400R + 4.840.000 = 8800 R$$

$$R^2 - 4400 R + 4.840.000 = 0$$

$$(R - 2200)^2 = 0$$

atau

$$R = 2200 \Omega$$

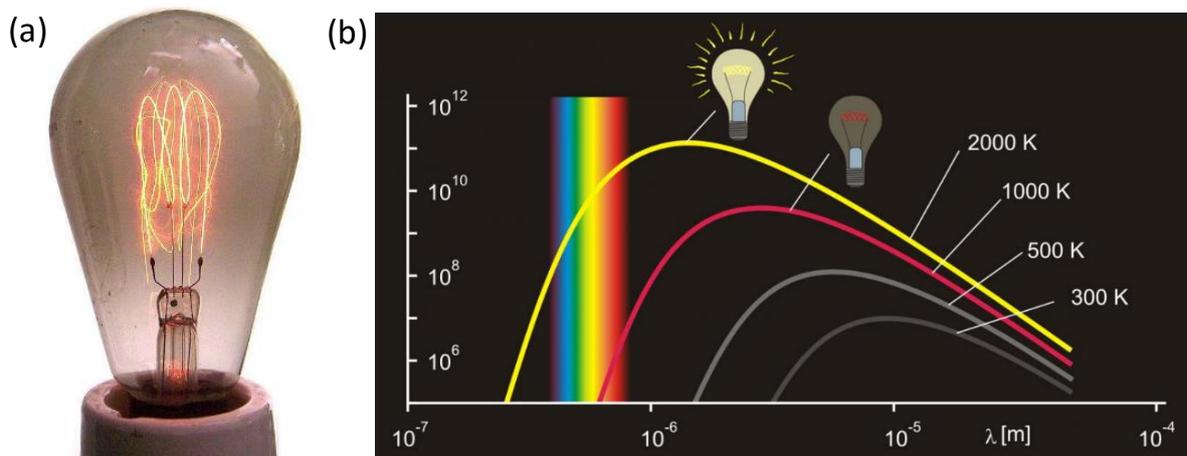
Jadi hambatan lain memiliki hambatan 2200Ω juga.

Bagaimana prinsip kerja lampu pijar. Kalau kita beli lampu pijar maka kita akan melihat filament tipis di dalamnya. Ada yang digulung dan ada yang dilewatkan berikot saja pada beberapa untai penyangga. Bagaimana prinsip kerja lampu pijar? Filamen lampu pijar adalah kawat yang memiliki hambatan cukup tinggi. Ketika digunungka dengan tegangan listrik, seperti tegangan listrik PLN, maka terjadi disipasi daya yang besar pada filament tersebut sehingga suhu filament meningkat tajam. Ketika suhu sudah mencapai di atas $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ maka filament mulai berpendar memancarkan cahaya (**Gambar 3.42**). Warna cahaya yang dipancarkan bergantung pada suhu yang dimiliki. Agar lampu pijar menghasilkan warna kuning seperti maka suhu filament harus

Bab 3 Listrik Arus Searah

sekitar 2000 °C. Ini adalah suhu yang sangat tinggi yang dapat membuat kebanyakan material meleleh. Pada suhu ini pun atom-atom gas akan terurai menjadi ion positif dan negative (electron lepas dari atom) sehingga gas berubah menjadi konduktor. Untuk menghindari terbentuknya gas yang bersifat konduktif maka ruang dalam lampu pijar divakumkan. Namun, filament lampu pijar terbuat dari material yang bisda bertahan pada suhu tersebut.

Pertanyaan kita adalah, berapakah hambatan filament dalam lampu pijar? Kita dapat menghitung dengan mudah dengan mengacu pada data tegangan dan daya yang dimiliki lampu. Misalkan pada lampu pijar tertulis tegangan 220 Volt dan data 50 Watt. Maka hambatan filament lampu pijar adalah $R = V^2/P = 220^2/50 = 968 \Omega$.



Gambar 3.42 (a) Contoh lampu pijar yang sedang menyala. Tampak filament berwarna kekuningan. (b) kurva intensitas cahaya yang dipancarkan lampu pijar dikaitkan dengan suhu filament (Science in School)

Saat ini lampu pijar mulai jarang digunakan karena tidak efisien. Sebagian energy listrik yang diberikan pada filament tidak semuanya berubah menjadi cahaya. Sebagian energy tersebut berubah menjadi panas. Kalau kita pegang lampu pijar yang telah menyala beberapa saat maka kita merasakan suhu lampu yang sangat tinggi. Teknologi sudah berkembang sangat pesat sejak Thomas Alfa Edison menemukan lampu pijar. Lampu hemat energy yang digunakan saat ini berbasis *light emitting diode* (LED). Energi listrik yang dialirkan ke LED sebagian besar berubah menjadi cahaya dan hanya sedikit yang menjadi panas. Dengan demikian

Bab 3 Listrik Arus Searah

LED sangat efisien. Di samping itu, LED dapat dijalankan dengan sumber tegangan listrik yang sangat kecil namun tetap menghasilkan cahaya yang terang. Hanya dengan menggunakan baterai maka kita dapat menghasilkan cahaya LED yang sangat terang. Dan karena sangat hemat maka satu baterai dapat menyalakan lampu LED beberapa jam.

Mengapa Kabel Listrik Berserabut?. Tampak dari persamaan (3.32) bahwa untuk memperkecil disipasi daya pada kabel maka hambatan listrik kabel harus diperkecil. Dengan mengacu pada persamaan (3.17) maka salah satu cara untuk mengurangi hambatan kabel adalah menggunakan material dengan hambatan jenis kecil seperti tembaga atau aluminium. Tetapi hambatan jenis material di alam sudah tertentu dan tidak dapat diubah kecuali melakukan rekayasa material. Rekayasa tersebut dapat berupa membuat material campuran atau material baru yang memiliki hambatan lebih kecil dari material yang ada di alam. Pendekatan yang lebih mudah adalah menggunakan kabel dengan luas penampang lebih besar. Makin besar luas penampang maka hambatan makin kecil. Namun cara ini akan mengalami kendala di lapangan. Kalau luas penampang besar maka kabel menjadi lebih kaku, bahkan sulit dibengkokkan. Kesulitan tersebut menyebabkan kabel sulit disambung atau dililit, padahal dalam sejumlah penerapan kabel, proses persambungan dan lilitan adalah kegiatan yang selalu muncul? Lalu bagaimana solusinya? Caranya adalah membuat kabel bentuk serabut, seperti diilustrasikan pada **Gambar 3.43** Kabel secara keseluruhan terdiri dari serabut dengan luas penampang kecil. Karena jumlah serabut banyak maka luas penampang total seluruh serabut menjadi besar sehingga hambatan kabel menjadi kecil. Namun, karena kabel merupakan kumpulan serabut maka kabel masih mudah untuk digulung atau dililit.

Transmisi melalui jaringan SUTET. Jaringan SUTET (saluran udara tegangan ekstra tinggi) umumnya digunakan untuk menyalurkan energi dengan daya besar. SUTET umumnya dipasang dari pembangkit tenaga listrik ke lokasi pemukiman. Kalau kalian melewati jalan tol Purbaleunyi maka akan mengamati sejumlah SUTET di atas jalan tol. Di sekitar tol Purbaleunyi terdapat dua PLTA besar, yaitu Jatiluhur dan Cirata yang berada di sungai Citarum. Dua PLTA tersebut berada di Kabupaten Purwakarta, Jawa Barat .

Bab 3 Listrik Arus Searah

PLTA lain yang juga berada di sungai Citarum adalah PLTA Saguling yang berlokasi di Kabupaten Bandung Barat, Jawa Barat. Tegangan listrik pada SUTET dapat mencapai 250.000 volt. Pertanyaannya adalah, mengapa listrik tersebut ditransmisikan melalui tegangan yang tinggi, bukan melalui arus yang tinggi?



Gambar 3.43 Contoh kabel listrik berserabut agar memudahkan pelengkungan atau pelilitan (www.wykop.pl)

Pembangkit listrik menghasilkan daya listrik tertentu. Contohnya, PLTA Jatuluhur menghasilkan daya 187 MW, PLTA Saguling dan Cirata masing-masing menghasilkan daya 700 MW dan 1.008 MW. Jika energi listrik ditransmisikan pada tegangan V maka arus listrik yang mengalir adalah $I = P/V$. Tampak bahwa arus listrik yang ditransmisikan berbanding terbalik dengan tegangan transmisi. Dengan menggunakan tegangan transmisi ratusan kilovolt maka arus yang dihasilkan menjadi sangat kecil.

Jalur transmisi memiliki hambatan tertentu. Dengan mengingat persamaan (3.32) tampak bahwa daya yang terbuang dalam bentuk panas sepanjang jalur transmisi berbanding lurus dengan kuadrat arus transmisi. Akibatnya, dengan memperkecil arus transmisi akibat menggunakan tegangan ekstra tinggi maka daya yang terbuang sepanjang jaringan menjadi minimum. Dengan

Bab 3 Listrik Arus Searah

perkataan lain, menggunakan tegangan transmisi tinggi akan meningkatkan efisiensi transmisi daya.

Furnace. Furnace adalah alat pemanas suhu tinggi. Suhu yang dihasilkan furnace bisa di atas 1000 °C. Bagaimana menghasilkan suhu sebesar itu?

Prinsipnya adalah menggunakan material yang memiliki hambatan sangat besar. Material tersebut dialiri arus listrik yang sangat besar sehingga dihasilkan panas yang besar pula. Panas yang dihasilkan harus sedikit mungkin mengalir ke udara sekitar sehingga yang dipanasi hanya ruang dalam furnace. Oleh karena itu dinding furnace terbuat dari material yang sangat sulit dilewati panas dan biasanya sangat tebal. Energi yang dihasilkan hambatan semata-mata digunakan untuk memanaskan udara dalam ruang furnace.

Suhu hambatan penghasil panas lebih tinggi lagi daripada suhu ruang dalam furnace. Oleh karena itu, material yang dipanasi di samping memiliki hambatan listrik besar juga harus memiliki ketahanan yang besar terhadap panas (tidak mudah rusak oleh pemanasan pada suhu tinggi). Apalagi pemanasan furnace dilakukan berulang-ulang sehingga hambatan penghasil panas berulang-ulang berada pada suhu rendah dan suhu sangat tinggi. Dalam kondisi seperti itu kebanyakan material akan cepat rusak. Maka hambatan elemen pemanas furnace harus berupa material khusus. Contoh material seperti itu adalah silicon carbide (SiC). Material ini dibentuk oleh atom silicon dan karbon memiliki ketahanan termal sangat tinggi. Hambatan jenis SiC adalah ****.

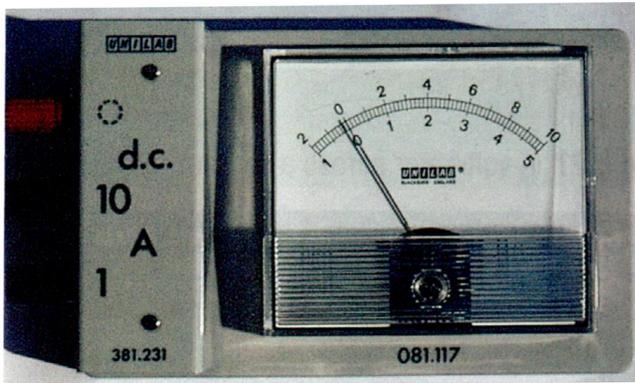
3.19 Pengukuran arus listrik

Berapa besar arus listrik yang mengalir dalam suatu rangkaian dapat diukur dengan alat yang namanya galvanometer atau amperemeter. **Gambar 3.44** adalah contoh amperemeter analog. Amperemeter analog menggunakan jarum sebagai penunjuk arus yang diukur.

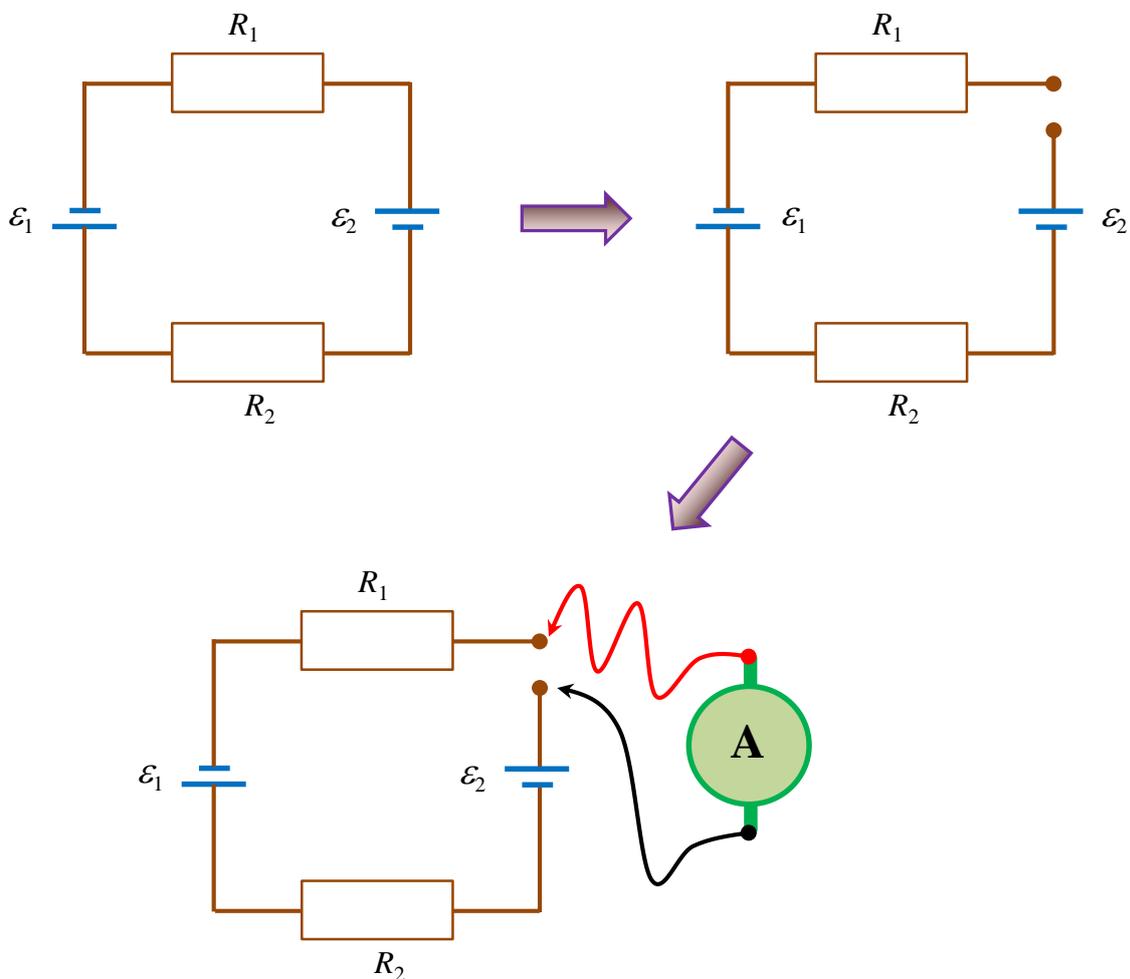
Untuk mengukur arus yang mengalir pada rangkaian, pertama-tama rangkaian harus diputus. Dua ujung kabel yang diputus dihubungkan ke dua terminal amperemeter sehingga arus mengalir ke dalam amperemeter. Proses tersebut diilustrasikan pada **Gambar 3.45**. Besarnya arus yang mengalir akan ditunjukkan oleh layar peraga amperemeter. Layar peraga tersebut dapat berupa jarum (untuk

Bab 3 Listrik Arus Searah

amperemeter analog) atau angka-angka (untuk amperemeter digital).



Gambar 3.44 Contoh amperemeter. Arus yang diukur ditunjukkan langsung oleh jarum.



Gambar 3.45 Tahap pengukuran arus dengan amperemeter. (a) rangkaian yang akan diukur arusnya. (b) rangkaian diputus dan (c) ujung rangkaian yang diputus dihubungkan ke terminal amperemeter.

Bab 3 Listrik Arus Searah

Yang perlu diperhatikan

Beberapa hal yang harus diperhatikan saat mengukur arus dengan amperemeter di antaranya

a) Amperemeter memiliki hambatan, walaupun sangat kecil. Ketika amperemeter dipasang untuk mengukur arus maka hambatan total rangkaian menjadi lebih besar sehingga arus yang mengalir sedikit berkurang. Jadi arus yang ditunjukkan oleh amperemeter sedikit lebih kecil daripada arus yang mengalir sebelum amperemeter dipasang. Namun:

i) Jika hambatan total dalam rangkaian cukup besar maka hambatan yang dimiliki amperemeter dapat diabaikan sehingga arus yang dibaca oleh amperemeter hampir sama dengan arus yang mengalir sebelum amperemeter dipasang.

ii) Jika hambatan total dalam rangkaian sangat kecil, maka pemasangan amperemeter dapat mengubah arus yang mengalir cukup signifikan. Arus yang dibaca amperemeter jauh lebih kecil daripada arus yang mengalir sebelum amperemeter dipasang.

b) Ada batas maksimum arus yang dapat diukur oleh amperemeter. Jika arus yang diukur melebihi batas maksimum tersebut, maka amperemeter dapat rusak dan terbakar. Untuk itu, sebelum melakukan pengukuran, kalian perkirakan dulu besarnya arus yang mengalir dalam rangkaian. Jika kalian yakin bahwa arus yang mengalir masih berada di bawah batas maksimum yang bisa diukur amperemeter, kalian dapat mengukur.

Mengukur arus yang melebihi batas maksimum kemampuan amperemeter

Bagaimana mengukur arus yang nilainya melebihi kemampuan pengukuran amperemeter? Kita dapat memasang hambatan “shunt” yang dipasang secara parallel dengan salah satu hambatan dalam rangkaian. Peranan hambatan ini adalah untuk membagi arus sehingga sebagian mengalir di hambatan shunt dan sebagian mengalir di hambatan dalam rangkaian amperemeter. Nilai hambatan shunt harus cukup kecil sehingga arus yang mengalir pada amperemeter lebih kecil dari arus maksimum yang dapat diukur amperemeter.

Tampak dari **Gambar 3.46** (b)

$$I = I_1 + I_2$$

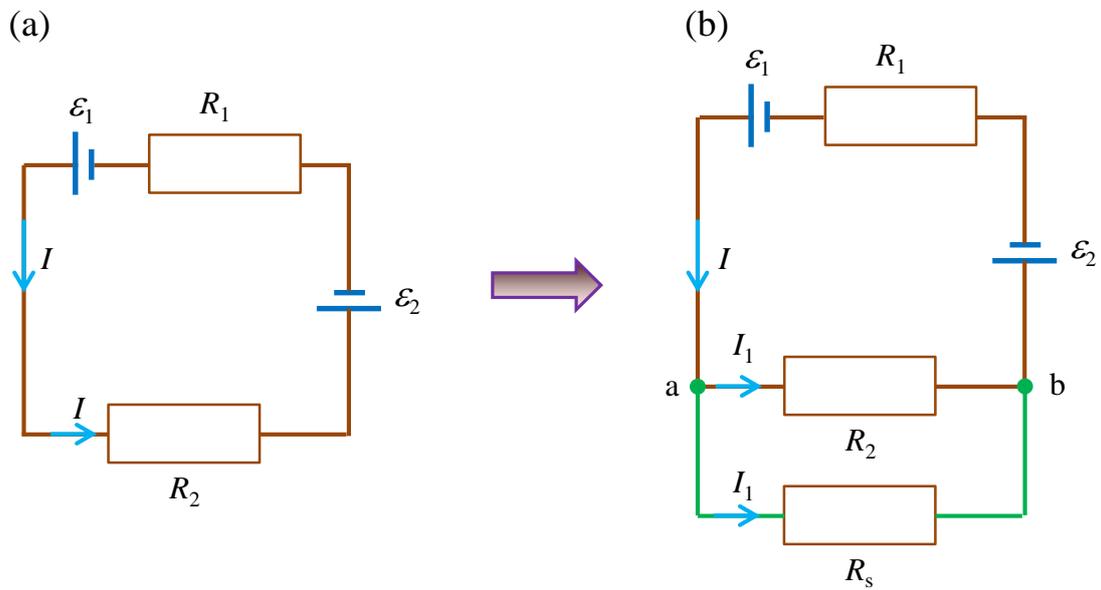
$$I_1 = V_{ab}/R_2$$

Bab 3 Listrik Arus Searah

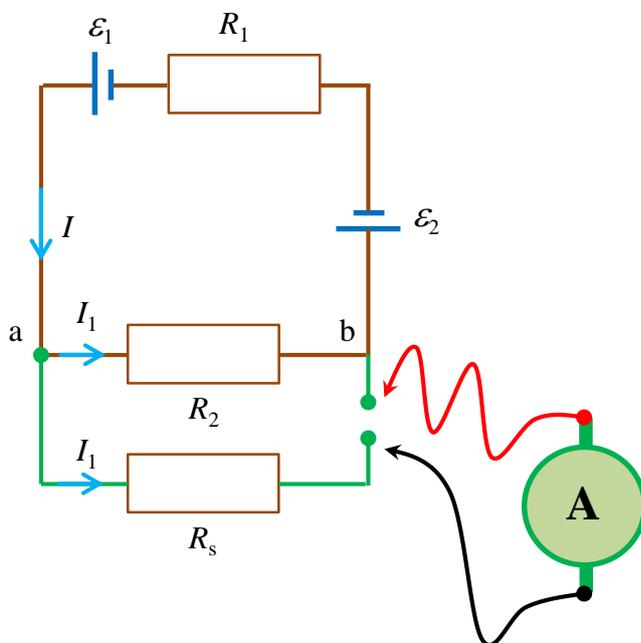
$$I_2 = V_{ab} / R_s, \text{ atau } V_{ab} = I_2 R_s$$

Jadi

$$I_1 = I_2 R_s / R_2$$



Gambar 3.46 (a) Rangkaian mula-mula dan (b) rangkaian setelah dipasang hambatan shunt.



Gambar 3.47 Teknik pengukuran arus yang melebihi kemampuan ukur amperemeter

Dan arus total menjadi

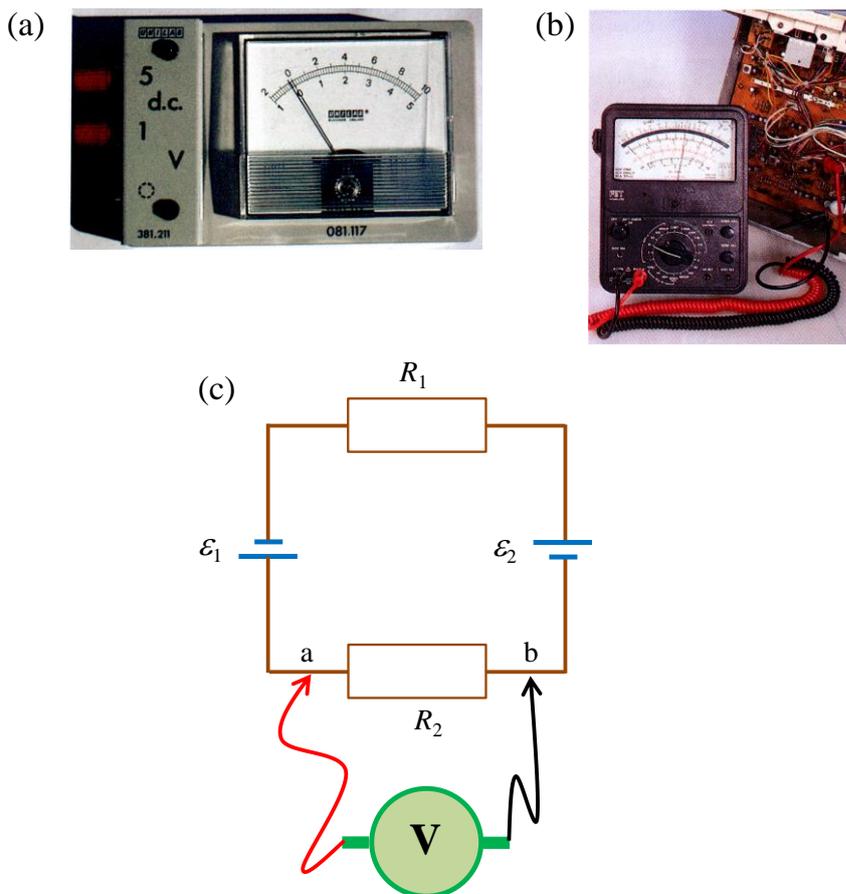
Bab 3 Listrik Arus Searah

$$I = I_2 R_s / R_2 + I_2 = (1 + R_s / R_2) I_2$$

Jadi, dengan mengukur I_2 maka nilai arus yang mengalir pada rangkaian semula dapat ditentukan. Pemasangan amperemeter pada saat pengukuran menjadi seperti pada **Gambar 3.47**

Mengukur beda potensial dua titik

Beda potensial antara dua titik dalam rangkaian dapat diukur dengan alat yang namanya voltmeter. Pengukuran beda potensial tidak perlu memutus rangkaian yang ada. Cukup menyentuhkan dua terminal voltmeter dengan dua titik yang akan diukur beda potensialnya seperti diilustrasikan pada **Gambar 3.48**. Beda potensial langsung terbaca pada layar voltmeter. Layar tersebut dapat berupa jarum (untuk voltmeter analog) atau angka-angka (voltmeter digital).

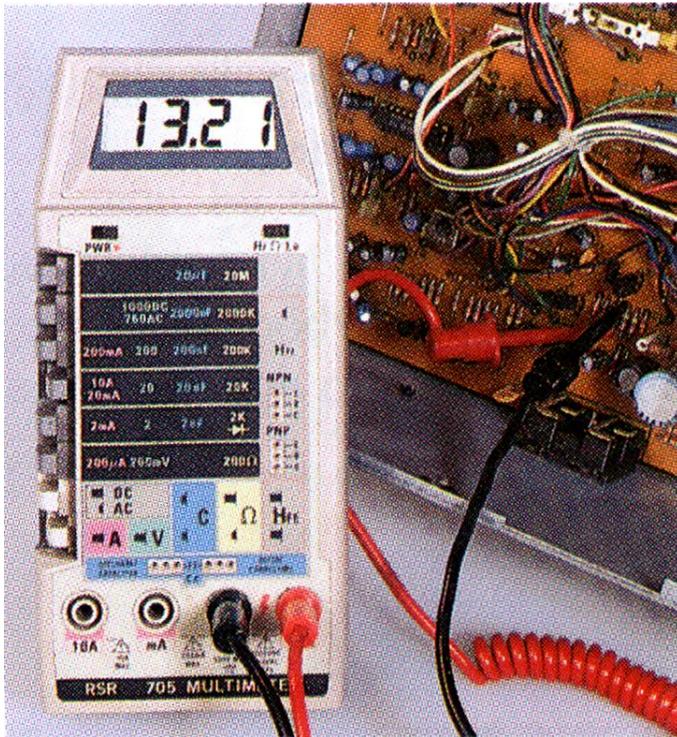


Gambar 3.48 (a) contoh voltmeter, (b) voltmeter sedang digunakan untuk mengukur beda potensial dua titik dalam rangkaian, (c) skema pemasangan voltmeter saat mengukur beda potensial antara dua titik (titik a dan b).

Bab 3 Listrik Arus Searah

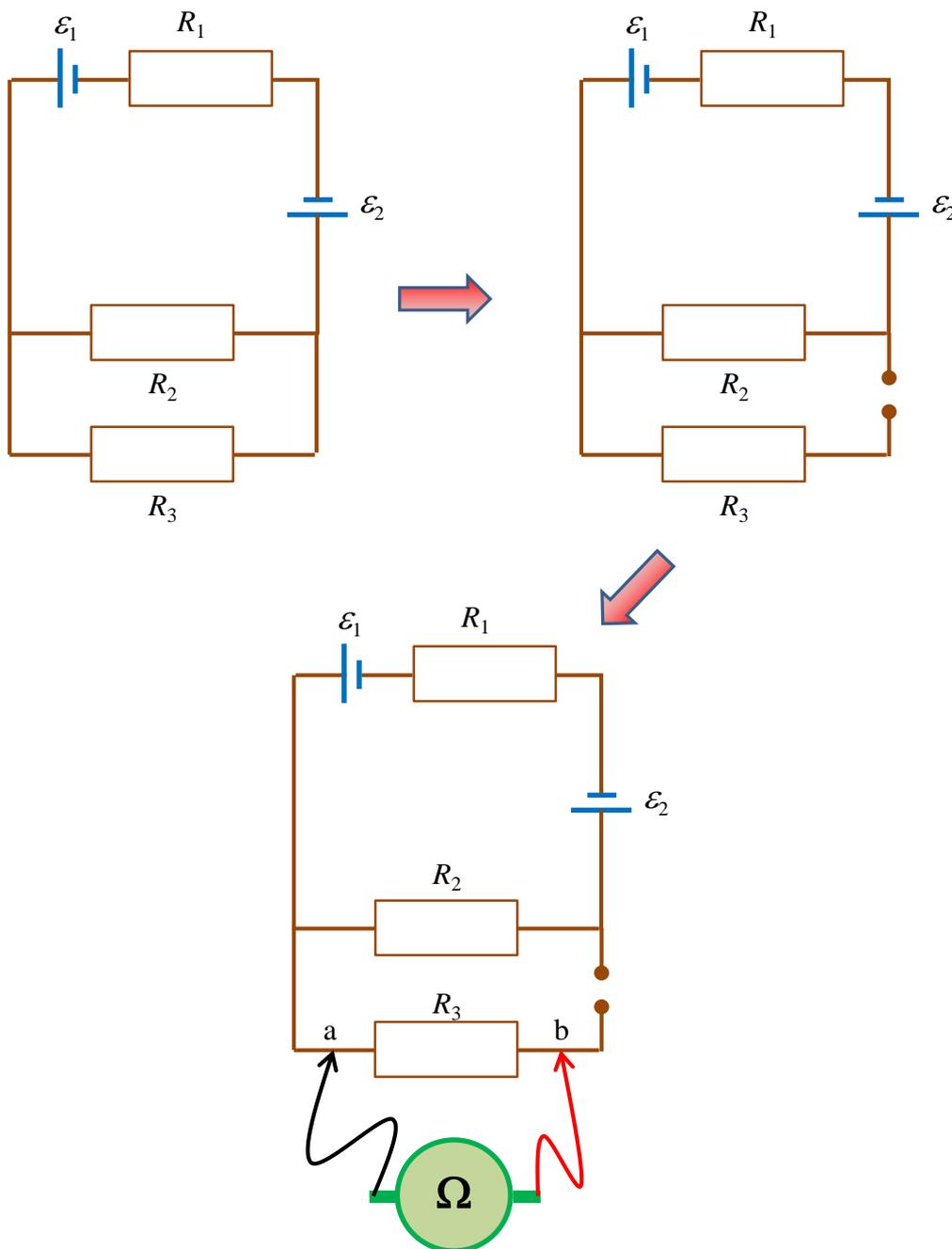
Mengukur Hambatan Listrik

Hambatan listrik suatu resistor atau antar dua titik dalam rangkaian dapat diukur secara langsung dengan alat yang namanya Ohmmeter. Pengukuran dilakukan dengan menyentuhkan dua terminal Ohmmeter dengan dua ujung hambatan atau dua titik dalam rangkaian yang akan diukur hambatannya seperti ditunjukkan pada **Gambar 3.49**.



Gambar 3.49 Mengukur hambatan listrik dalam rangkaian dengan multimeter digital

Tetapi harus diingat, saat mengukur hambatan, komponen atau dua titik dalam rangkaian yang akan diukur hambatannya harus diisolasi dari rangkaian lainnya. Jika akan mengukur nilai sebuah hambatan dalam rangkaian maka salah satu kaki hambatan tersebut harus dipotong dari rangkaian (**Gambar 3.50**). Hal yang sama dilakukan ketika mengukur hambatan antar dua titik dalam rangkaian. Salah satu titik diputus dari rangkaian induk baru dilakukan pengukuran.



Gambar 3.50 Tahapan pengukuran nilai hambatan suatu komponen dalam rangkaian dengan Ohmmeter. (a) rangkaian asal di mana nilai R_3 akan diukur, (b) salah satu kaki R_3 diputus hubungannya dengan rangkaian, (c) hambatan R_3 diukur dengan Ohmmeter.

3.20 Hambatan listrik lapisan Bumi

Bumi dibentuk oleh lapisan material yang berbeda-beda. Material tersebut memiliki hambatan listrik yang berbeda-beda pula. Mulai dari yang paling kecil seperti logam hingga yang paling besar seperti lempung. Nilai

Bab 3 Listrik Arus Searah

umum hambatan tanah berkisar antara 10 sampai 10000 Ω m. Jika kita dapat mengukur hambatan jenis material yang ada di sekitar permukaan bumi hingga masuk ke kedalaman beberapa ribu meter maka kita akan mengetahui material penyusun lapisan permukaan bumi, berada pada kedalaman berapa, dan volumenya berapa. Inilah salah satu dasar ilmu eksplorasi geofisika. Sebelum memulai melakukan penggalian tambang (eksploitasi) maka pengukuran kandungan barang tambang tersebut (eksplorasi) wajib dilakukan untuk menghindari kegagalan pengeboran. Karena pengeboran memerlukan biaya yang sangat besar maka kegagalan pengeboran akan menghasilkan kerugian yang besar pula. Dengan demikian, informasi yang akurat tentang material penyusunan lapisan di bawah tanah wajib dimiliki. Dan salah satunya adalah pengukuran hambatan jenis material di dalam tanah.

Pengukuran hambatan material tanah dilakukan dengan memasukkan arus listrik yang sangat besar ke dalam tanah lalu mengukur potensial listrik yang dihasilkan di sekitar aliran arus tersebut. Potensial yang terukur merepresentasikan hambatan jenis tanah. Makin besar potensial yang dihasilkan antara dua titik sekitar aliran arus maka makin besar hambatan yang dimiliki tanah (ingat, arus yang sama yang mengalir pada hambatan yang lebih besar akan menghasilkan tegangan yang lebih besar).

Gambar 3.51 adalah contoh para ahli eksplorasi sedang melakukan pengukuran hambatan listrik lapisan bumi. Pertanyaannya adalah bagaimana konstruksi pengukuran sehingga diperoleh informasi hambatan jenis tanah tersebut?

Saat ini, ada dua metode yang terkenal untuk mengukur hambatan jenis tanah menggunakan arus dc seperti yang dijelaskan di atas. Metode pertama adalah metode Wenner dan metode kedua adalah metode Schlumberger. Susunan elektroda masing-masing metode tersebut tampak pada **Gambar 3.52**. Tampak bahwa susunan elektroda pada kedua metode tersebut hampir sama. Elektroda penyuplai arus berada di sisi luar sedangkan elektroda pengukuran tegangan berada di sisi dalam. Perbedaan kedua metode tersebut hanya pada spasi antar elektroda. Pada metode Wenner, semua elektroda ditempatkan pada spasi yang sama, sedangkan pada metode Schlumberger, spasi antar elektroda ada yang berbeda, terutama jarak antar elektroda pengukur tegangan berbeda dengan jarak antara elektroda arus dan elektroda pengukur tegangan.

Bab 3 Listrik Arus Searah



Gambar 3.51 Para ahli sedang melakukan pengukuran hambatan listrik lapisan bumi (archive.epa.gov)

Dengan menggunakan susunan seperti pada **Gambar 3.52**(a) atau (b) maka profil aliran arus yang dihasilkan dalam permukaan bumi tampak pada **Gambar 3.53**. Dengan adanya aliran arus maka terbentuk pula garis-garis ekipotensial (garis yang memiliki potensial yang sama). Voltmeter mengukur beda potensial antara dua tempat yang memiliki garis ekipotensial yang berbeda.

Dengan susunan seperti pada **Gambar 3.52**(a) maka hambatan tanah yang diperoleh menggunakan metode Wenner memenuhi

$$\rho_B = \frac{4\pi a}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \left(\frac{V}{I} \right) \quad (3.33)$$

dengan

I : arus listrik yang diberikan

V : tegangan yang terukur

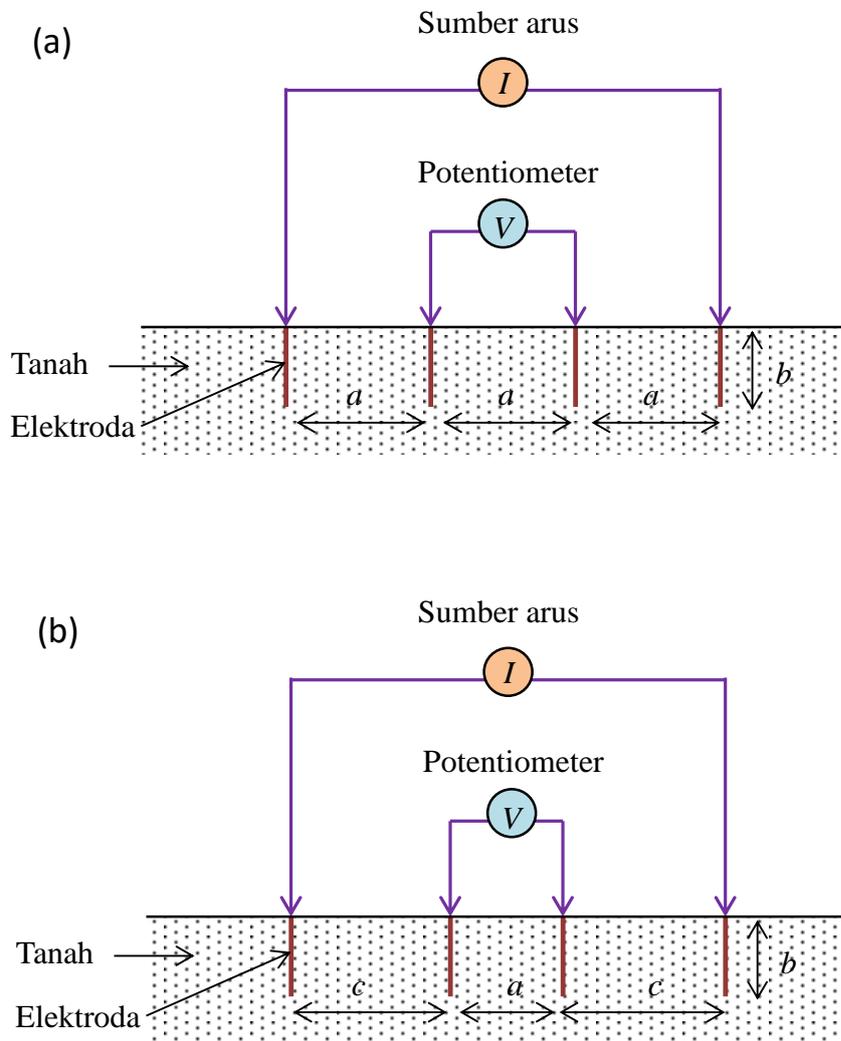
Bab 3 Listrik Arus Searah

a : spasi antar elektroda

b : panjang elektroda yang tertanam ke dalam tanah.

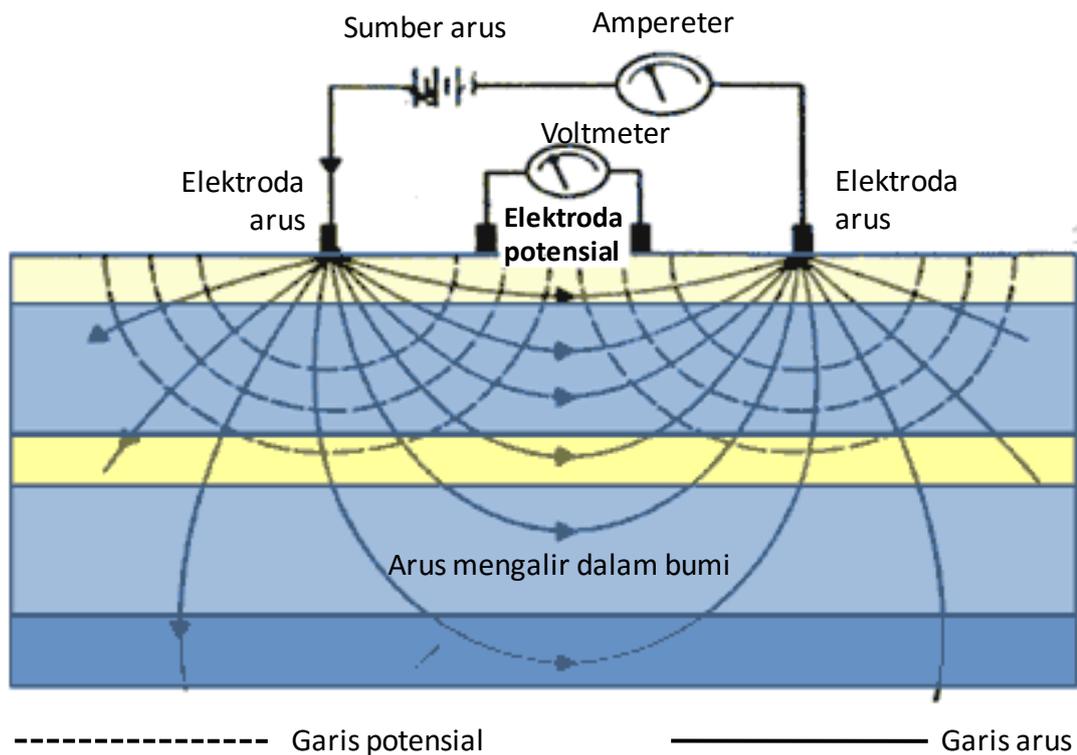
Persamaan di atas telah diturunkan dengan operasi matematika yang cukup panjang dan tidak perlu diturunkan kembali di sini. Kasus praktis ketika panjang elektroda jauh lebih kecil daripada spasi antara elektroda, atau $b \ll a$ maka hambatan bumi yang ditentukan dengan metode Wenner diaproksasi menjadi

$$\rho_B = 2\pi a \left(\frac{V}{I} \right) \quad (3.34)$$



Gambar 3.52 Susunan elektroda pada: (a) metode Wenner and (b) metode Schlumberger.

Bab 3 Listrik Arus Searah



Gambar 3.53 profil aliran arus yang dihasilkan dalam permukaan bumi serta garis ekipotensial (www.aquiferindia.org)

Dengan susunan seperti pada **Gambar 3.52(b)** maka hambatan tanah yang diperoleh menggunakan metode Schlumberger memenuhi

$$\rho_B = \pi \frac{c(c+a)}{a} \left(\frac{V}{I} \right) \quad (3.35)$$

dengan

I : arus listrik yang diberikan

V : tegangan yang terukur

a : spasi antar elektroda potensiometer

c : spasi elektroda arus dan elektroda potensiometer.

Pada persamaan di atas telah disumsikan bahwa panjang elektroda yang ditanam jauh lebih pendek daripada spasi antar elektroda. Jelas dari persamaan Schlumberger bahwa jika spasi antar elektroda semuanya sama maka $c = a$ sehingga persamaan Schlumberger menjadi persamaan Wenner.

3.21 Industri logam

Daya listrik yang besar sekarang banyak digunakan dalam industri pengolahan logam. Daya listrik yang besar juga berimplikasi arus listrik yang besar. Arus listrik tersebut digunakan sebagai sumber panas untuk mencairkan logam atau digunakan dalam proses elektrolisis untuk mendapatkan logam murni dari campuran logam. Contoh proses elektrolisis dalam industri logam adalah industri perubahan bauksit menjadi aluminium pada smelter aluminium dan produksi tembaga murni pada smelter tembaga.

Smelter Aluminium

Aluminium adalah material yang dibutuhkan dalam industri modern. Material ini ringan, berkekuatan tinggi, tahan terhadap korosi, mempunyai konduktivitas listrik tinggi, dan mudah diproses ulang (recycle). Dengan menggunakan acuan mana pun, aluminium tetap menjadi material yang paling banyak membutuhkan listrik untuk produksi. Untuk memproduksi aluminium diperlukan daya listrik yang sangat besar. Untuk menghasilkan satu ton aluminium dari alumina diperlukan listrik sampai 16 MWh. Untuk menghasilkan aluminium 250.000 ton/tahun, PT Inalum memerlukan energi listrik sebesar 4 Juta MWh. Apabila diasumsikan smelter bekerja selama 24 jam dan jumlah hari operasional setahun adalah 300 hari maka daya listrik yang dibutuhkan sekitar 560 MW. Itulah sebabnya mengapa hampir semua listrik yang diproduksi PLTA Asahan II sebesar 600 MW dipakai oleh smelter Inalum. Hampir semua smelter aluminium di dunia menggunakan listrik dengan daya di atas 100 MW sehingga pembangkit listrik yang dibangun hampir semuanya disuplai ke smelter aluminium.

Di Mozambique, tidak sampai 10% penduduk memiliki akses listrik. Namun pada saat bersamaan, smelter Mozal menggunakan listrik sebanyak empat kali total listrik yang digunakan untuk semua kebutuhan lain di negara tersebut. Smelter Aluminium Valco di Tema, Ghana, mengkonsumsi 45% listrik yang dihasilkan pembangkit listrik Akosombo Dam.

Aluminium adalah material yang dibutuhkan dalam industri modern. Material ini ringan, berkekuatan tinggi, tahan terhadap korosi, mempunyai konduktivitas listrik tinggi, dan mudah diproses ulang (recycle). Dengan menggunakan acuan mana pun, aluminium tetap menjadi material yang paling banyak membutuhkan listrik untuk produksi. Sebagai contoh, pada tahun 2001, sebanyak $45,7 \times 10^9$ kWh energi listrik telah digunakan

Bab 3 Listrik Arus Searah

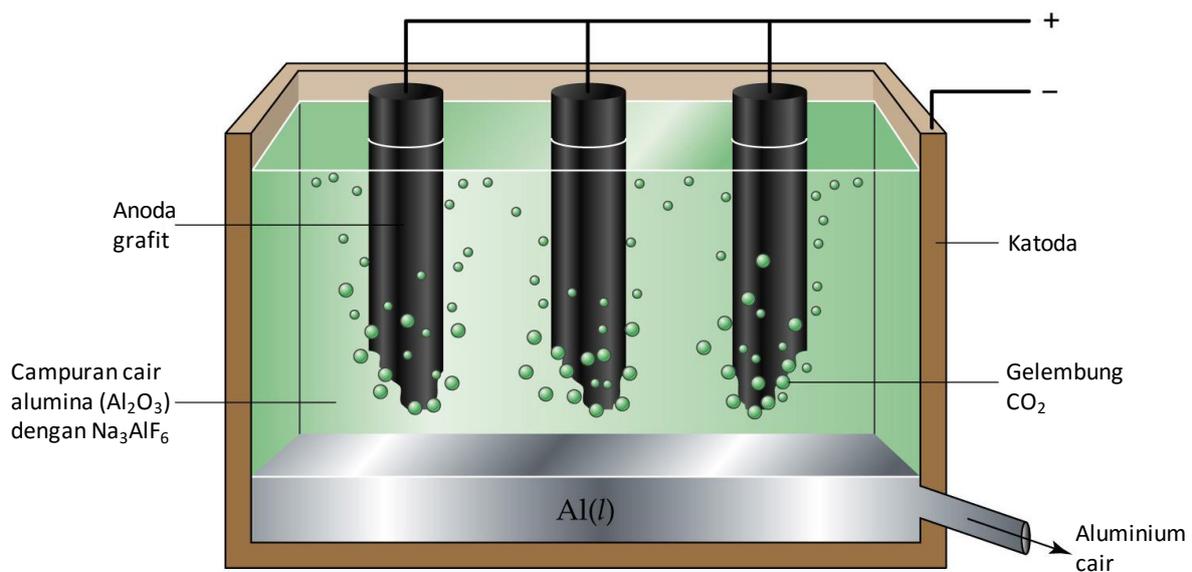
untuk memproduksi aluminium di US. Listrik sebesar ini setara dengan 1,2% seluruh kebutuhan listrik di negara tersebut.

BHP Billiton membangun smelter aluminium dengan daya 2.000 MW di Congo Rio Tinto-Alcan (RTA) membangun smelter aluminium dengan daya 1.000 MW di Song Mbengue, Kamerun. Smelter Alcon di Nigeria yang rampung tahun 1997 telah menelan biaya US\$ 2,5 miliar. Pembangunan Smelter Alucam di Kamerun yang melibatkan pembangunan PLTA Lom Pangar, jaringan transmisi, dan lain-lain menelan biaya US\$ 1,6 miliar.

Membangun smelter sebenarnya bermakna membangun pembangkit tenaga listrik dengan daya besar. Pembangkit listrik dengan daya kurang dari 200 MW secara ekonomi kurang menguntungkan bagi pemnagunan smelter karena menyebabkan harga jual aluminium yang tinggi. Daya listrik 1000 MW dianggap sebagai daya minimum untuk membuat smelter yang sangat modern.

Aluminium primer diproduksi dengan cara elektrolisis alumina (Al_2O_3) yang dilarutkan dalam garam fluoride (AlF_3). Proses ini ditemukan pada tahun 1886 oleh Charles Martin Hall (Amerika Serikat) dan Paul Louis Toussaint Heroult (Perancis). Dalam sel elektrolisis Hall-Heroult, alumina dan aluminium fluorida digunakan sebagai bahan baku material. Karbon pada anoda, bereaksi dengan oksigen dalam alumina membentuk karbon dioksida. Reaksi elektrolisis yang terjadi adalah $2\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{C} \rightarrow 4\text{Al} + 3\text{CO}_2$.

Gambar 3.54 adalah ilustrasi proses Hall-Heroult.



Gambar 3.54 Ilustrasi proses Hall-Heroult (wps.prenhall.com)

Bab 3 Listrik Arus Searah

Ada dua teknologi utama yang digunakan untuk menghasilkan anoda pada proses Hall-Heroult yaitu söderberg dan prebaked. Perbedaan utama antara dua jenis anoda tersebut adalah anoda Söderberg mengeras oleh panas yang dihasilkan dari proses elektrolitik saat dimasukkan ke dalam cairan cryolite, sedangkan anoda prebaked sudah dikeraskan sebelum digunakan dalam sel elektrolitik. Sebagian besar smelter aluminium pada umumnya menggunakan anoda prebaked karena lebih efisien.

Bahan baku utama dari proses peleburan aluminium adalah alumina, aluminium fluorida (AlF_3), karbon (sebagai anoda), dan energi listrik. Produk utamanya adalah logam aluminium, CO_2 , dan beberapa limbah padat. Dalam model yang dilustrasikan pada **Gambar 3.54**, pada proses peleburan aluminium di dunia, untuk menghasilkan 1 ton logam aluminium, diperlukan sekitar 1,92 ton alumina, 0,435 ton pasta anoda, dan sekitar 15,289 MWh listrik.

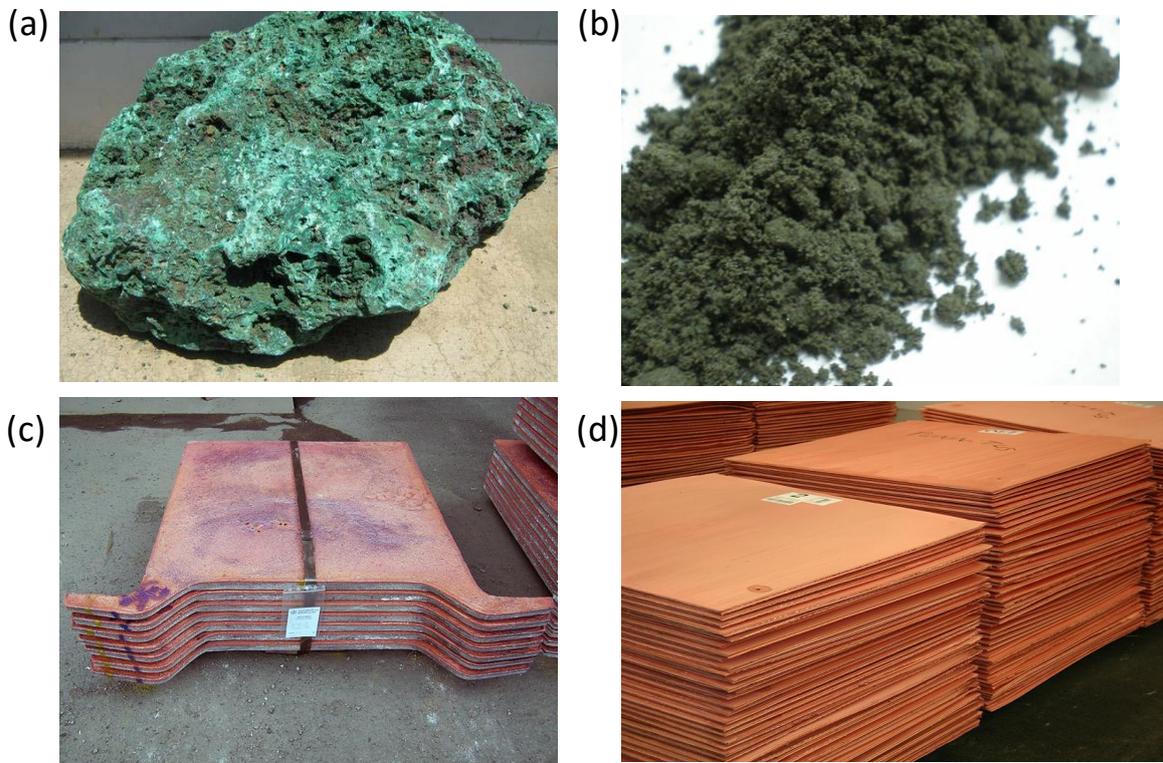
Smelter Tembaga

Tembaga merupakan logam yang banyak digunakan di berbagai industri. Produk dari pabrik peleburan tembaga berupa produk hilir yaitu katoda tembaga. Katoda tembaga digunakan sebagai bahan baku dalam industri-antara untuk menghasilkan produk antara berupa tembaga batang (rod), tembaga pelat (plate) dan tembaga lembaran (sheet). Tembaga dan paduan tembaga semifinal selanjutnya diolah oleh industri hilir untuk digunakan dalam produk akhir seperti mobil, peralatan, elektronik, dan berbagai macam produk tembaga lain dalam rangka memenuhi kebutuhan masyarakat. Misalnya tembaga batang diolah menjadi kawat tembaga dan bahan hilir lainnya seperti kabel. Sementara tembaga pelat dan lembaran diproses menjadi foil tembaga di sektor hilir.

Rantai produksi tembaga dimulai dari penambangan bijih tembaga (ore) dan diolah menjadi konsentrat tembaga. Konsentrat tembaga adalah materil yang mengandung tembaga kira-kira 25%. PT Freeport Indonesia (PT FI) dan PT Newmont Nusa Tenggara (PT NNT) adalah perusahaan penghasil konsentrat tembaga. Setelah dihasilkan konsentrat maka proses selanjutnya adalah smelting. Smelting adalah proses peleburan konsentrat tembaga sehingga dihasilkan tembaga dengan kemurnian sekitar 99%. Konsentrat tembaga dipanaskan pada suhu sangat tinggi sehingga tembaga dalam konsentrat mencair dan mengalir. Aliran cairan tembaga tersebut ditampung dan itulah yang disebut anoda tembaga. **Gambar 3.55** adalah contoh bijih tembaga, konsentrat tembaga, anoda tembaga, dan katoda

Bab 3 Listrik Arus Searah

tembaga.



Gambar 3.55 (a) bijih tembaga (alibaba.com), (b) konsentrat tembaga (alibaba.com), (c) anoda tembaga (kovohuty), dan (d) katoda tembaga (RecycleInMe).



Gambar 3.56 PT Smelting Gresik, satu-satunya pabrik tembaga di Indonesia (identitasdanstatus)

Bab 3 Listrik Arus Searah

Anoda tembaga dimurnikan lebih lanjut menjadi tembaga dengan kemurnian sekitar 99,99%. Pemurnian dilakukan secara elektrolisis. Anoda tembaga ditempatkan pada kutub positif dan pada kutub negatif terbentuk deposit tembaga yang sangat murni. Deposit inilah yang dinamakan katoda tembaga. Proses smelting untuk menghasilkan anoda tembaga dan proses elektrolisis untuk menghasilkan katoda tembaga membutuhkan listrik yang sangat besar. Tetapi jumlah listrik yang dihasilkan masih jauh di bawah listrik untuk memproduksi aluminium dalam jumlah massa yang sama.

Satu-satunya industri pengolahan dan pemurnian tembaga yang ada di Indonesia saat ini adalah PT Smelting Gresik yang sudah mulai beroperasi sejak tahun 1999 (**Gambar 3.56**). PT Smelting mengolah konsentrat yang sebagian besar dihasilkan oleh PT Freeport dan sisanya dari PT NNT. Kapasitas produksi PT Smelting saat ini sudah mencapai 300.000 per tahun dengan rata-rata produksi per tahun sekitar 270.000 ton. Sekitar 60 persen produk tembaga katoda dari PT Smelting di jual di dalam negeri dan sisanya dijual di pasar Asia Tenggara.

Satu-satunya industri pengolahan dan pemurnian tembaga yang ada di Indonesia saat ini adalah PT Smelting Gresik yang sudah mulai beroperasi sejak tahun 1999. PT Smelting mengolah konsentrat yang sebagian besar dihasilkan oleh PT Freeport dan sisanya dari PT NNT. Kapasitas produksi PT Smelting saat ini sudah mencapai 300.000 per tahun dengan rata-rata produksi per tahun sekitar 270.000 ton. Sekitar 60 persen produk tembaga katoda dari PT Smelting di jual di dalam negeri dan sisanya dijual di pasar Asia Tenggara.

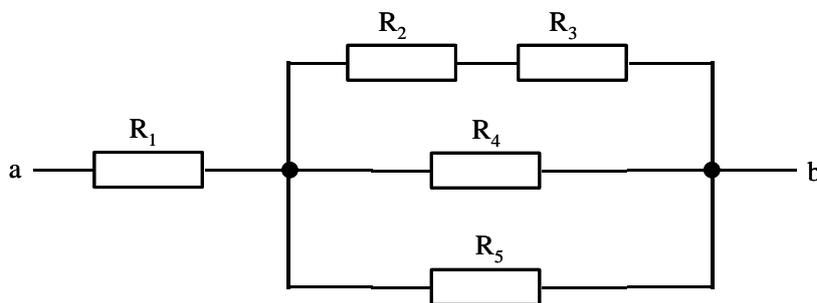
Tembaga katoda merupakan bahan baku untuk barang-barang dari tembaga dan sebagian besar digunakan untuk pembuatan kawat dan kabel listrik. Di dalam negeri sendiri, telah ada setidaknya 7 perusahaan yang memproduksi kawat dan kabel listrik dengan total produksi keseluruhan sekitar 168.000 ton per tahun. Selain tembaga katoda sebagai produk utama, juga terdapat produk sampingan yang juga memiliki nilai jual seperti asam sulfat, terak tembaga, gypsum, dan lumpur anoda. Asam sulfat digunakan pada industri petrokimia seperti pabrik pupuk. PT Smelting menjual asam sulfat 700.000 ton/tahun ke PT Petrokimia Gresik. Terak tembaga dan gypsum yang berguna untuk bahan baku semen dijual masing-masing 530.000 ton/tahun dan 20.000 ton/tahun ke PT Semen Gresik. Lumpur anoda mengandung logam-logam mulia emas, perak, dan logam-logam yang termasuk ke dalam kelompok logam PGM (Platinum

Bab 3 Listrik Arus Searah

Group Metal) seperti platinum, palladium, rodium, iridium, osmium, dan ruthenium. Produksi lumpur anoda PT Smelting sekitar 1.000 ton per tahun yang kesemuanya dijual karena PT Smelting tidak bisa mengolah lumpur anoda tersebut .

Soal-soal

Tentukan hambatan pengganti untuk susunan hambatan pada **Gambar 3.57**. Nilai hambatan dalam rangkaian adalah $R_1 = 500 \Omega$, $R_2 = 200 \Omega$, $R_3 = 300 \Omega$, $R_4 = 400 \Omega$, dan $R_5 = 200 \Omega$.



Gambar 3.57 Gambar untuk soal ***

2) Kembali ke soal nomor 1. Jika tegangan antara a dan b adalah 6 V, berapakah arus yang mengalir pada masing-masing hambatan?

Sebuah kawat diregangkan sehingga panjangnya bertambah 20% dari panjang semula. Berapa perubahan hambatan kawat tersebut?

Sebuah kios pengisian aki mengisi aki dengan mengalirkan arus 0,4 A selama 7 jam. Berapakah muatan yang dimasukkan ke dalam aki?

Arus sebesar 0,5 A mengalir pada kawat. Berapa jumlah elektron per detik yang mengalir dalam kawat tersebut? Besar muatan elektron adalah $1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$.

Sebuah peralatan listrik menarik arus 5,5 A ketika dihubungkan ke tagangan 110 V. (a) Jika tegangan turun 10 persen, berapakah arus yang mengalir sekarang? (b) Jika hambatan berkurang 10 persen, berapa arus yang ditarik alat tersebut saat dihubungkan ke tegangan 110 V?

Baterai 12 V mendorong arus 0,5 A pada sebuah tahanan. (a) Berapakah

Bab 3 Listrik Arus Searah

besar hambatan tersebut? (b) Berapa Joule kehilangan energi baterai selama satu menit.

Sebuah kawat tembaga memiliki hambatan 10Ω . Di manakah kawat tersebut harus dipotong agar hambatan salah satu potongan tujuh kali hambatan potongan yang lain? Hitung pula hambatan tiap potongan tersebut.

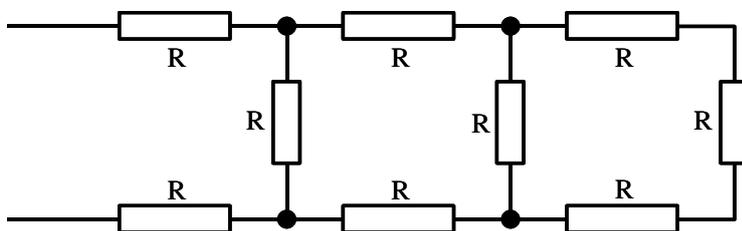
Berapakah suhu kawat tembaga harus dinaikkan (jika mula-mula suhunya 20°C) agar hambatannya bertambah 20%

Kawat yang panjangnya 10 m terbuat dari 5 m tembaga dan 5 m aluminium yang memiliki diameter yang sama (1,0 mm). Beda potensial sebesar 80 V diberikan pada ujung-ujung gabungan kawat tersebut. (a) berapakah hambatan total kawat, (b) berapakah arus yang mengalir pada kawat? (c) berapakah beda potensial sepanjang kawat aluminium saja dan berapakah beda potensial sepanjang kawat tembaga saja?

Berapakah tegangan maksimum yang dapat diberikan pada hambatan $2,7 \text{ k}\Omega$ dan memiliki daya $0,25 \text{ W}$?

Berapa banyak bola lampu 100 W yang dapat dipasang secara parallel di rumah yang memiliki tegangan 220 V dan sekering 2,5 A?

Tentukan hambatan pengganti dari “tangga hambatan” pada **Gambar 3.58**. Hambatan tiap hambatan sama, yaitu 200Ω .



Gambar 3.58 Gambar untuk soal **

(a) Pada **Gambar 3.59**, tentukan hambatan pengganti rangkaian hambatan jika nilai tiap hambatan adalah $R = 2,8 \text{ k}\Omega$. Anggap hambatan dalam baterai nol. (b) tentukan arus yang mengalir pada masing-masing hambatan. (c)

Bab 3 Listrik Arus Searah

mengalir pada kawat menjadi 0,3618 A. Berapakah suhu lingkungan kawat tersebut?

Tentukan, pada suhu berapakah hambatan jenis tembaga menjadi sama dengan hambatan jenis tungsten pada suhu 20 °C?

Sebuah bolam lampu mengandung filamen yang memiliki hambatan 12 Ω ketika dalam kondisi dingin dan 140 °C pada keadaan panas. Perkirakan suhu filamen dalam bola lampu ketika saklar di "ON" kan (lampu menyala) jika koefisien suhu hambatannya adalah $\alpha = 0,0060$ (°C)⁻¹

Berapakah daya maksimum yang dikonsumsi oleh sebuah walkman jika arus maksimum yang ditarik oleh alat tersebut dari sumber tegangan 9 V adalah 350 mA?

(a) Berapakah hambatan dan arus yang mengalir pada bolam lampu 60 W jika dihubungkan ke sumber tegangan 120 V? (b) Ulangi pertanyaan di atas untuk bolam lampu 440 W.

Sebuah pembangkit listrik memberikan daya 520 kW ke sebuah pabrik melalui kabel yang hambatan totalnya 3 Ω . Berapa daya listrik yang terbuang jika tegangan yang diberikan 50.000 V? Dan berapa daya yang terbuang jika tegangan 20.000 V?

Delapan lampu sejenis dihubungkan secara seri pada tegangan listrik 220 V. (a) berapa beda tegangan yang dialami tiap lampu? (b) Jika arus yang mengalir 0,8 A, berapakah hambatan yang dimiliki masing-masing lampu dan daya yang dihasilkan oleh masing-masing lampu tersebut?

Delapan lampu serupa dihubungkan secara paralel pada tegangan 110 V. Jika arus yang mengalir pada tiap lampu adalah 240 mA, berapakah hambatan tiap lampu dan daya yang dihasilkan masing-masing lampu?

Empat buah lampu yang memiliki hambatan masing-masing 140 Ω dihubungkan secara seri. (a) berapakah hambatan total ke empat lampu tersebut? (b) berapakah hambatan total jika lampu disusun secara paralel?

Tiga buah lampu yang memiliki hambatan masing-masing 40 Ω dan tiga

Bab 3 Listrik Arus Searah

buah lampu yang memiliki hambatan masing-masing 80Ω dihubungkan secara seri. (a) Berapakah hambatan total enam lampu tersebut? (b) Berapakah hambatan total jika enam lampu tersebut disusun secara paralel?

Dari satu buah hambatan 40Ω dan satu buah hambatan 80Ω , hambatan yang nilai berapakah yang mungkin diperoleh dari kombinasi kedua hambatan tersebut?

Misalkan kamu memiliki tiga buah hambatan, masing-masing 500Ω , 900Ω , dan $1,4 \text{ k}\Omega$. Berapakah hambatan terbesar yang dapat kamu peroleh dengan mengkombinasikan tiga hambatan tersebut? Berapakah hambatan terkecil yang dapat kamu peroleh?

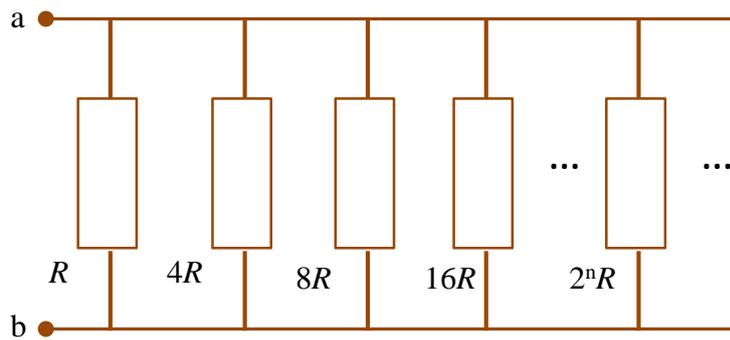
Tiga buah hambatan 240Ω dapat dikombinasikan dalam empat cara yang berbeda. Hitunglah hambatan pada tiap-tiap kombinasi tersebut.

Hambatan $2,1 \text{ k}\Omega$ dan $2,8 \text{ k}\Omega$ dihubungkan secara paralel. Kombinasi tersebut kemudian dihubungkan secara seri dengan hambatan $1,8 \text{ k}\Omega$. Jika daya maksimum yang sanggup ditahan masing-masing hambatan $0,25 \text{ W}$, berapakah tegangan maksimum yang bisa dipasang pada rangkaian tersebut?

Dua buah lampu yang memiliki daya yang sama dihubungkan ke tegangan 220 V . Manakah yang lebih terang jika kedua lampu tersebut dipasang secara seri dibandingkan apabila kedua lampu tersebut dipasang secara paralel?

Sebanyak N buah hambatan disusun secara paralel seperti ditunjukkan pada **Gambar 3.60**. Hambatan pertama memiliki nilai R dan hambatan ke- n memiliki nilai $2^n R$. a) Tentukan hambatan total antara titik A dan b. Berapakah hambatan total jika jumlah hambatan yang disusub menuju tak berhingga?

Bab 3 Listrik Arus Searah



Gambar 3.60 Gambar untuk soal ***

Hambat jenis air adalah ρ . Sering kali orang memanaskan air dengan menggunakan dua sendok yang didekatkan. Dua buah sendok tersebut dipisahkan oleh isolator dengan ketebalan t . Dua sendok diceulpak dalam air dengan volum V kemudian dihubungkan dengan tegangan listrik PLN (ingat, ini cara yang berbahaya). Jika luas penampang sendok sama, yaitu A , berapa laju produksi panas dalam air? Jika kalor jenis air adalah c_v dan suhu mula-mula air adalah 30°C , berapa waktu yang diperlukan untuk mendidihkan air tersebut? Anggap tidak ada kalor yang hilang ke udara.