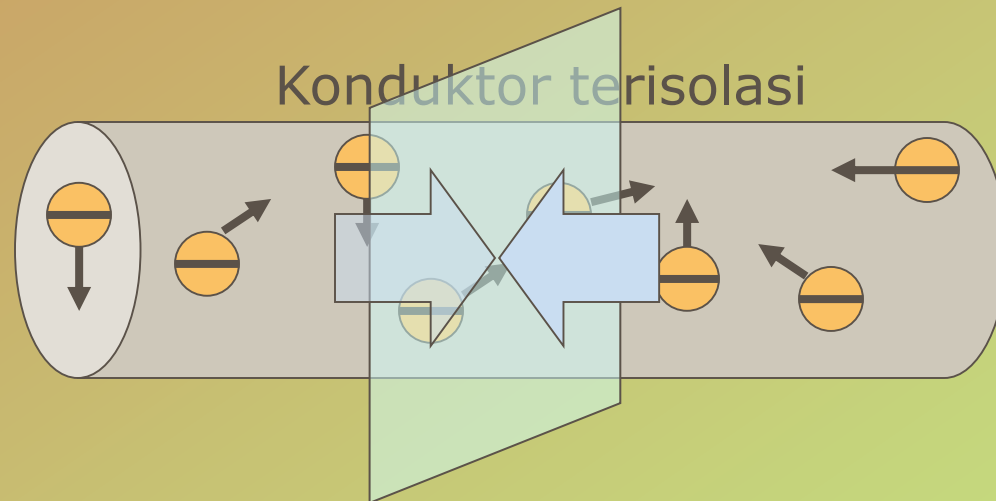
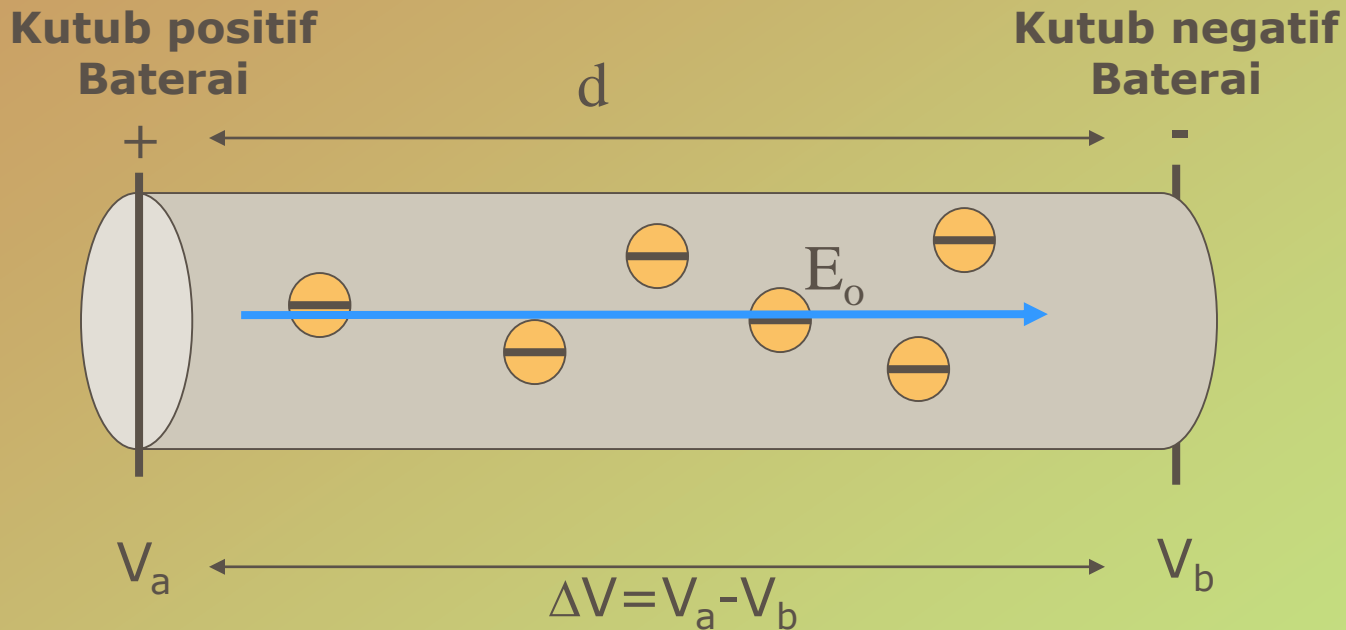


Di dalam konduktor / penghantar terdapat elektron bebas (muatan negatif) yang bergerak dalam arah sembarang (random motion)



Elektron-elektron tersebut tidak mempunyai gerakan terarah netto sepanjang konduktor. Artinya jika kita pasang sebuah bidang hipotetik sembarang melalui konduktor tersebut maka banyaknya elektron yang melalui bidang tersebut dari kedua sisi bidang **sama besarnya**.

Jika kedua ujung konduktor sepanjang d tersebut dihubungkan ke sebuah baterai maka akan timbul medan listrik di dalamnya



$$\Delta V = V_A - V_b = -\int \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

$$\Delta V = E l$$

$$E = \frac{\Delta V}{l}$$

Adanya sebuah medan listrik di dalam sebuah konduktor tidak bertentangan dengan kenyataan yang diperoleh dari bab sebelumnya bahwa medan E di dalam konduktor sama dengan nol.

Kasus dimana medan di dalam konduktor sama dengan nol terjadi dalam keadaan yang di dalamnya semua gerakan netto dari muatan telah berhenti \longrightarrow **elektrostatik**

Tetapi jika sebuah beda potensial dipertahankan di antara kedua ujung konduktor tersebut maka menyebabkan adanya medan resultan di antara kedua ujung konduktor.

Medan E ini akan bertindak pada elektron-elektron dan akan memberikan suatu gerak resultan pada elektron-elektron tersebut di dalam arah E \longrightarrow **elektrodinamik**

Medan listrik tersebut mengerahkan sebuah gaya pada elektron-elektron di dalam sebuah konduktor tetapi gaya ini tidak menghasilkan suatu percepatan *netto* karena elektron-elektron terus-menerus bertumbukan dengan atom-atom. Gaya resultan pada pembawa muatan inilah yang menyebabkan terjadinya aliran muatan dalam konduktor.

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}_o \quad q \equiv \text{elektron} = -e$$

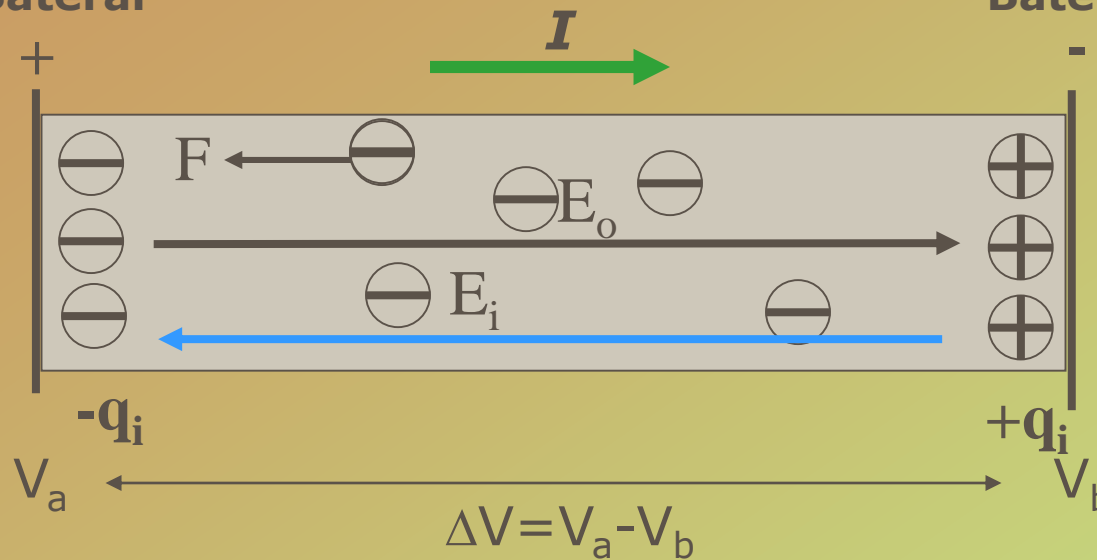
$$\vec{F} = -e \vec{E}_o \quad \vec{F} \text{ berlawanan dengan } \vec{E}$$

$$\text{dan karena } \vec{E}_o = \hat{i} E_o$$

$$\vec{F} = -\hat{i} e E_o$$

Kutub positif
Baterai

Kutub negatif
Baterai



Aliran elektron ke kiri mengisyaratkan pula adanya aliran muatan positif ke kanan.

Aliran muatan positif inilah yang kemudian kita definisikan sebagai **arus**.

Muatan-muatan negatif dan positif akan terkumpul di kedua ujung konduktor yang berbeda \longrightarrow **Muatan induksi**

Terpolarisasinya muatan induksi memunculkan **medan induksi E_i**

Jika sebuah muatan netto q lewat melalui suatu penampang penghantar / konduktor selama waktu t , maka arus (yang dianggap konstan) adalah

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

dimana $i \equiv$ arus dengan satuan Ampere (A)

$q \equiv$ banyaknya muatan satuan Coulomb (C)

$t \equiv$ waktu satuan detik / sekon (s)

Jika banyaknya muatan yang mengalir per satuan waktu tidak konstan, maka arus akan berubah dengan waktu dan diberikan oleh limit differensial dari persamaan di atas.

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

Jika muatan induksi q_i bertambah maka medan induksi E_i juga bertambah sehingga $E_i \sim q_i$.

Akhirnya jika suatu saat terjadi kondisi dimana $E_i = E_o$ maka medan total di dalam konduktor menjadi

$$\vec{E} = \vec{E}_o + \vec{E}_i = \hat{i}E_o - \hat{i}E_i = 0$$

Dari hubungan sebagai berikut :

$$\Delta V = -\int \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

jika $\vec{E} = 0$ maka $\Delta V = 0$

(Tidak ada beda potensial diantara kedua ujung konduktor /
Potensial kedua ujung konduktor sama)

Ini berarti tidak ada lagi aliran muatan di dalam konduktor (arus terhenti).

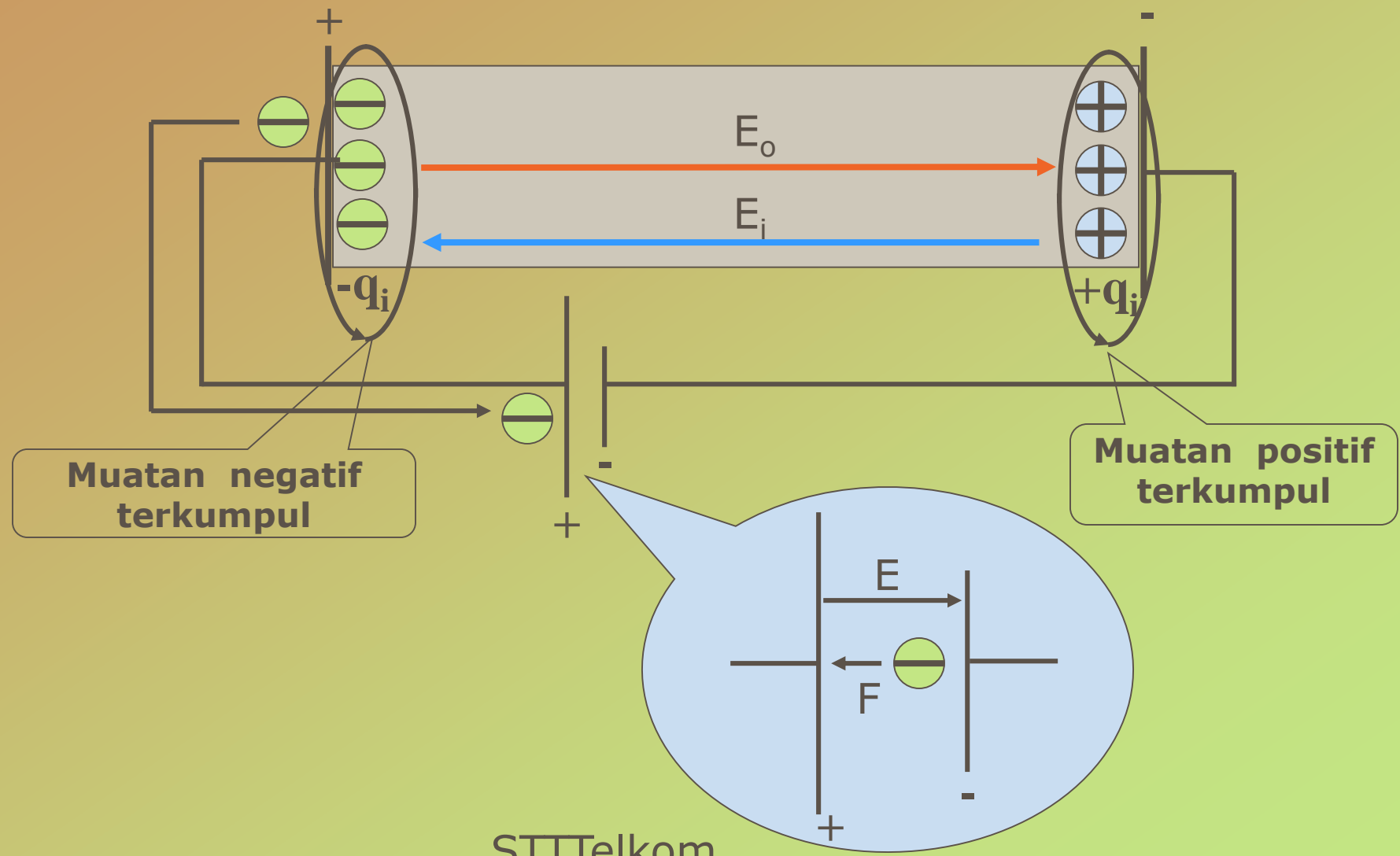
Agar terjadi aliran muatan terus menerus maka muatan induksi harus diambil /disebrangkan dari kedua ujung konduktor tersebut sehingga tidak timbul medan listrik induksi.

Diperlukan sebuah gaya untuk memindahkan / menyebrangkan muatan tersebut sehingga di kedua ujung konduktor tidak ada lagi muatan induksi.

Gaya gerak inilah yang disebut ***gaya gerak listrik*** (muatan) **GGL \mathcal{E}** .

Di dalam sebuah rangkaian tertutup, GGL ini harus dihasilkan oleh sebuah baterai sehingga elektron bisa secara terus-menerus berputar dalam siklus tertutup rangkaian tersebut.

Tinjau kembali sebuah konduktor beserta sumber arusnya (baterai) sebagai berikut :



Di dalam baterai, elektron harus disebrangkan dari kutub positif baterai ke kutub negatif baterai, melawan gaya yang bekerja pada elektron di dalam baterai.

Untuk itu diperlukan usaha untuk menyebrangkan elektron tersebut. —→ **elektron memerlukan tambahan energi listrik.**

Energi listrik ini harus bisa diberikan oleh baterai, sehingga baterai berfungsi sebagai penyuplai energi listrik bagi elektron

.

Besarnya energi listrik yang harus diberikan sebanding dengan beda potensial antara kedua kutub baterai.

Beda potensial antara kedua kutub baterai ini yang didefinisikan sebagai ***gaya gerak listrik (GGL)*** / tegangan baterai.

Jika tidak ada GGL (beda potensial) maka tidak perlu ada usaha untuk memindahkan/menyebrangkan elektron di dalam baterai.

$$W = \oint \vec{F} \cdot d\vec{l}, \quad \vec{F} = q\vec{E}$$

$$W = \oint q\vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$$

Analogi :

Jika tidak ada perbedaan ketinggian maka tidak diperlukan usaha untuk memindahkan air. Air akan mengalir dengan sendirinya dari suatu titik ke titik lain yang memiliki ketinggian yang sama.

Jika ada GGL (beda potensial) maka diperlukan usaha untuk menyebrangkan elektron.

Elektron harus mendapat tambahan energi yang sebanding dengan besarnya GGL tersebut yaitu sebesar $q\varepsilon$.

$$W = q\varepsilon = \oint q\vec{E} \cdot d\vec{l}$$

→ $\varepsilon = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l}$

Analogi :

Diperlukan usaha untuk memindahkan air ke permukaan yang lebih tinggi dari sebelumnya. Energi / usaha ini misalnya dapat diberikan oleh suatu pompa air (yang analog dengan sumber GGL).

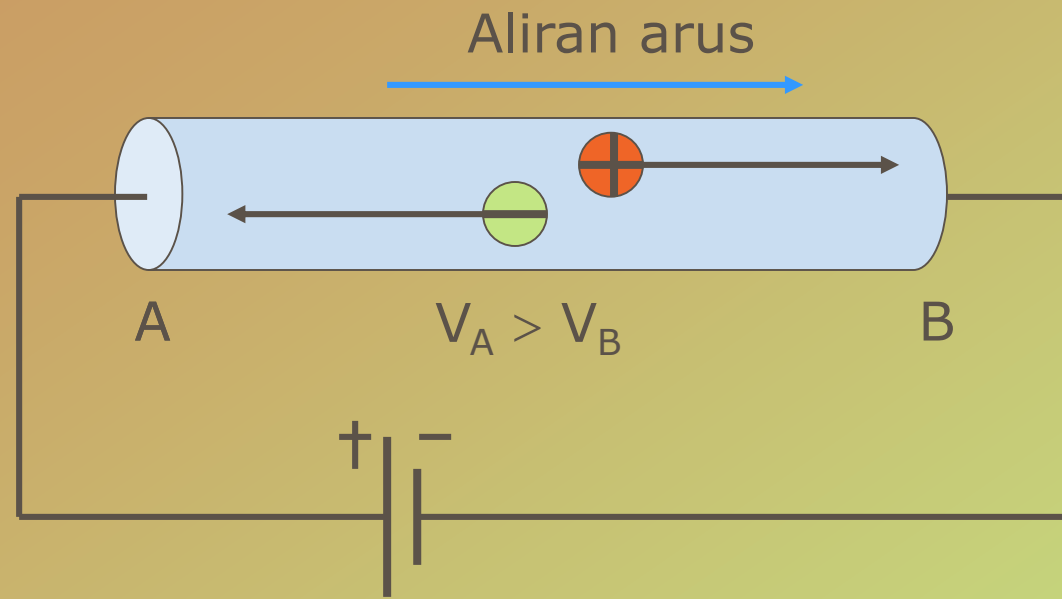
Arus listrik dalam logam

Arus listrik dalam logam didefinisikan sebagai banyaknya muatan positif yang mengalir pada suatu penampang logam per satuan waktu.

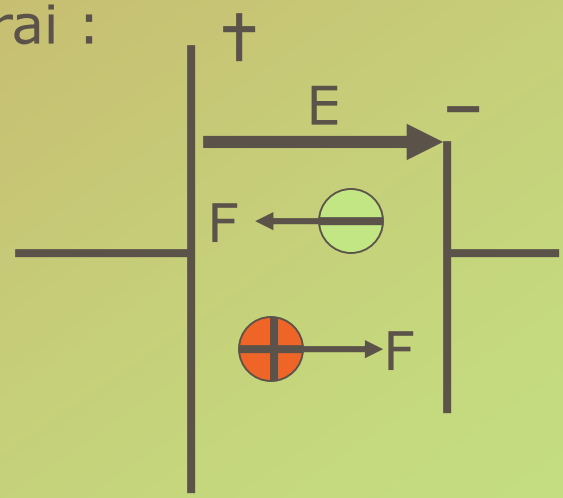
Jika sebuah penghantar logam dihubungkan dengan sebuah baterai, maka arus akan mengalir dari ujung logam yang berpotensi lebih tinggi (ujung yang dihubungkan dengan kutub positif baterai) ke ujung logam yang berpotensi lebih rendah (ujung yang dihubungkan dengan kutub negatif baterai).

Analogi :

Air di sungai akan mengalir dari dataran lebih tinggi ke dataran yang lebih rendah.



Di dalam baterai :



Kedua muatan harus disebrangkan melawan gaya yang dialaminya tersebut.

Jika kita definisikan :

$N \equiv$ Jumlah total muatan dalam penghantar

$V \equiv$ volume total penghantar

Maka

$n \equiv$ jumlah muatan tiap satuan volume penghantar

$$n = \frac{N}{V}$$

Dan jika e adalah muatan bebas

maka rapat muatan ρ adalah :

$$\rho = n e$$

Elektron-elektron dalam penghantar tersebut akan bergerak dan memperoleh laju penyimpangan (drift speed) v_d rata-rata yang ***konstan*** di dalam arah $-E$.

Analogi :

Sebuah bantalan peluru (ball bearing) yang jatuh di dalam sebuah medan gravitasi uniform g dengan laju terminal (akhir) yang konstan melalui suatu minyak yang kental.

Gaya gravitasi (mg) yang beraksi pada bola sewaktu bola tersebut jatuh tidak mengakibatkan pertambahan energi kinetik bola (yang konstan) tetapi dipindahkan ke fluida oleh tumbukan-tumbukan molekul, yang menghasilkan kenaikan temperatur.

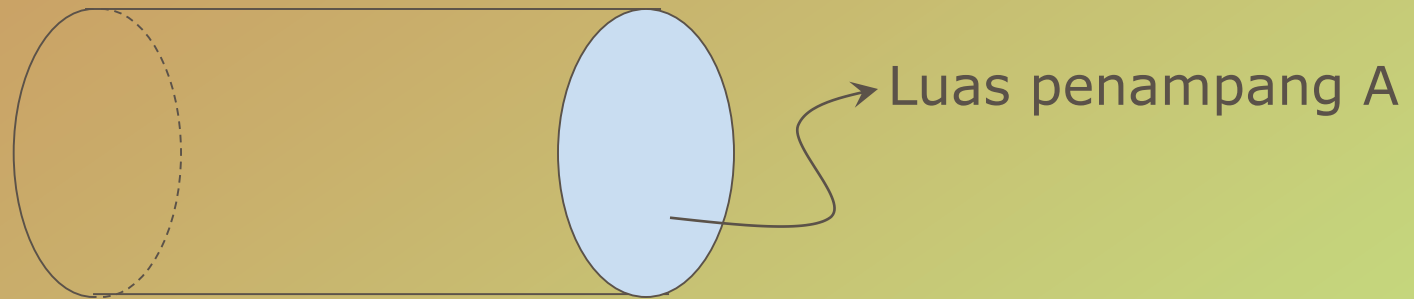
Demikian halnya sebuah elektron dalam penghantar logam akan bergerak dengan laju yang konstan walaupun elektron tersebut mendapatkan gaya akibat adanya medan listrik yang ditimbulkan oleh kedua kutub baterai.

Gaya yang beraksi pada elektron tersebut tidak mengakibatkan pertambahan energi kinetik elektron (yang konstan) tetapi dipindahkan ke atom-atom dalam proses tumbukan.

Jadi misalkan laju gerak rata-rata pembawa muatan adalah v maka jarak tempuh s yang sudah dialami oleh pembawa muatan tersebut selama dt detik adalah

$$S = v dt$$

Sebuah penghantar berbentuk silinder :



$$s = v dt$$

(Jarak yang ditempuh selama dt)

Maka volume yang disapu selama dt tersebut (yang merupakan volume silinder) adalah

$$dV = s A = v dt A$$

Sehingga jumlah muatan yang mengalir selama waktu dt tersebut adalah

$$dq = \rho dV \quad \text{dan karena } \rho = n e$$

$$dq = n e dV \quad \text{dan karena } dV = v A dt$$

$$dq = n e v A dt$$

Dengan demikian besarnya arus yang mengalir pada penghantar diperoleh :

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{n e A v dt}{dt} = n e A v$$

Arus i adalah merupakan ciri (karakteristik) dari suatu penghantar khas. Arus tersebut adalah sebuah kuantitas makroskopik, seperti massa sebuah benda, volume sebuah benda, atau panjang sebuah tongkat.

Sebuah kuantitas mikroskopik yang dihubungkan dengan itu adalah rapat arus (*current density*) j .

Rapat arus tersebut merupakan ciri sebuah titik di dalam penghantar dan bukan merupakan ciri penghantar secara keseluruhan.

Jika arus tersebut didistribusikan secara uniform pada sebuah penghantar yang luas penampangnya A , maka besarnya rapat arus untuk semua titik pada penampang tersebut adalah :

$$j = \frac{i}{A} = n e v$$

Hukum Ohm

Arus yang mengalir dalam penghantar logam besarnya konstan .

Ini berarti rapat arusnya juga konstan.

Dan karena laju gerak pembawa muatan berbanding lurus dengan rapat arus yang konstan maka lajunya pun konstan.

Ternyata bahwa besarnya laju gerak penyimpangan elektron dalam penghantar sebanding dengan besarnya medan listrik dalam penghantar tersebut.

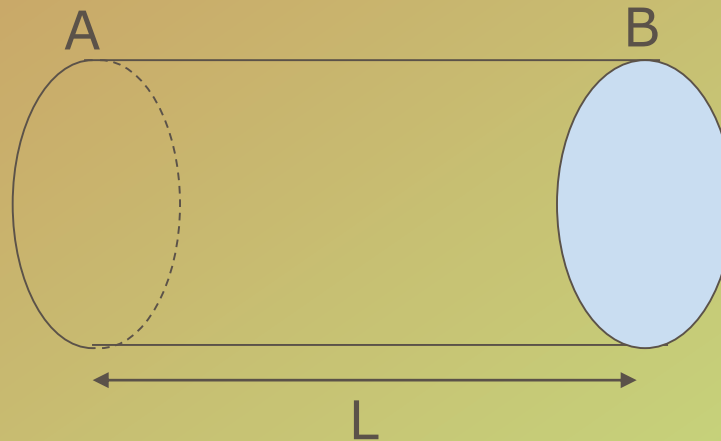
$$v_{\text{konstan}} \sim E \longrightarrow j \sim E$$

Akhirnya diperoleh :

$$j = \sigma E \quad (\text{Hukum Ohm})$$

Dimana σ adalah konduktivitas listrik.

Tinjau kembali sebuah penghantar logam berbentuk silinder sepanjang L :



$$V_A - V_B = \Delta V = -\int_0^L \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

Untuk E serba sama maka $E = \frac{V}{L}$

Sehingga

$$J = \sigma E = \sigma \frac{V}{L}$$

$$i = J.A = \sigma \frac{V}{L} A = \frac{\sigma A}{L} V$$

$$V = \frac{L}{\sigma A} i$$

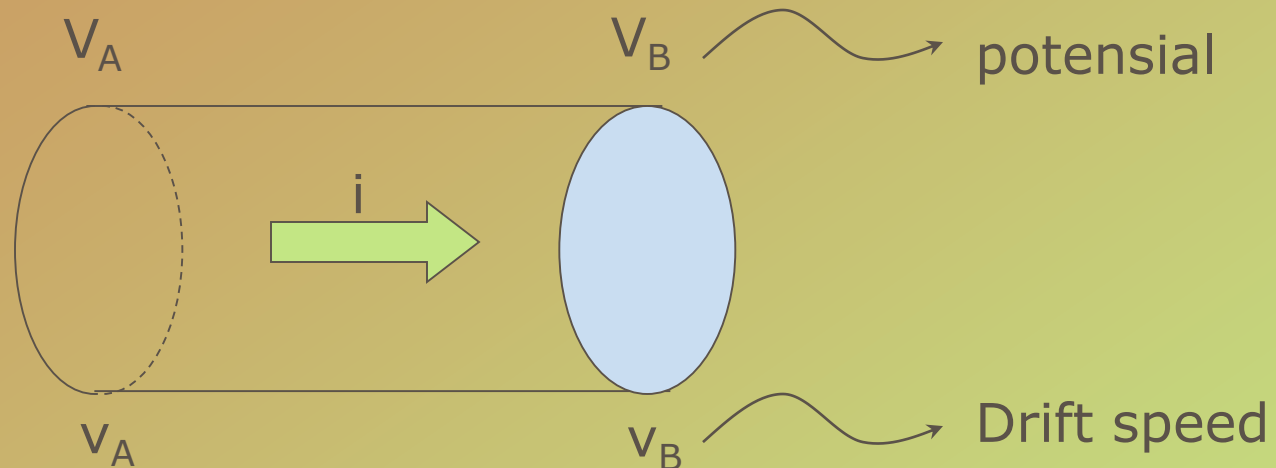
jadi $V = Ri$ (Hukum Ohm)

dimana $R = \frac{L}{\sigma A}$

jika didefinisikan $\rho = \frac{1}{\sigma} \equiv$ resistivitas/hambatan jenis maka

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

Hukum Joule



Potensial kedua ujung penghantar : $V_A > V_B$

Timbul arus pada penghantar : $i = \frac{V}{R}$

Karena arus konstan maka kecepatan gerak pembawa muatan di setiap titik penghantar sama $v_A = v_B$

Karena kecepatan konstan $v_a = v_b$, ini berarti energi kinetik pembawa muatan di kedua ujung sama.

$$E_{kA} = E_{kB}$$
$$\frac{1}{2}mv_A^2 = \frac{1}{2}mv_B^2$$

Pembawa muatan bergerak di bawah pengaruh beda potensial yang dipertahankan $V = V_A - V_B$

sehingga pembawa muatan sebesar dq mendapat tambahan energi sebesar $dU = dq \cdot V$

Karena energi kinetik pembawa muatan di kedua ujung penghantar tidak berubah selama pembawa muatan bergerak maka berarti tidak ada penambahan energi bagi pembawa muatan.

Lalu kemana larinya energi sebesar dU ini ?

Energi yang muncul sebesar ini kemudian akan diubah menjadi energi kalor.

Maka pada saat aliran berjalan selama dt akan terkumpul energi persatuan waktu atau daya kalor P sebesar

$$P = \frac{dU}{dt} = \frac{dqV}{dt} = \frac{dq}{dt}V = iV$$

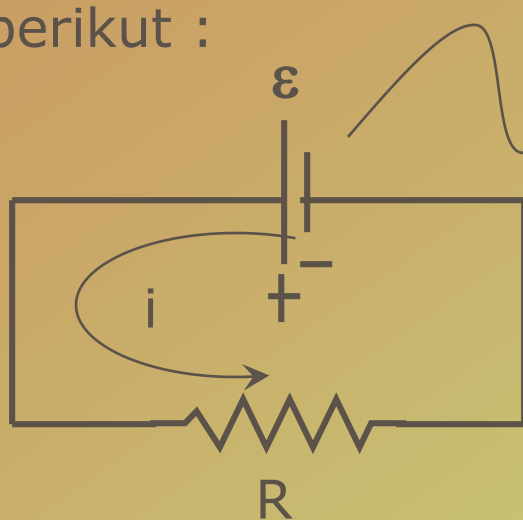
dan karena $V = iR$

maka : $P = i^2R$ (Hukum Joule)

Daya ini akan terdisipasi pada penghantar menjadi panas.

Oleh karena itu disebut sebagai **daya disipasi**

Perhatikan sebuah rangkaian yang terdiri dari sebuah hambatan R dan sebuah sumber tegangan baterai ε sebagai berikut :



Di dalam sumber tegangan / baterai, pembawa muatan mendapat tambahan energi sebesar $U = q\varepsilon$

Muatan dapat disebrangkan sehingga timbul arus dalam rangkaian

Arus di dalam rangkaian memperoleh daya sebesar $P = \epsilon I$.

Dalam baterai sendiri ada hambatan dalam baterai sebesar r sehingga terdapat daya yang terdisipasi sebagai kalor di dalam baterai sebesar $P_r = i^2 r$.

Sedangkan pada Pada hambatan R daya juga akan terdisipasi menjadi kalor sebesar $P_R = i^2 R$

Di dalam rangkaian berlaku hukum kekekalan energi

→ Energi yang diterima oleh pembawa muatan sama dengan energi yang hilang sebagai kalor

Dalam bentuk energi pesatuan waktunya atau daya berlaku bahwa daya yang diterima pembawa muatan sama dengan daya yang hilang sebagai kalor.

Daya yang diterima = Daya yang dilepas

$$P = P_r + P_R$$

$$\varepsilon i = i^2 r + i^2 R$$

$$\varepsilon = ir + iR$$

$$\varepsilon = i (r + R)$$

Jika dalam rangkaian terdapat lebih dari satu sumber tegangan dan satu hambatan maka :

$$\sum \varepsilon = \sum i.(R+r)$$

Dan karena biasanya $r \ll R$, maka hambatan dalam baterai r sering diabaikan sehingga persamaan di atas menjadi

$$\sum \varepsilon = \sum i.R$$

Hukum Kirchoff

Untuk suatu rangkaian bercabang dan terdapat 2 loop, besarnya arus yang mengalir pada setiap cabang dapat ditentukan dengan menggunakan hukum Kirchoff sebagai berikut :

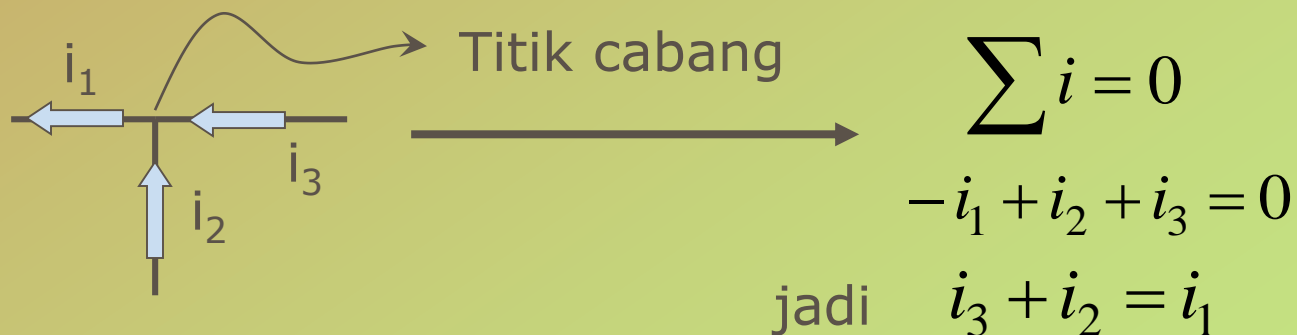
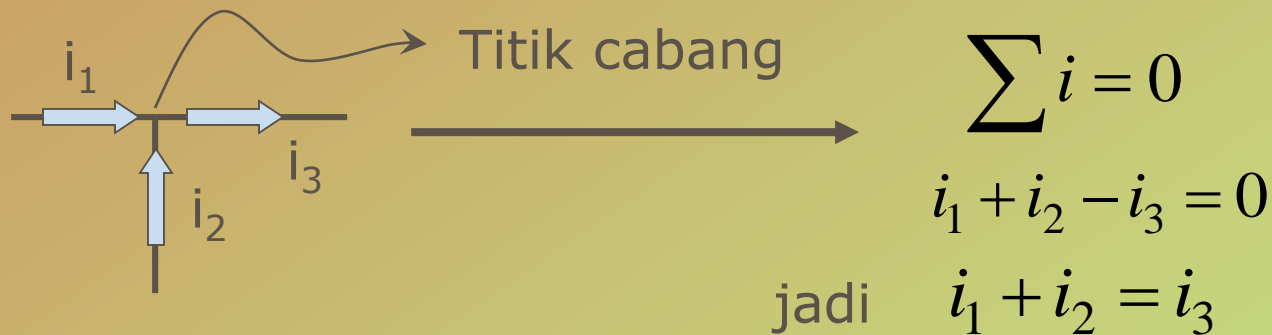
Hukum Kirchoff I (hukum titik cabang):

Jumlah aljabar arus di dalam suatu titik cabang suatu rangkaian adalah sama dengan nol (jumlah arus yang masuk ke suatu titik cabang sama dengan jumlah arus yang keluar dari titik cabang tersebut)

$$\sum i = 0$$

(Hukum kekekalan arus)

Pada persamaan tersebut gunakan ketentuan :
Arus positif untuk semua arah arus menuju titik cabang dan
arus negatif untuk semua arah arus yang keluar dari titik
cabang.



Hukum Kirchoff II (hukum loop) :

Jumlah aljabar GGL dalam tiap loop sama dengan jumlah aljabar hasil kali R dan i dalam loop yang sama atau

$$\sum \varepsilon = \sum iR$$

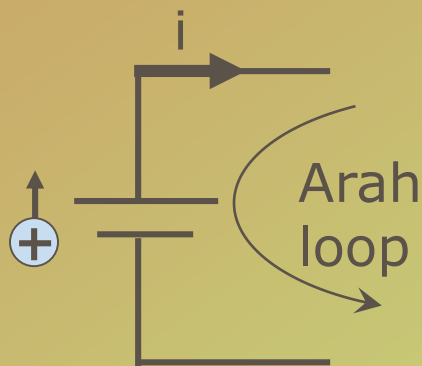
Dalam penggunaan persamaan di atas kita bisa digunakan ketentuan sebagai berikut :

ε bertanda positif jika arah GGL (arah aliran muatan positif di dalam baterai) searah dengan arah loop dan ε bertanda negatif jika sebaliknya.

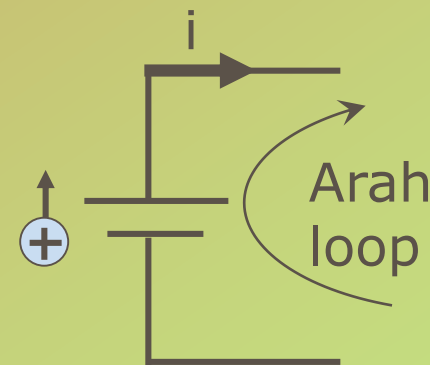
i bertanda positif jika arah arus searah dengan loop dan i bertanda negatif jika sebaliknya.

Agar arus mengalir dalam rangkaian maka muatan positif di dalam baterai harus dialirkan dari kutub negatif baterai menuju kutub positif baterai.

Sebaliknya muatan negatif di dalam baterai harus dialirkan dari kutub positif baterai menuju kutub negatif baterai.

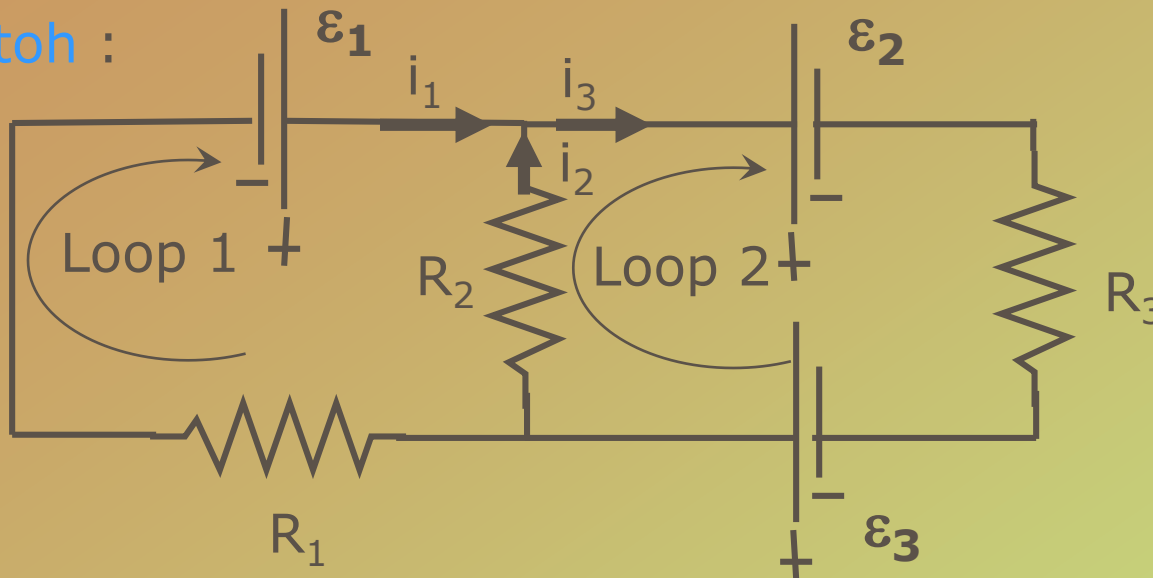


Maka : ε Bertanda negatif
 i bertanda positif



Maka : ε Bertanda positif
 i bertanda positif

Contoh :



Dengan :

$$\epsilon_1 = 2 \text{ V}$$

$$\epsilon_2 = 6 \text{ V}$$

$$\epsilon_3 = 10 \text{ V}$$

$$R_1 = 1 \Omega$$

$$R_2 = R_3 = 2 \Omega$$

Tentukan daya yang terdisipasi pada setiap hambatan

Jawab :

Daya sebanding dengan besar arus yang melewati hambatan tersebut sehingga kita harus cari besarnya arus yang melewati setiap hambatan.

Misalkan arus yang melewati setiap hambatan : i_1 , i_2 , i_3

Kemudian kita pilih arah loop-loop pada rangkaian tersebut.

Berdasarkan arah-arah arus tersebut maka hukum Kirchoff I menghasilkan persamaan :

$$\sum i = 0$$

$$i_2 + i_1 = i_3 \dots\dots\dots(1)$$

Hukum Kirchoff II pada setiap Loop menghasilkan

Pada loop I :

$$\sum \varepsilon = \sum iR$$

$$\varepsilon_1 = i_1 R_1 - i_2 R_2$$

$$2 = i_1 - 2 i_2 \dots\dots\dots(2)$$

Pada Loop II :

$$\sum \varepsilon = \sum iR$$

$$\varepsilon_3 - \varepsilon_2 = i_2 R_2 + i_3 R_3$$

$$10 - 6 = i_2 \cdot 2 + i_3 \cdot 2$$

$$4 = 2 i_2 + 2 i_3$$

$$2 = i_2 + i_3 \quad \dots\dots\dots(3)$$

Kemudian substitusikan i_2 dari persamaan (1) ke persamaan (2)

$$i_2 = i_3 - i_1 \longrightarrow 2 = i_1 - 2 (i_3 - i_1)$$

$$2 = 2 i_1 - 2 i_3 \quad \dots\dots\dots(4)$$

Substitusikan i_2 dari persamaan (1) ke persamaan (3)

$$i_2 = i_3 - i_1 \longrightarrow 2 = (i_3 - i_1) + i_3$$

$$2 = 2 i_3 - i_1 \quad \dots\dots\dots(5)$$

Lakukan eliminasi pada persamaan (4) dan Persamaan (5) untuk mendapatkan i_1 dan i_3 sebagai berikut :

$$2 i_1 - 2 i_3 = 2$$

$$\underline{2 i_3 - i_1 = 2} \quad +$$

$$i_1 = 4 \text{ Ampere}$$

Substitusikan nilai i_1 ini ke persamaan (2)

$$i_1 - 2 i_2 = 2$$

$$4 - 2 i_2 = 2 \quad \longrightarrow \quad i_2 = 1 \text{ Ampere}$$

Substitusikan nilai i_1 dan i_2 ini ke persamaan (1)

$$i_3 = i_2 + i_1$$

$$i_3 = 1 + 4 = 5 \text{ Ampere}$$

Sehingga daya yang terdisipasi pada masing-masing hambatan adalah

Pada R_1 : $P_1 = i_1^2 R_1$

$$P_1 = 4^2 \cdot 1 = 16 \text{ J/s}$$

Pada R_2 : $P_2 = i_2^2 R_2$

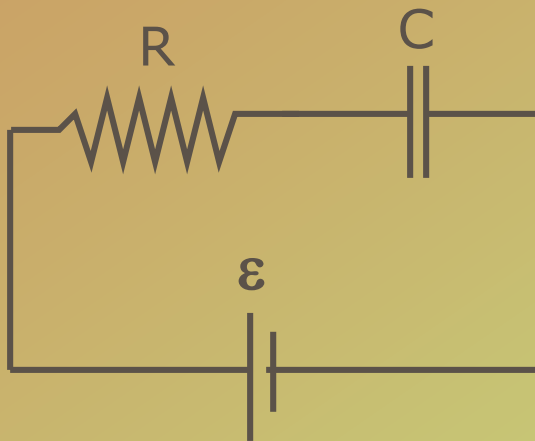
$$P_2 = 1^2 \cdot 2 = 2 \text{ J/s}$$

Pada R_3 : $P_3 = i_3^2 R_3$

$$P_3 = 5^2 \cdot 2 = 50 \text{ J/s}$$

Rangkaian RC

Tinjau rangkaian yang terdiri dari sebuah komponen hambatan dan sebuah kapasitor dan dihubungkan dengan sumber tegangan baterai.



Pada saat $t = 0$ kapasitor belum terisi muatan sehingga beda potensial di antara kedua ujung kapasitor tersebut sama dengan nol.

Setelah arus mengalir dari baterai, maka muatan mulai terkumpul pada kapasitor sehingga menghasilkan persamaan potensial sebagai berikut :

$$\varepsilon = V_R + V_C$$

Dimana $V_R = R I$ dan

$$V_C = \frac{Q}{C}$$

Sehingga

$$\varepsilon = Ri + \frac{Q}{C}$$

Diferensialkan persamaan ini terhadap t :

$$0 = R \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \frac{dQ}{dt}$$

$$0 = R \frac{di}{dt} + \frac{i}{C}$$

$$\frac{di}{dt} = -\frac{i}{RC}$$

$$\frac{di}{i} = -\frac{dt}{RC}$$

Dengan mengintegrasikan persamaan diatas

$$\int \frac{di}{i} = \int -\frac{dt}{RC}$$

$$\ln i + K_1 = -\frac{t}{RC} + K_2$$

$$\ln i = -\frac{t}{RC} + K_2 - K_1 \quad \text{Def } K_2 - K_1 = K$$

$$e^{-\frac{t}{RC} + K} = i$$

Dengan mensyaratkan bahwa pada $t = 0$ arus yang mengalir maksimum, maka

$$e^{-\frac{t}{RC}+K} = i \rightarrow e^{-\frac{t}{RC}} \cdot e^K = i, \text{ def } e^K = K'$$

$$i = K' e^{-\frac{t}{RC}}$$

$$\text{pada } t=0 \quad i = \frac{\varepsilon}{R} \rightarrow K' = \frac{\varepsilon}{R}$$

sehingga

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

Ini menunjukkan bahwa arus di dalam rangkaian RC tidak konstan karena pada rangkaian tersebut terjadi proses pengisian muatan ke dalam kapasitor.

Dengan mengingat $dq = i(t) dt$

$$dq = \frac{\varepsilon}{R} e^{-\frac{t}{RC}} dt$$

Integralkan persamaan tersebut

$$q(t) = \int_0^t \frac{\varepsilon}{R} e^{-\frac{t}{RC}} dt$$
$$q(t) = \frac{\varepsilon}{R} RC e^{-\frac{t}{RC}} \Big|_0^t$$

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