

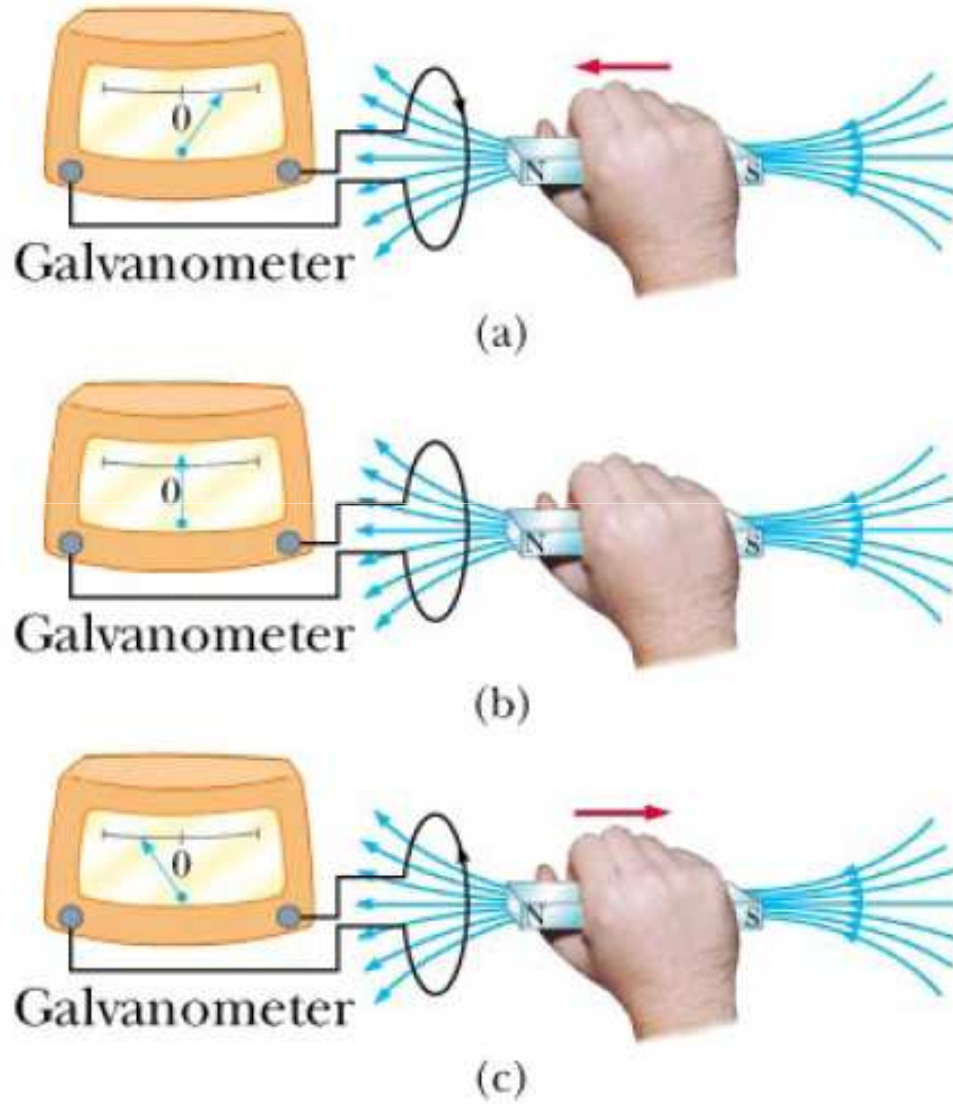
# INDUKSI ELEKTROMAGNETIK

# Hukum Faraday

Persamaan Maxwell Keempat (Terakhir)

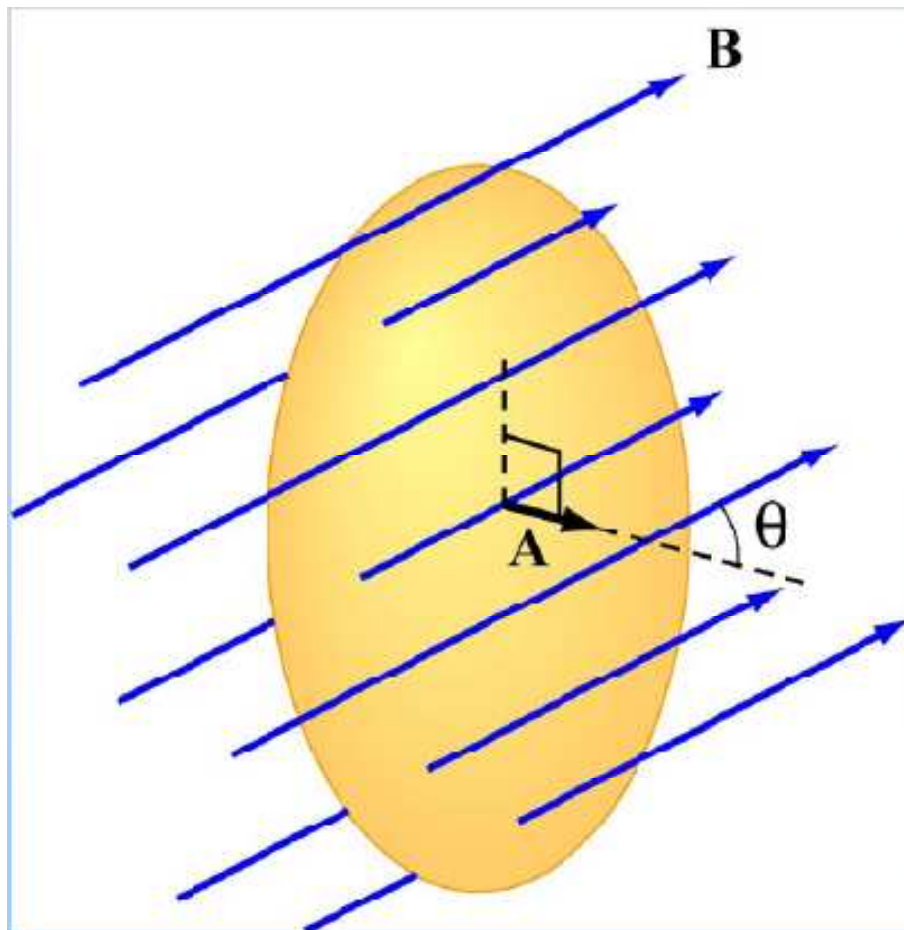
# Induksi Elektromagnetik

Animasi 8.1



# Fluks Magnet yang Menembus Loop

Analog dengan Fluks Listrik (Hukum Gauss)



(1)  $\mathbf{B}$  Uniform

$$\Phi_B = B_{\perp} A = BA \cos \theta = \vec{\mathbf{B}} \cdot \vec{\mathbf{A}}$$

(2)  $\mathbf{B}$  Non-Uniform

$$\Phi_B = \int_S \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{A}}$$

Animasi 8.2

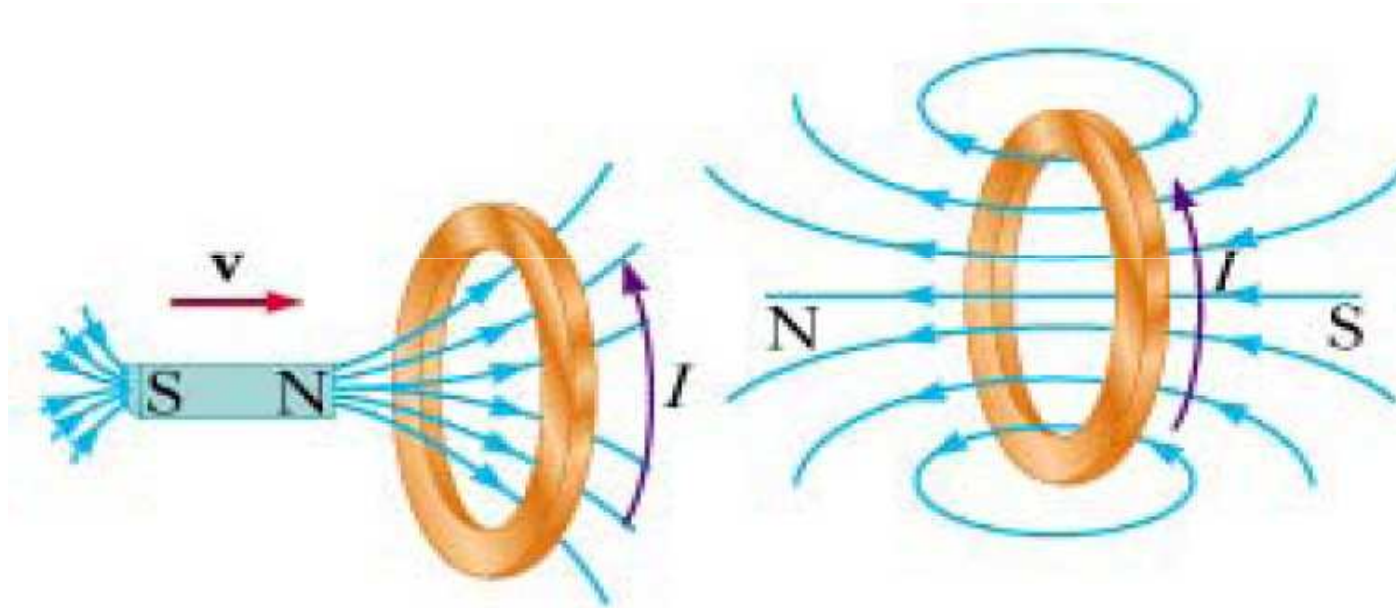
## Hukum Faraday tentang Induksi

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi_B}{dt}$$

Perubahan fluks magnet  
menginduksi GGL

# Tanda Negatif? Hukum Lenz

GGL Induksi yang muncul berarah melawan perubahan fluks yang menyebabkannya



---

**Hukum Lenz:** Arus induksi menghasilkan medan magnet yang melawan perubahan fluks magnet yang menghasilkan arus induksi tersebut

## Cara untuk Menginduksi GGL

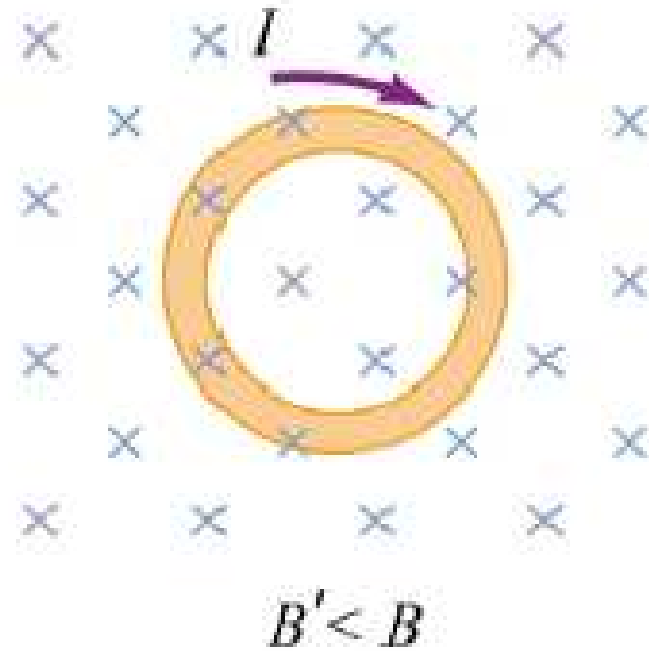
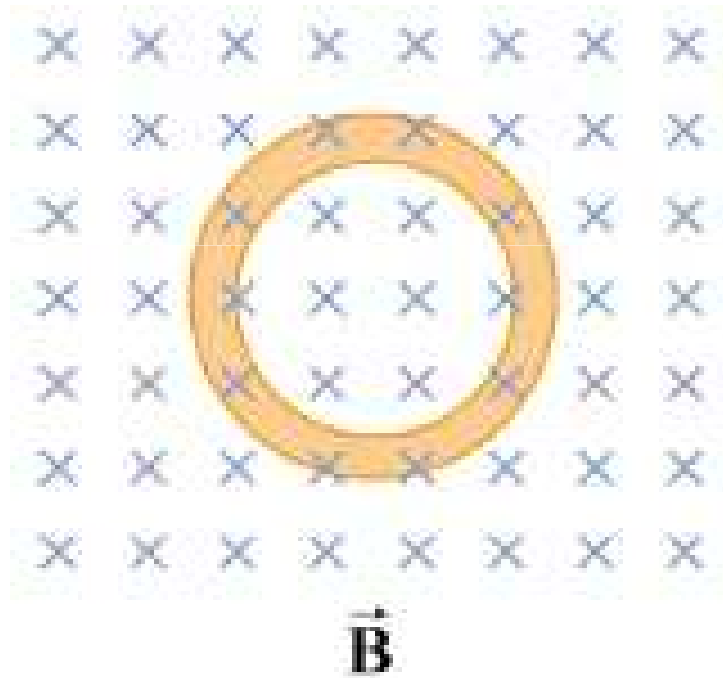
$$\mathcal{E} = -N \frac{d}{dt} (BA \cos \theta)$$

Kuantitas yang berubah terhadap waktu:

1. Besar B
2. Luas A yang dilingkupi loop
3. Sudut  $\theta$  antara B dan normal loop

# Cara untuk Menginduksi GGL

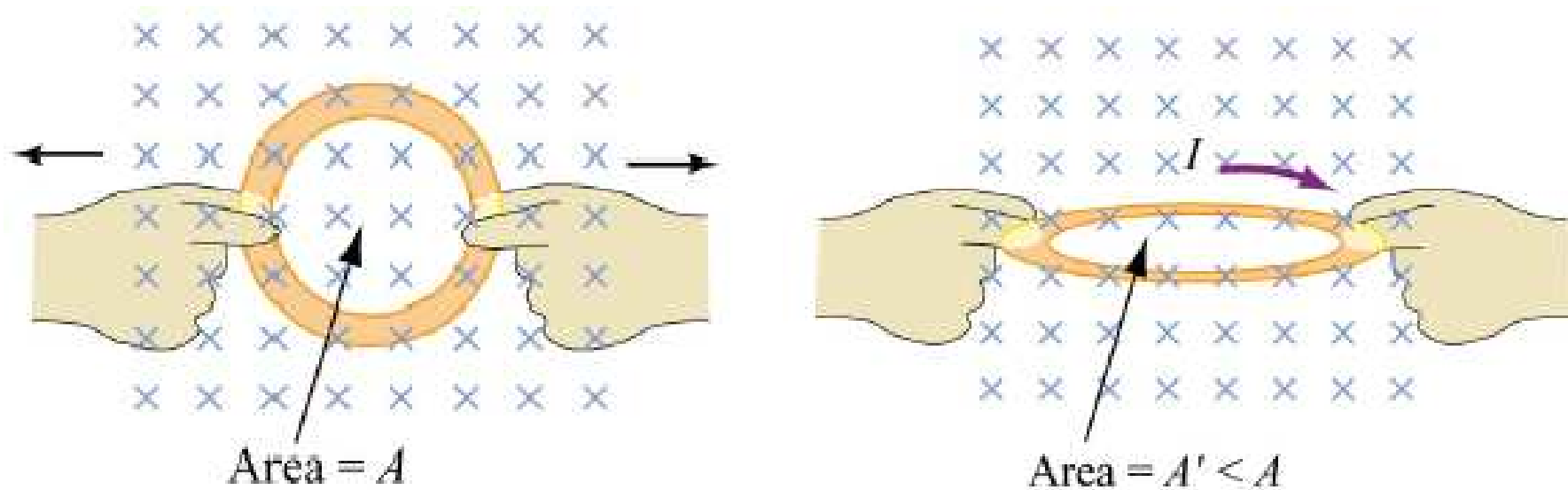
1. Besar B berubah terhadap waktu:





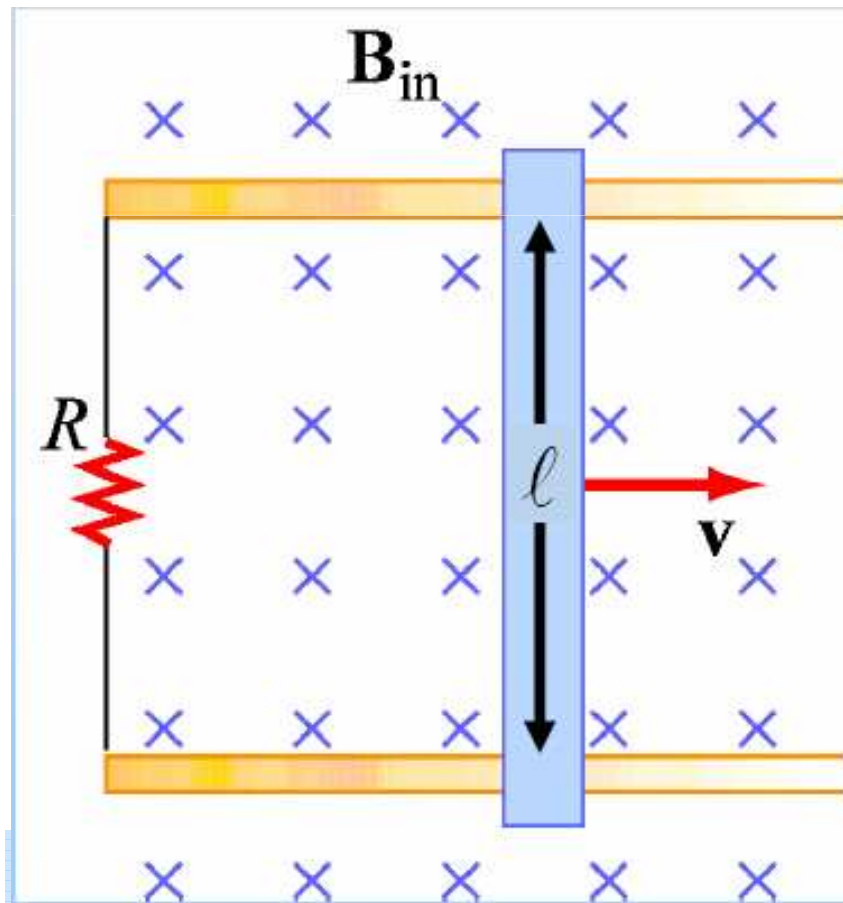
# Cara untuk Menginduksi GGL

2. Luas  $A$  yang dilingkupi loop berubah terhadap waktu:



# Problem: Perubahan Luas

Batang konduktor ditarik sepanjang dua rel konduktor dalam daerah bermedan magnet uniform  $B$  dengan kecepatan konstan  $v$

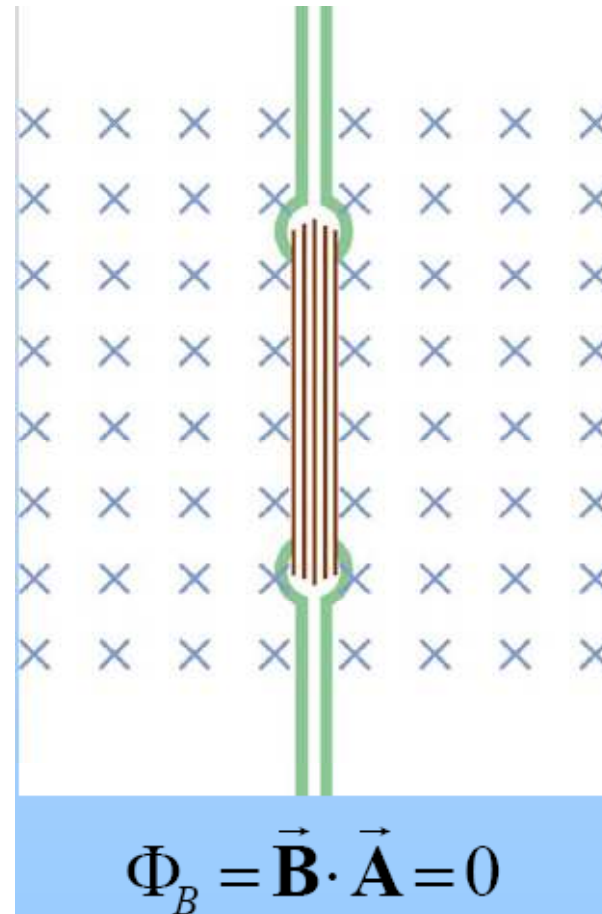
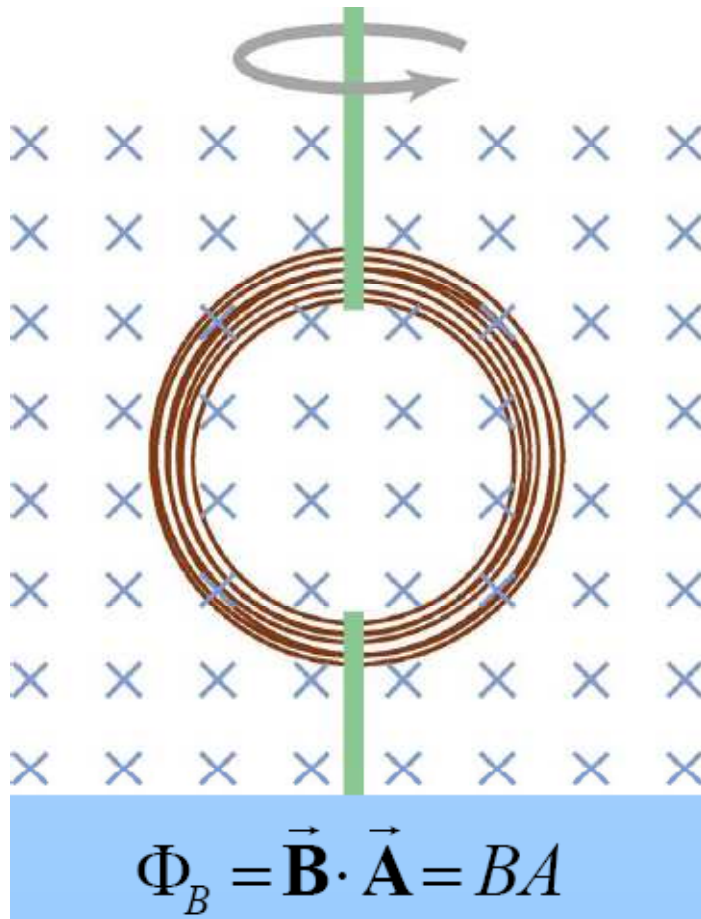


1. Arah arus induksi?
2. Arah resultan gaya?
3. Besar GGL?
4. Besar arus?
5. Daya eksternal yang harus disuplai agar batang bergerak dengan kecepatan konstan  $v$ ?

Animasi 8.6

# Cara untuk Menginduksi GGL

3. Sudut  $\theta$  antara  $\mathbf{B}$  dan normal loop berubah terhadap waktu:



# Hukum Faraday

Persamaan Maxwell Terakhir

# Persamaan Maxwell

Penghasil Medan Listrik:

$$\oiint_S \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{A}} = \frac{Q_{in}}{\epsilon_0}$$

Hukum Gauss

$$\oint_C \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{s}} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

Hukum Faraday

Penghasil Medan Magnet:

$$\oiint_S \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{A}} = 0$$

Hukum Gauss Magnet

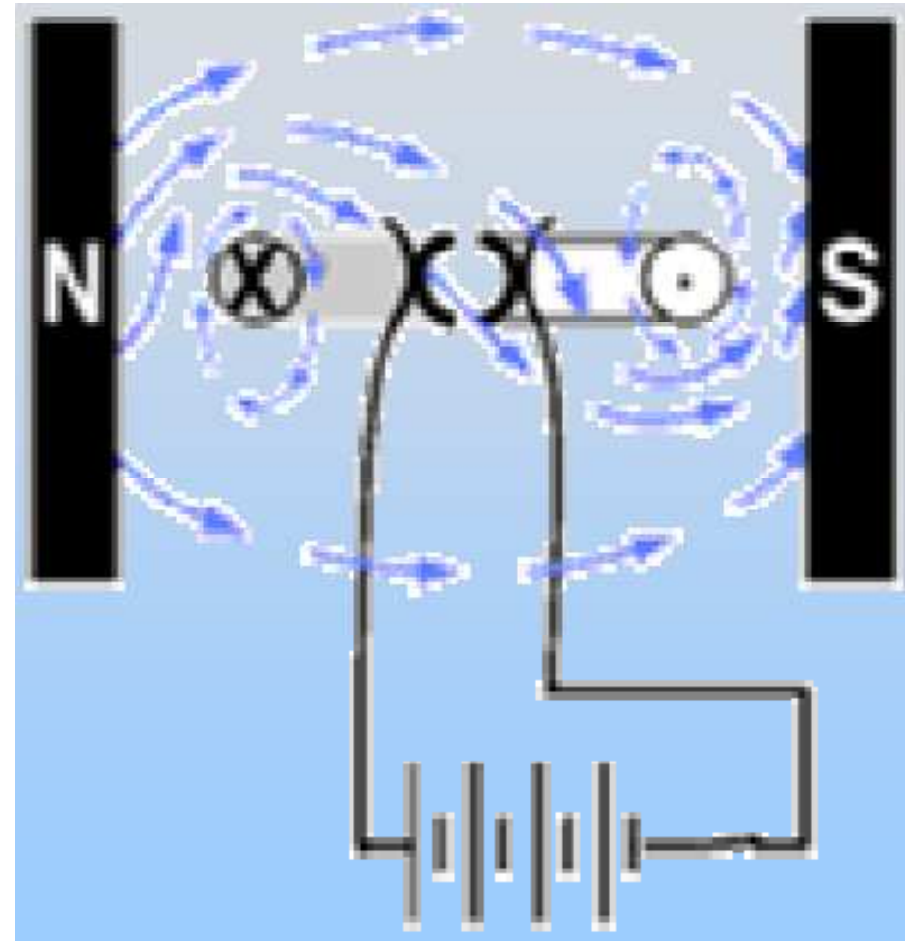
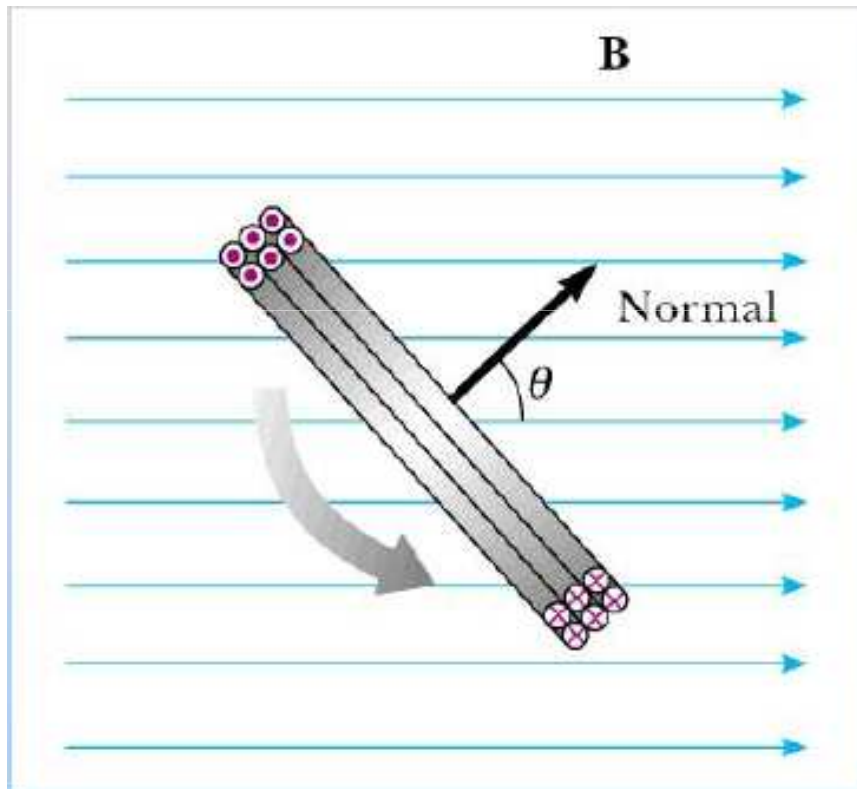
$$\oint_C \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{s}} = \mu_0 I_{enc}$$

Hukum Ampere

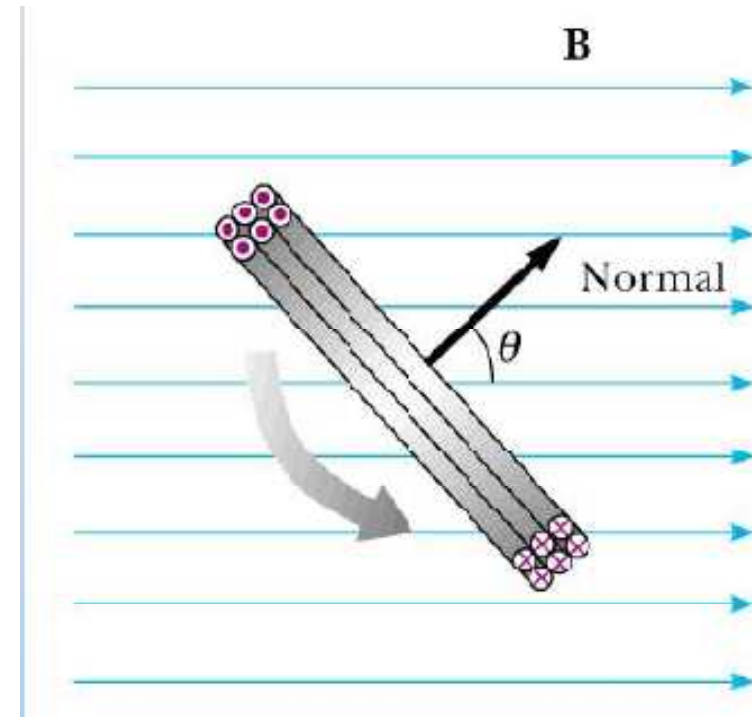
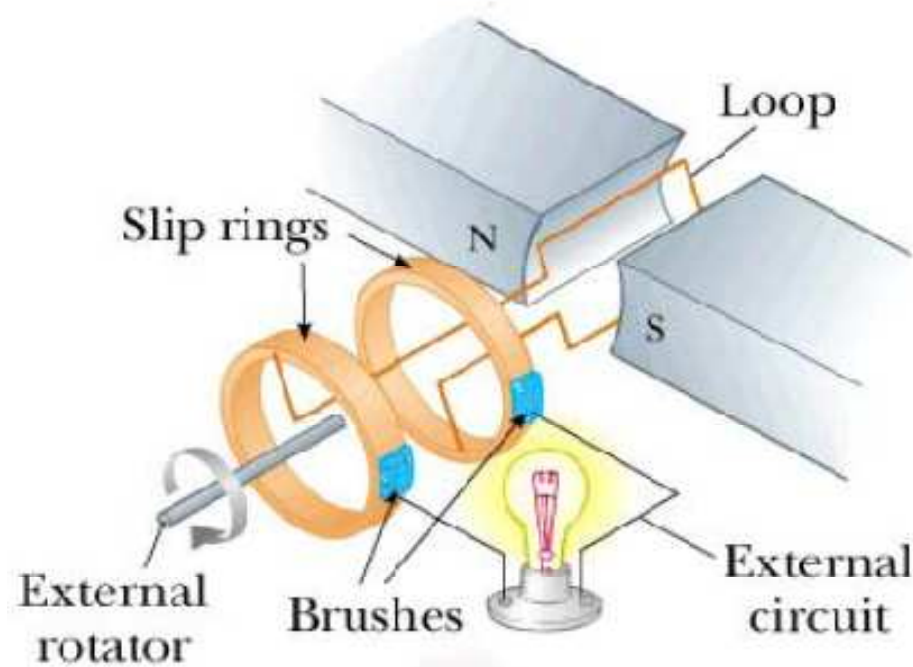
# **Teknologi**

**Banyak Aplikasi dari  
Hukum Faraday**

# DC Motor (magnetostatik)



# Motor & Generator



$$\Phi_B = BA \cos \theta = BA \cos \omega t$$

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi_B}{dt} = -NAB \frac{d}{dt} (\cos \omega t) = NAB \omega \sin \omega t$$

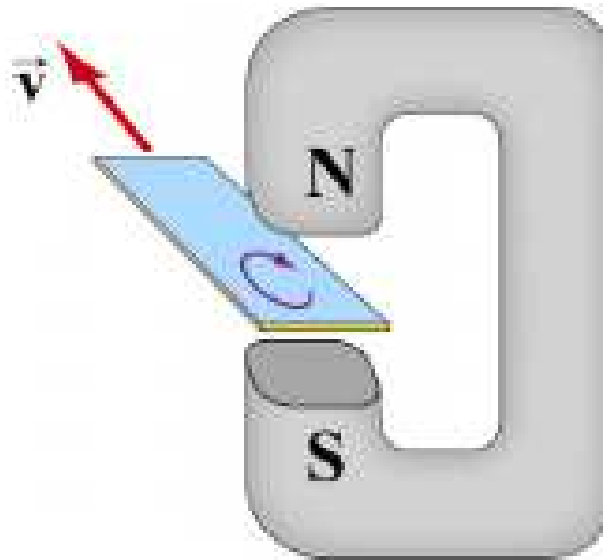
Animasi 8.3

Animasi 8.4



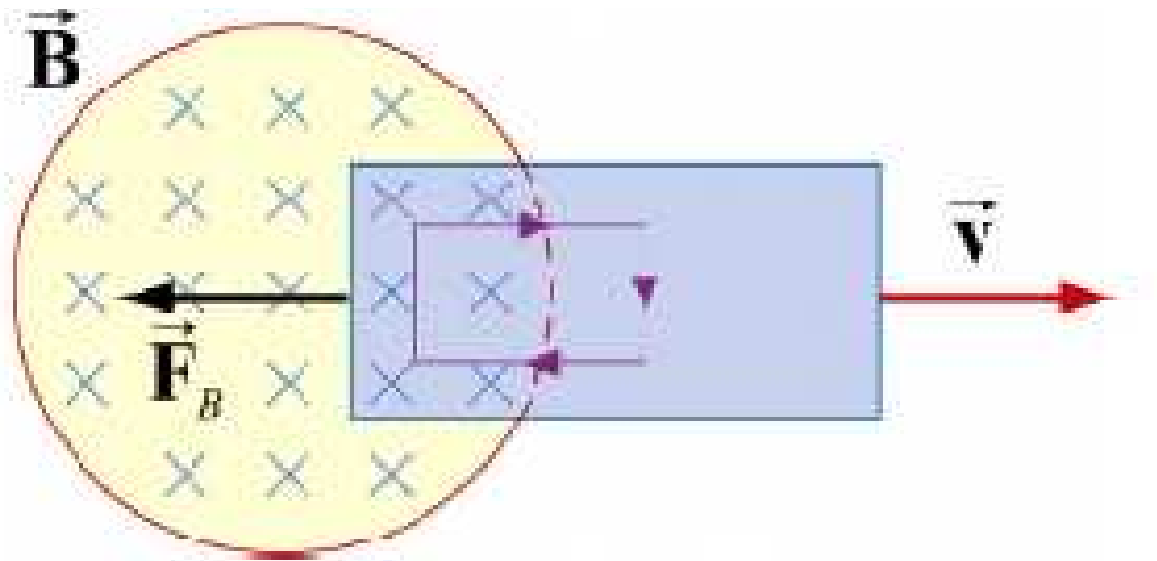
# Arus Pular (Eddy Current)

- Ketika sebuah konduktor bergerak melalui medan magnet, arus terinduksi sebagai hasil dari perubahan fluks magnet.
- Jika konduktor yang digunakan bukan berbentuk loop, arus tetap dapat terinduksi.
- Arus induksi yang muncul akan melingkar dan dinamakan *arus eddy*.



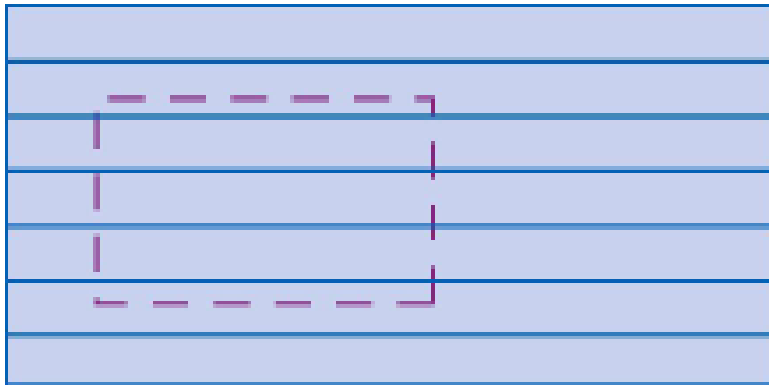
# Arus Pesar (Eddy Current)

Arus eddy yang terinduksi juga menghasilkan gaya magnet yang melawan gerak, sehingga konduktor mengalami kesulitan untuk bergerak melewati medan magnet



# Arus Pular (Eddy Current)

- Konduktor memiliki hambatan R
- Arus induksi muncul maka muncul daya disipasi
- Daya disipasi dapat direduksi dengan cara:



Lempengan konduktor  
dibungkus isolator



Lempengan konduktor  
dipotong-potong

Animasi 8.5

# Hukum Faraday tentang Induksi

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi_B}{dt}$$

Perubahan fluks magnet  
menginduksi GGL

Lenz: Induksi *melawan* perubahan

## Cara untuk Menginduksi GGL

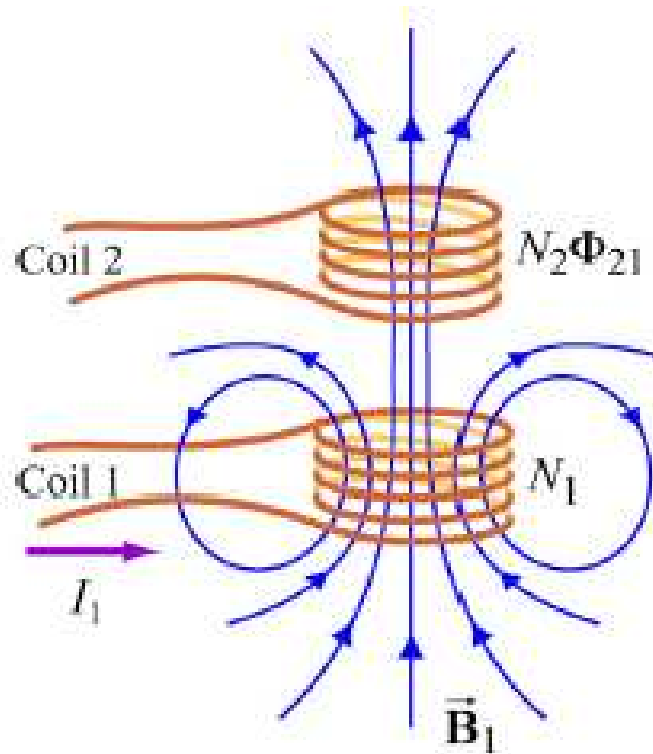
$$\mathcal{E} = -N \frac{d}{dt} (BA \cos \theta)$$

Kuantitas yang dapat berubah terhadap waktu:

1. Nilai/besar B
2. Luas A yang dilingkupi loop
3. Sudut  $\theta$  antara B dan normal loop

- **Induktansi**

# Induktansi Bersama



$$\varepsilon_{21} = -N_2 \frac{d\Phi_{21}}{dt} = -\frac{d}{dt} \iint_{\text{coil 2}} \vec{B}_1 \cdot d\vec{A}_2$$

Perubahan fluks pada koil 2 sebanding dengan perubahan arus pada koil 1

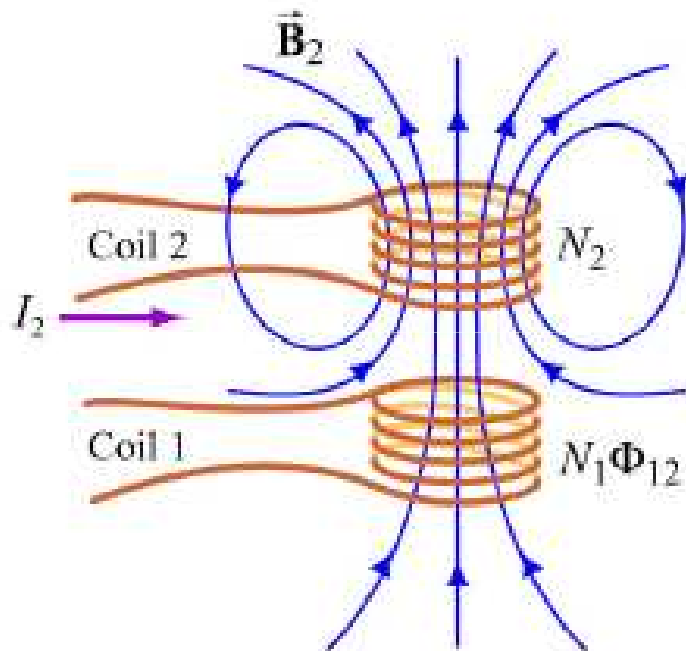
$$N_2 \frac{d\Phi_{21}}{dt} = M_{21} \frac{dI_1}{dt}$$

$$M_{21} = \frac{N_2 \Phi_{21}}{I_1}$$

Konstanta kesebandingannya  $M_{21}$  dinamakan **induktansi bersama**

# Induktansi Bersama

Kebalikannya:



$$\mathcal{E}_{12} = -N_1 \frac{d\Phi_{12}}{dt} = -\frac{d}{dt} \iint_{\text{coil 1}} \vec{B}_2 \cdot d\vec{A}_1$$

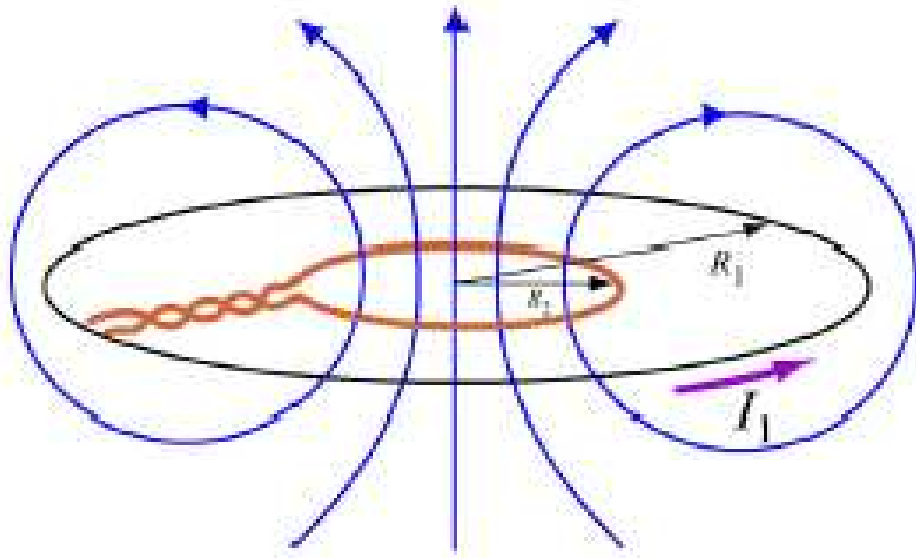
$$N_1 \frac{d\Phi_{12}}{dt} = M_{12} \frac{dI_2}{dt}$$

$$M_{12} = \frac{N_1 \Phi_{12}}{I_2}$$

$$M_{12} = M_{21} \equiv M$$



# Induktansi Bersama



Carilah induktansi bersamanya ( $R_1 > R_2$ )!

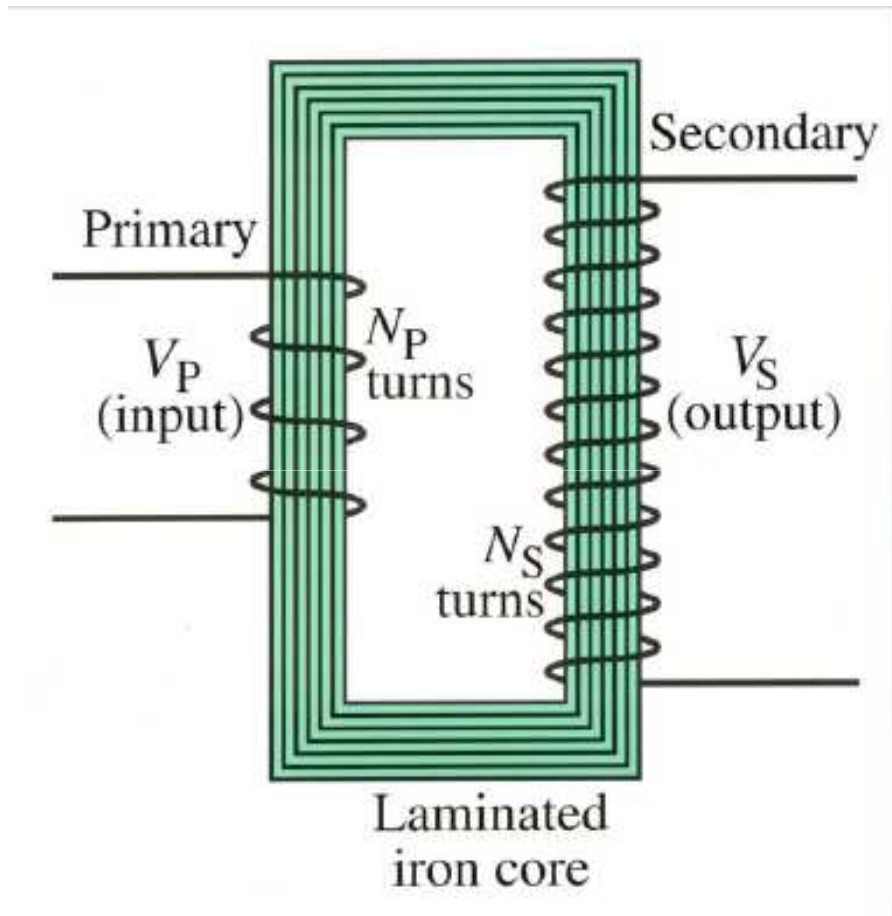
Jawab:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2R_1}$$

$$\Phi_{21} = B_1 A_2 = \left( \frac{\mu_0 I_1}{2R_1} \right) \pi R_2^2 = \frac{\mu_0 \pi I_1 R_2^2}{2R_1}$$

$$M = \frac{\Phi_{21}}{I_1} = \frac{\mu_0 \pi R_2^2}{2R_1} \quad M \text{ hanya bergantung pada faktor geometri}$$

# Transformer



$$\mathcal{E}_p = N_p \frac{d\Phi_B}{dt}$$

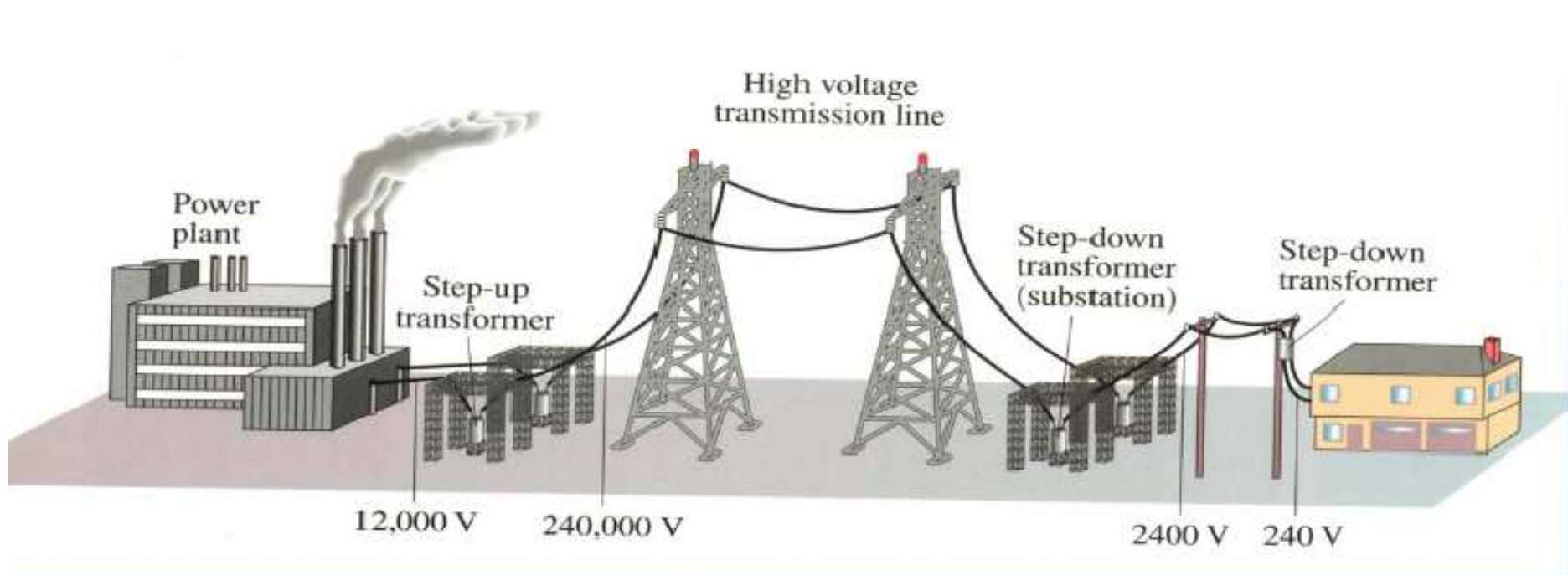
$$\mathcal{E}_s = N_s \frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\frac{\mathcal{E}_s}{\mathcal{E}_p} = \frac{N_s}{N_p}$$

$N_s > N_p$ : step-up transformer

$N_s < N_p$ : step-down transformer

# Transmisi Daya Listrik



Daya yang hilang dapat direduksi jika ditransmisikan pada tegangan tinggi

# Contoh: Jalur Transmisi

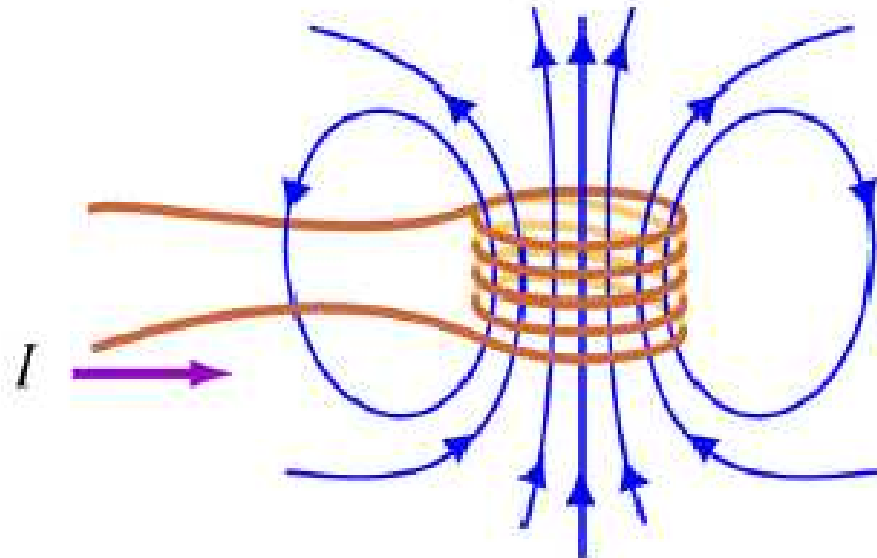
Rata-rata 120 kW daya listrik dikirim dari sebuah pembangkit listrik. Jalur transmisi memiliki hambatan total 0.40 Ω. Hitunglah daya yang hilang jika daya dikirim pada (a) 240 V, dan (b) 24,000 V.

$$(a) \quad I = \frac{P}{V} = \frac{1.2 \times 10^5 W}{2.4 \times 10^2 V} = 500 A \quad \text{83\% loss!!}$$
$$P_L = I^2 R = (500 A)^2 (0.40 \Omega) = 100 kW$$

$$(b) \quad I = \frac{P}{V} = \frac{1.2 \times 10^5 W}{2.4 \times 10^4 V} = 5.0 A \quad \text{0.0083\% loss}$$
$$P_L = I^2 R = (5.0 A)^2 (0.40 \Omega) = 10 W$$

# Induktansi Diri

Sebuah koil dialiri arus listrik.  
Arus konstan!  
Arus berubah thd waktu!



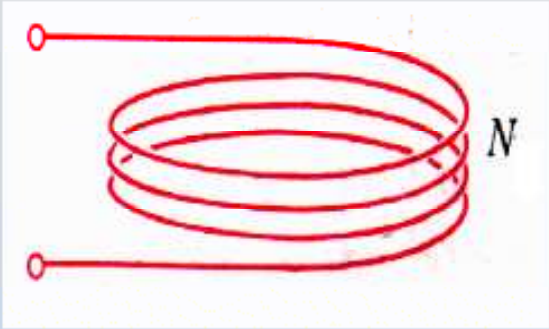
$$\varepsilon_L = -N \frac{d\Phi_B}{dt} = -N \frac{d}{dt} \iint \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

$$\varepsilon_L = -L \frac{dI}{dt}$$

$$L = \frac{N\Phi_B}{I}$$

Secara fisis, Induktansi L adalah ukuran dari sebuah “resistansi” induktor untuk merubah arus; semakin besar L, semakin kecil laju perubahan arus.

# Menghitung Induktansi Diri



A diagram of a solenoid with  $N$  turns, shown as a red wire with two terminals on the left. The number of turns  $N$  is indicated to the right of the coil.

$$L = \frac{N\Phi}{I}$$

Unit: Henry  
 $1 \text{ H} = 1 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A}}$

1. Asumsikan arus  $I$  mengalir
2. Hitung  $B$  akibat adanya  $I$  tersebut
3. Hitung fluks akibat adanya  $B$  tersebut
4. Hitung induktansi dirinya

# Problem: Solenoid

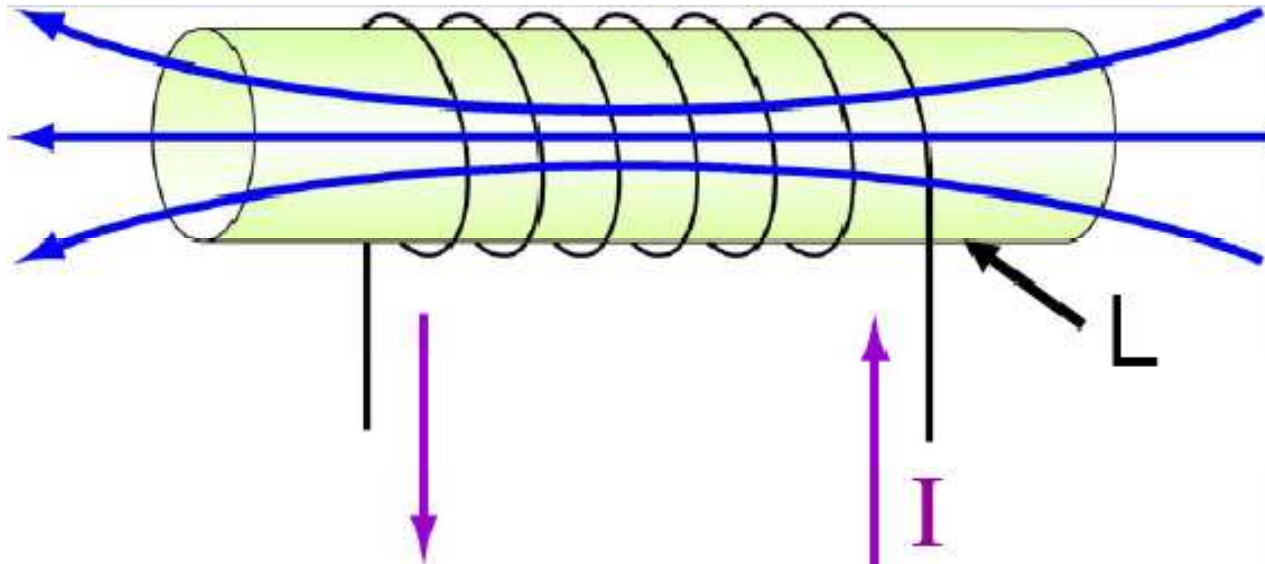
Hitung induktansi diri  $L$  dari sebuah solenoid ( $n$  lilitan per meter, panjang  $l$ , radius  $R$ )

INGAT:

1. Asumsikan arus  $I$  mengalir
2. Hitung  $B$  akibat adanya  $I$  tersebut
3. Hitung fluks akibat adanya  $B$  tersebut
4. Hitung induktansi dirinya

$$L = \frac{N \Phi}{I}$$

# Sifat Induktor



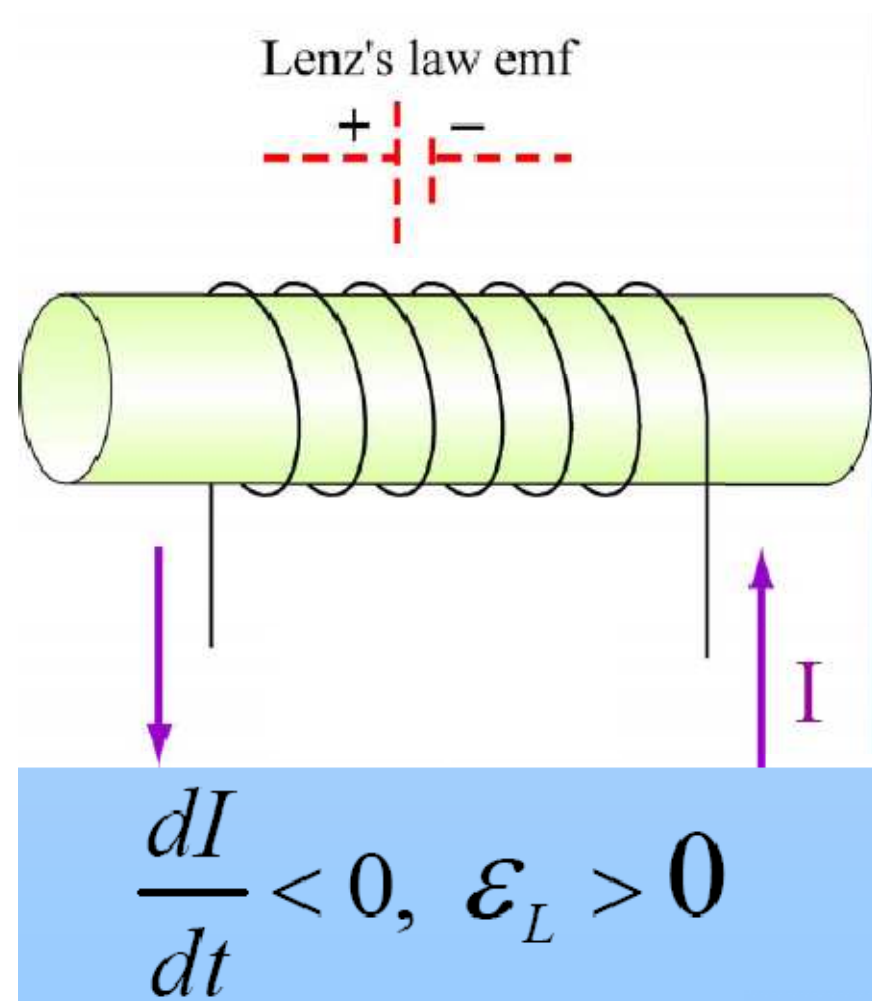
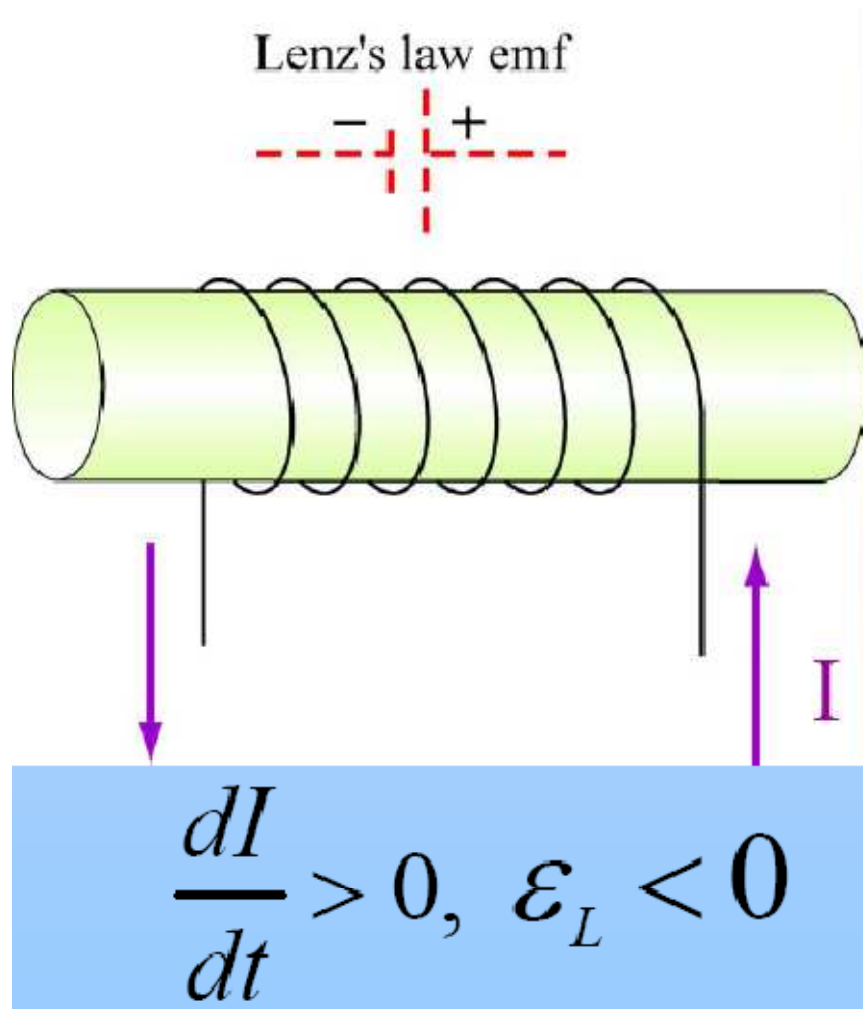
$$\mathcal{E} = -L \frac{dI}{dt}$$

Induktor dengan arus yang konstan tidak berarti apa-apa (tidak berpengaruh)



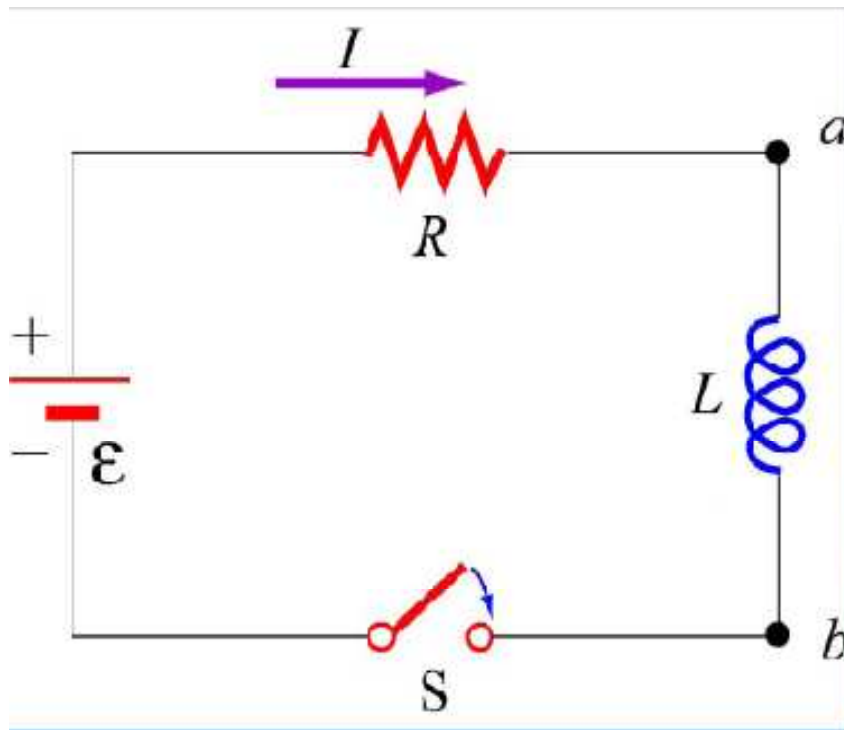
# GGL Balik

$$\mathcal{E} = -L \frac{dI}{dt}$$



# Induktor dalam Rangkaian

Induktor: Elemen listrik yang dapat menunjukkan induktansi diri



Simbol:

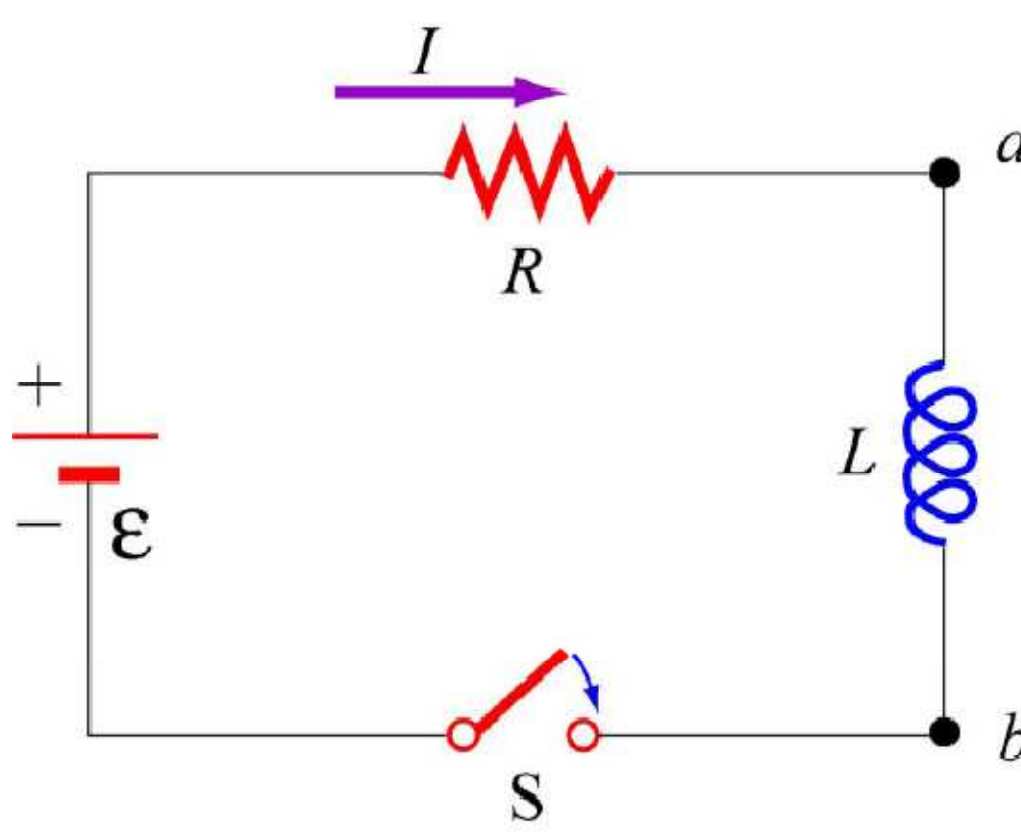


Ketika dilalui arus:

$$\mathcal{E} = -L \frac{dI}{dt}$$

Induktor tidak menyukai perubahan, tetapi menyukai keadaan stabil (steady).  
Kebalikan Kapasitor!

# Rangkaian LR

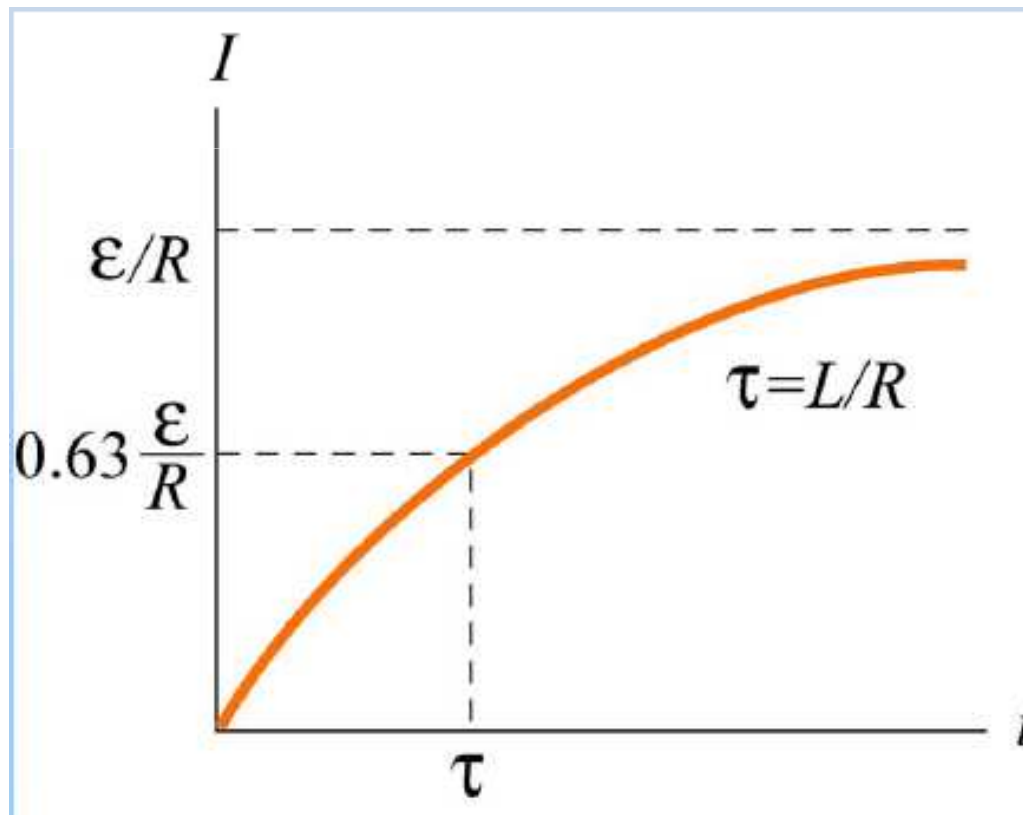


$$\sum_i V_i = \varepsilon - IR - L \frac{dI}{dt} = 0$$

# Rangkaian LR

$$\varepsilon - IR - L \frac{dI}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{L}{R} \frac{dI}{dt} = - \left( I - \frac{\varepsilon}{R} \right)$$

Solusi persamaan di atas ketika saklar ditutup pada  $t = 0$ :



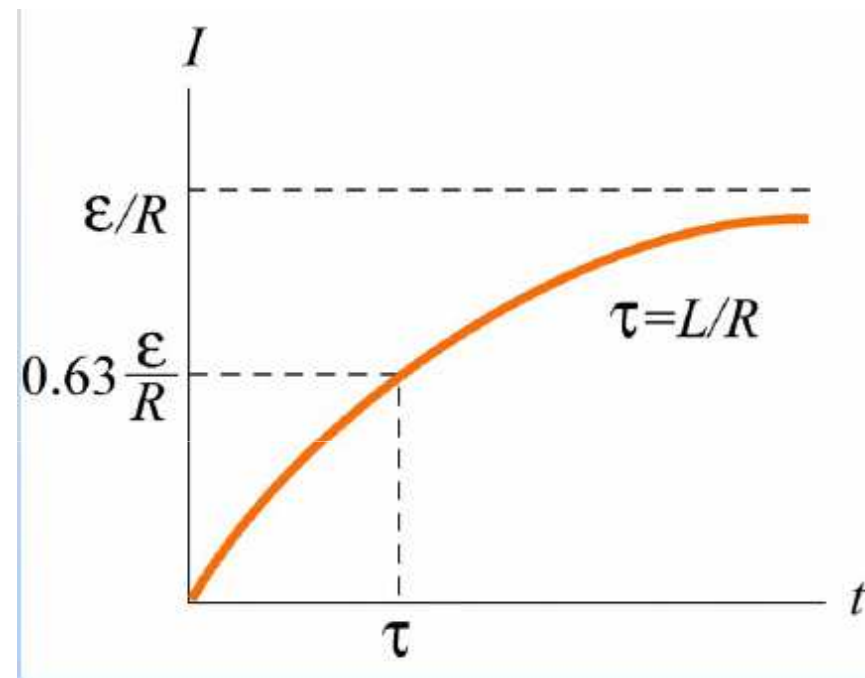
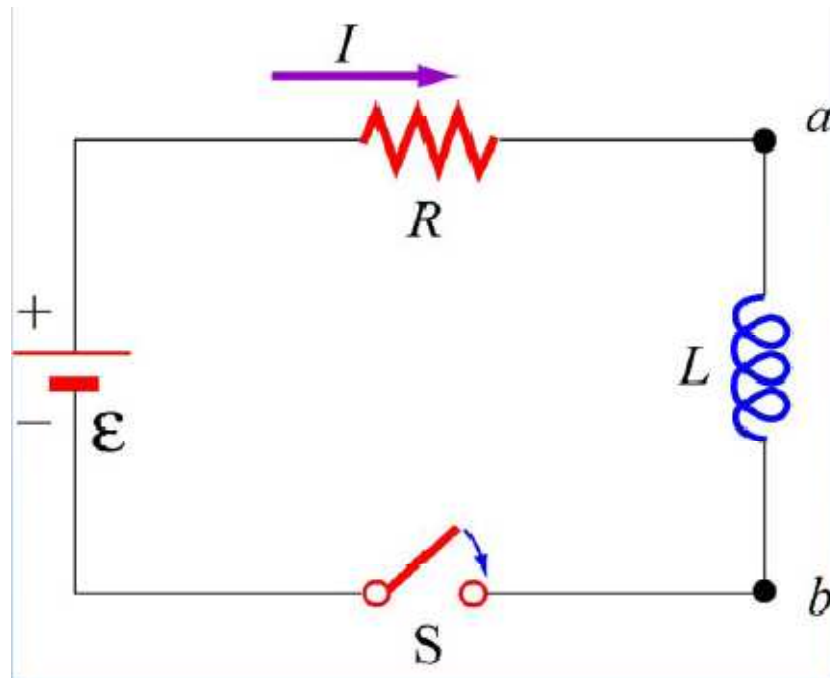
$$I(t) = \frac{\varepsilon}{R} \left( 1 - e^{-t/\tau} \right)$$

$$\tau = \frac{L}{R} : LR$$

Konstanta waktu

Animasi 9.1

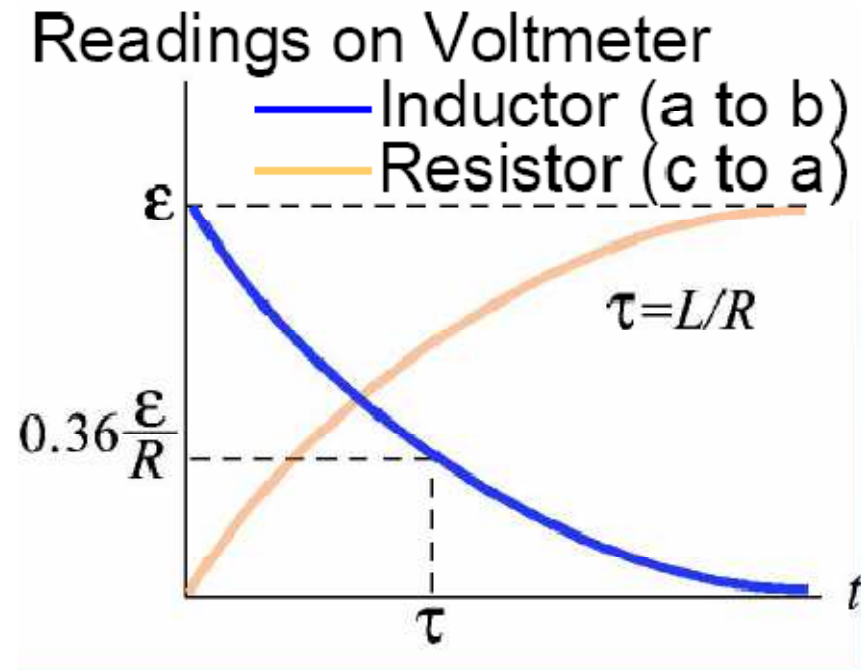
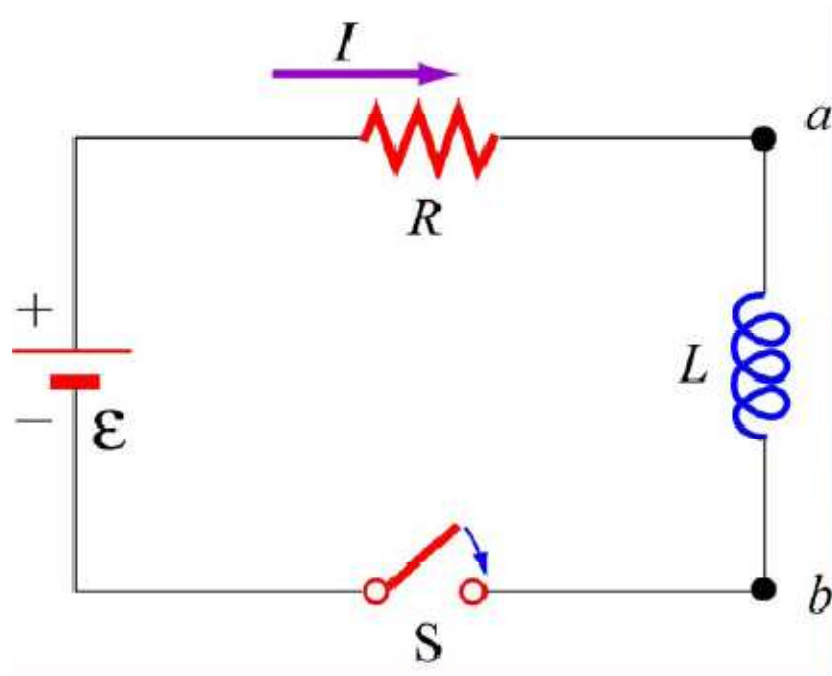
# Rangkaian LR



$t=0^+$ : Arus mencoba untuk berubah. Induktor bekerja sekeras mungkin untuk menghentikannya

$t=\infty$ : Arus stabil (steady). Induktor tidak berpengaruh.

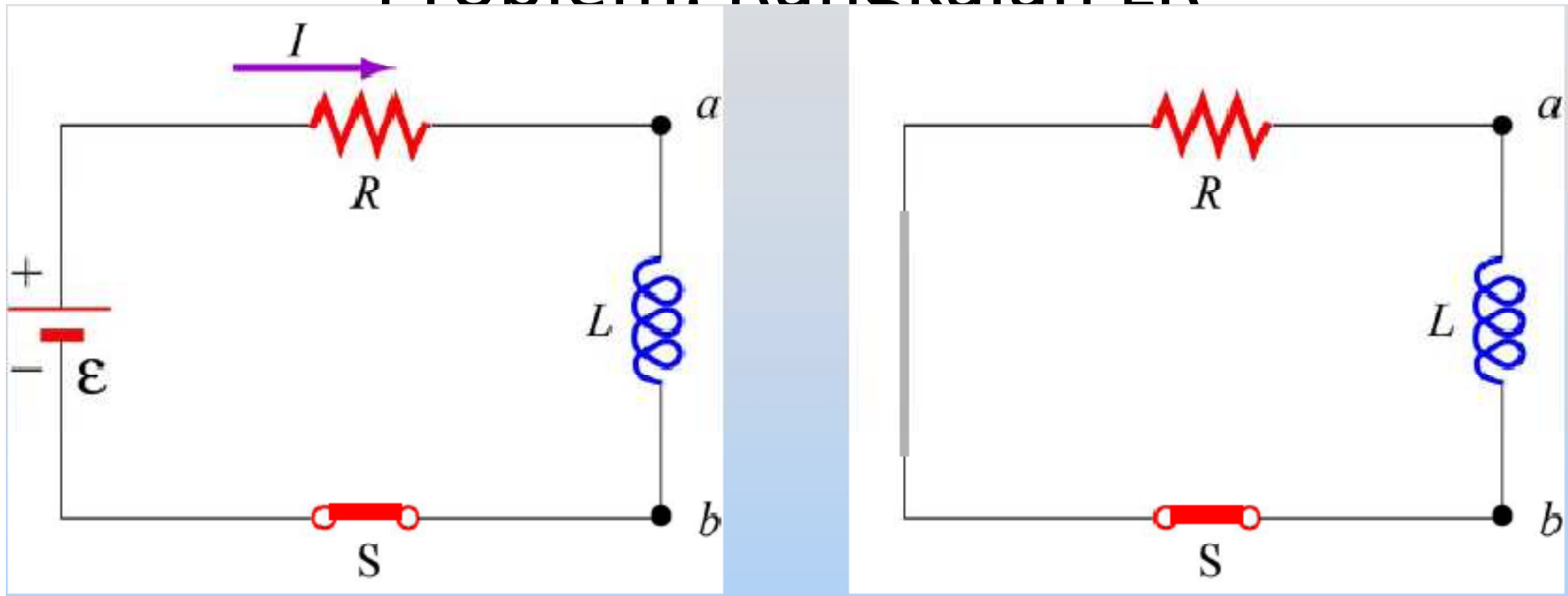
# Rangkaian LR



$t=0^+$ : Arus mencoba untuk berubah. Induktor bekerja sekeras mungkin untuk menghentikannya

$t=\infty$ : Arus stabil (steady). Induktor tidak berpengaruh.

## Problem: Rangkaian LR

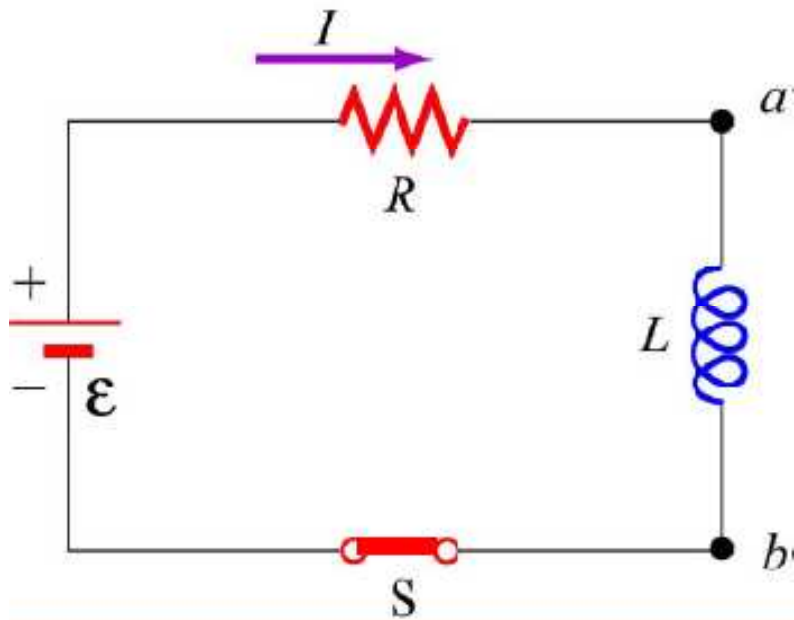


1. Kemanakah arah arus sesaat setelah batrei dilepas (pada  $t=0^+$ )? At  $t=\infty$ ?
2. Tulis persamaan diferensial untuk rangkaian di atas!
3. Pecahkan dan plot  $I$  vs.  $t$  dan voltmeter vs.  $t$

# Energi dalam Induktor



# Energi Tersimpan dalam Induktor



$$\mathcal{E} = +IR + L \frac{dI}{dt}$$

$$I\mathcal{E} = I^2 R + L I \frac{dI}{dt}$$

$$I\mathcal{E} = I^2 R + \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} L I^2 \right)$$

Baterei  
Penyuplai

Resistor  
Disipasi

Induktor  
Penyimpan

## Energi Tersimpan dalam Induktor

$$U_L = \frac{1}{2} L I^2$$

Dimanakah energi di simpan?

# Contoh: Solenoid

Solenoida ideal, panjang  $l$ , radius  $R$ ,  $n$  lilitan/sat.panjang, arus  $I$ :

$$B = \mu_0 n I$$

$$L = \mu_0 n^2 \pi R^2 l$$

$$U_B = \frac{1}{2} L I^2 = \frac{1}{2} (\mu_0 n^2 \pi R^2 l) I^2$$

$$U_B = \left( \frac{B^2}{2\mu_0} \right) \pi R^2 l$$

Rapat Energi

Volume

# Rapat Energi

Energi disimpan dalam medan magnet!

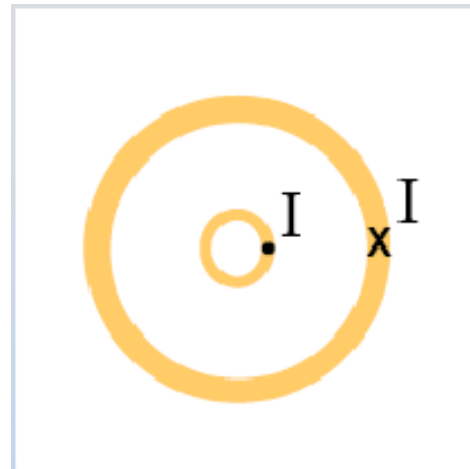
$$u_B = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

: Rapat Energi Magnet

$$u_E = \frac{\epsilon_0 E^2}{2}$$

: Rapat Energi Listrik

# Problem: Kabel Koaksial

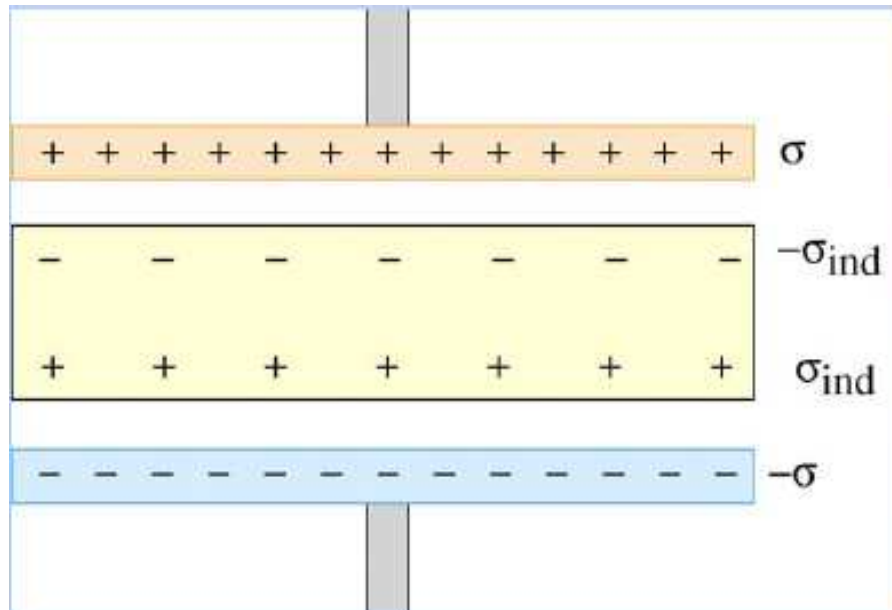
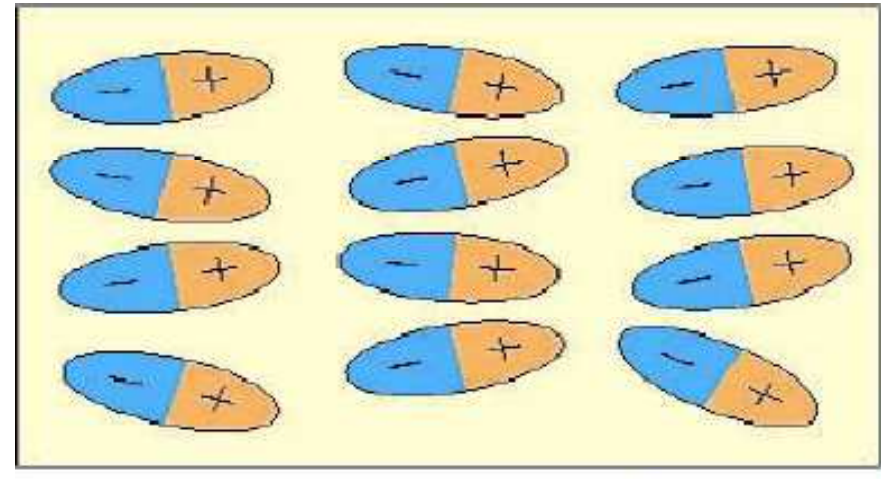
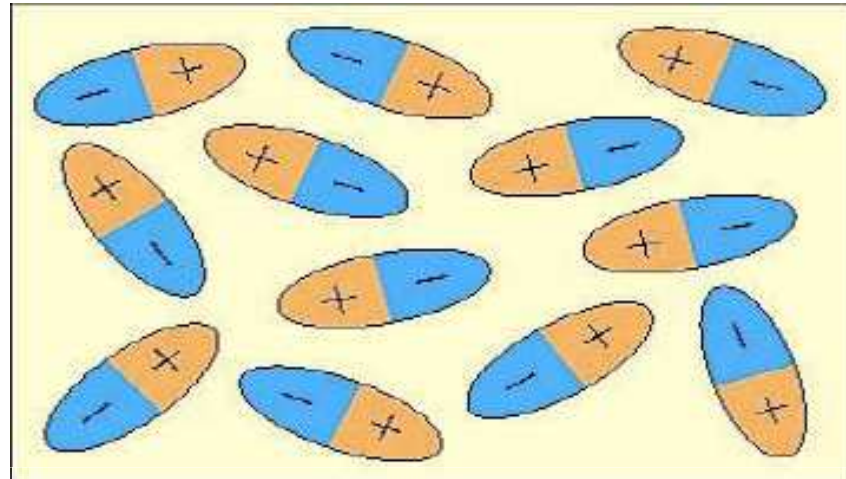


Radius dalam:  $r = a$   
Radius luar:  $r = b$

1. Berapa besar energi yang tersimpan per satuan panjang?
2. Berapa induktansinya per satuan panjang?

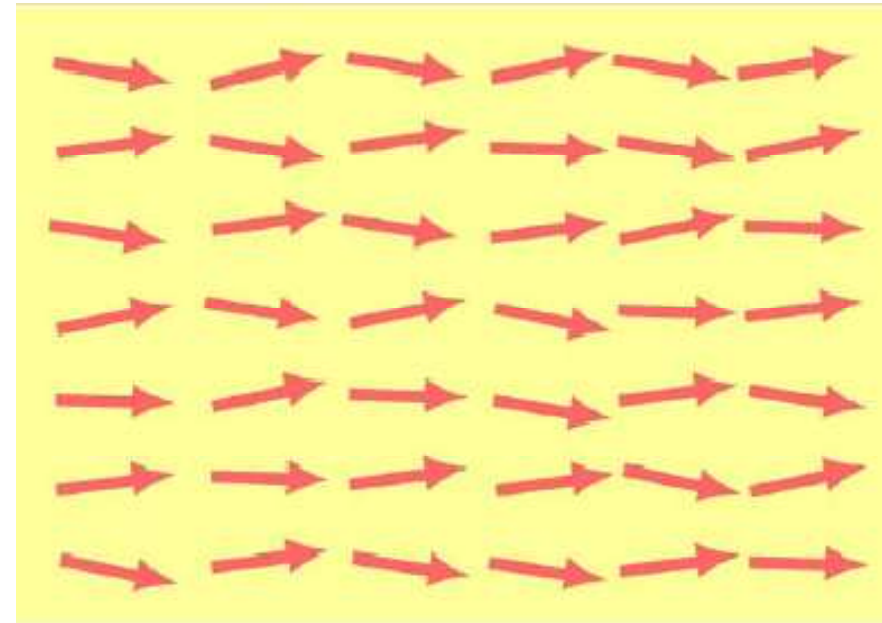
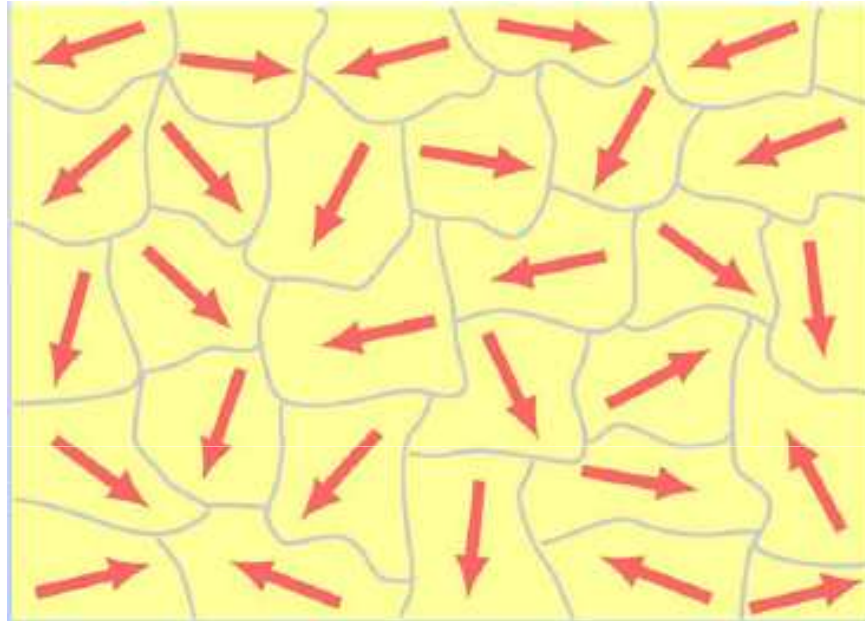
# Material Magnetik

# Riview: Dielektrik Polar



Polarisasi Dielektrik  
*melemahkan* Medan Listrik!

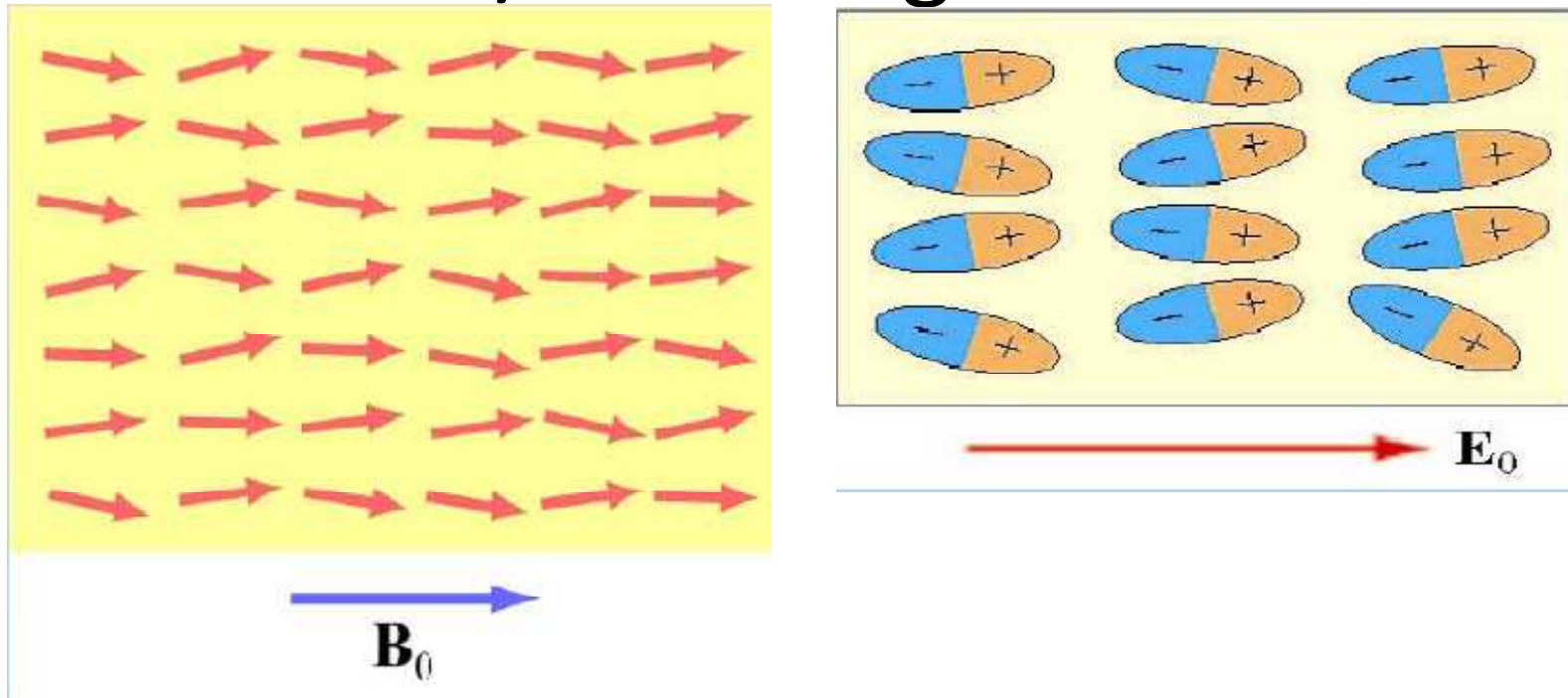
# Para/Ferromagnetisme



Adanya medan magnetik luar  $B_0$  cenderung untuk mensejajarkan momen magnetik atom



# Para/Ferromagnetisme



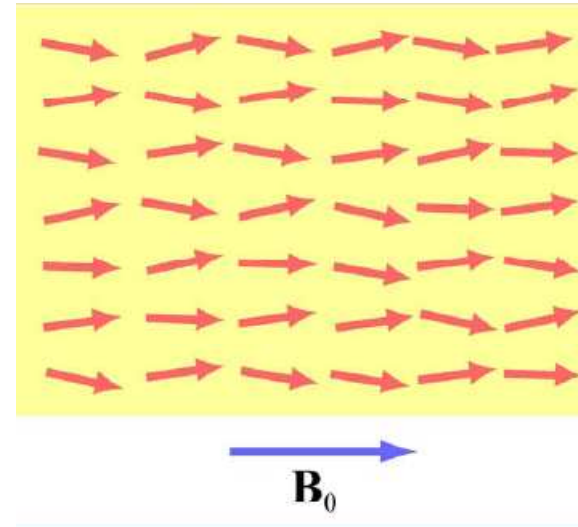
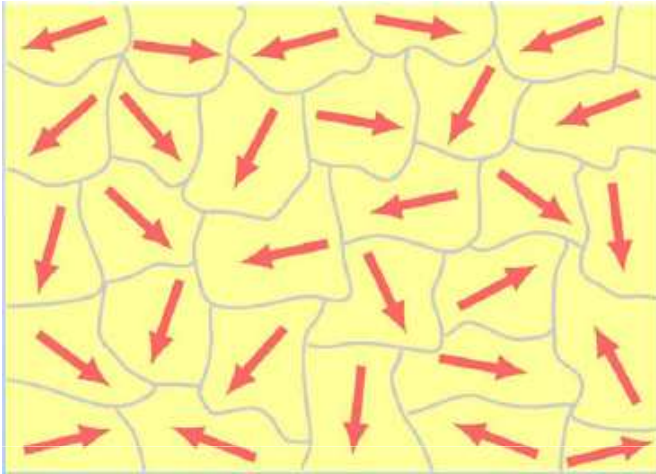
Momen yang searah *menguatkan* medan magnet B

$$\vec{\mathbf{B}} = \kappa_m \vec{\mathbf{B}}_0$$

Bandingkan dengan:

$$\vec{\mathbf{E}} = \frac{\vec{\mathbf{E}}_0}{\kappa_E}$$

# Para/Ferromagnetisme

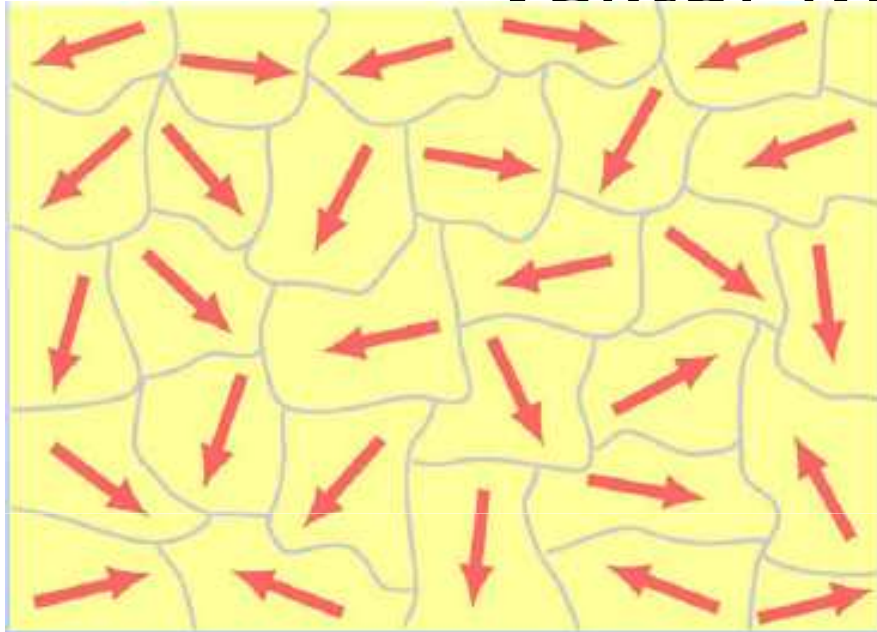


Paramagnet:  $B_0$  hilang, momen magnet acak

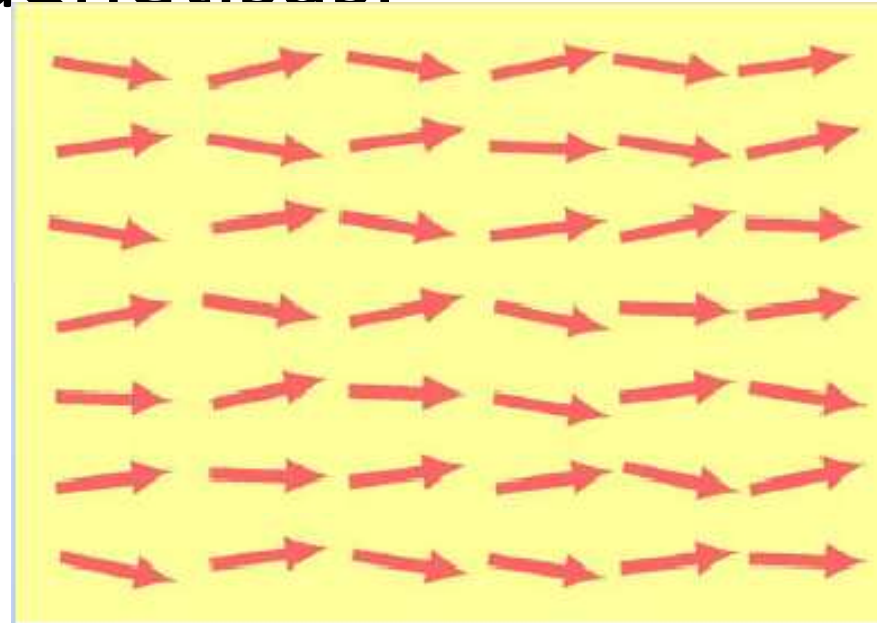
Ferromagnet:  $B_0$  hilang, sebagian tetap terarah

## Diamagnet?

# Vektor Magnetisasi



**M=0**



**M>0**

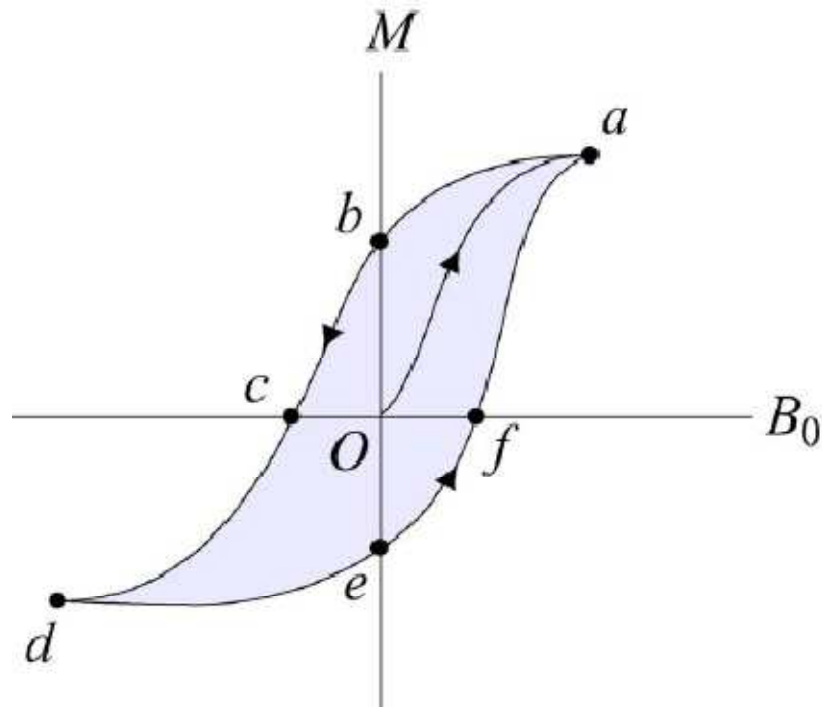
Digunakan untuk mendefinisikan "Magnetisasi" dari material:

$$\vec{\mathbf{M}} = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \vec{\mu}_i = \frac{\vec{\mu}}{V}$$

$$\vec{\mathbf{B}} = \vec{\mathbf{B}}_0 + \mu_0 \vec{\mathbf{M}}$$

# Histeresis pada Ferromagnet

Magnetisasi  $M$  dari sebuah material ferromagnetik material bergantung pada *history* dari bahan



Magnetisasi tetap meskipun  $B_0$  hilang !!!

# Tugas 7