

The background is a dark, abstract composition featuring vibrant, blurred light trails in shades of red, orange, and yellow. These trails curve and swirl across the frame, creating a sense of dynamic movement. Overlaid on these are semi-transparent, geometric shapes, including a prominent red triangle and various circular and polygonal forms in lighter tones, which add depth and complexity to the visual field.

Medan Elektromagnetik

W5

Konduktor dan Bagian-bagiannya

Reza Diharja, S.Si., M.T. | Prodi Teknik Elektro | Universitas Jayabaya

Outline Presentasi

5 Konduktor

5.1 Kelajuan Drift (Drift Velocity)

5.2 Resistansi

5.3 Hukum Joule



Concept Question 5-1: What is a conservative field?

Concept Question 5-2: Why is the electric potential at a point in space always defined relative to the potential at some reference point?

Concept Question 5-3: Why is it usually easier to compute V for a given charge distribution and then find E using $E = -\nabla V$ than to compute E directly by applying Coulomb's law?

Konduktor

Parameter elektromagnetik yang berkaitan dengan material pada medium adalah permitivitas listrik (ϵ), permeabilitas magnetik (μ) dan konduktivitas (σ).

Dikatakan **homogen** ketika parameter-parameter tersebut tidak berubah dari titik ke titik, dikatakan **isotropik** ketika mereka independen terhadap arahnya.

► The *conductivity* of a material is a measure of how easily electrons can travel through the material under the influence of an externally applied electric field. ◀

Material yang digolongkan sebagai **konduktor** adalah **logam** sedangkan golongan lain adalah **dielektrik (isolator)** menurut pada nilai magnitudo konduktivitasnya.

- Konduktor memiliki jumlah elektron lepas yang banyak pada kulit terluar atomnya, tanpa adanya medan listrik eksternal, elektron-elektron tersebut bebas bergerak ke arah maupun kecepatan yang *random*.
- Pergerakan yang bebas ini menciptakan arus $\text{net} = 0$ yang melewati konduktor.
- Dengan memberikan medan listrik eksternal, elektron-elektron akan bergerak (pindah) dari satu atom ke arah yang berlawanan dengan medan eksternal tersebut. Perpindahan ini memunculkan **Kerapatan Arus Konduksi (J)**

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (\text{A/m}^2) \quad (5.1)$$

σ adalah konduktivitas material (S/m)

► A *perfect dielectric* is a material with $\sigma = 0$. In contrast, a *perfect conductor* is a material with $\sigma = \infty$. Some materials, called superconductors, exhibit such a behavior. ◀

► The conductivity of a material depends on several factors, including temperature and the presence of impurities. In general, σ of metals increases with decreasing temperature. Most superconductors operate in the neighborhood of absolute zero. ◀

Tabel 5.1 Konduktivitas material pada 20°C

Material	Conductivity, σ (S/m)
<i>Conductors</i>	
Silver	6.2×10^7
Copper	5.8×10^7
Gold	4.1×10^7
Aluminum	3.5×10^7
Iron	10^7
Mercury	10^6
Carbon	3×10^4
<i>Semiconductors</i>	
Pure germanium	2.2
Pure silicon	4.4×10^{-4}
<i>Insulators</i>	
Glass	10^{-12}
Paraffin	10^{-15}
Mica	10^{-15}
Fused quartz	10^{-17}



Gambar 5.1 Contoh superkapasitor

▷The three aforementioned names refer to variations on an energy storage device (**Gambar 5.1**) known by the technical name **electrochemical double-layer capacitor (EDLC)**, in which energy storage is realized by a hybrid process that incorporates features from both the traditional electrostatic capacitor and the electrochemical voltaic battery. ◁



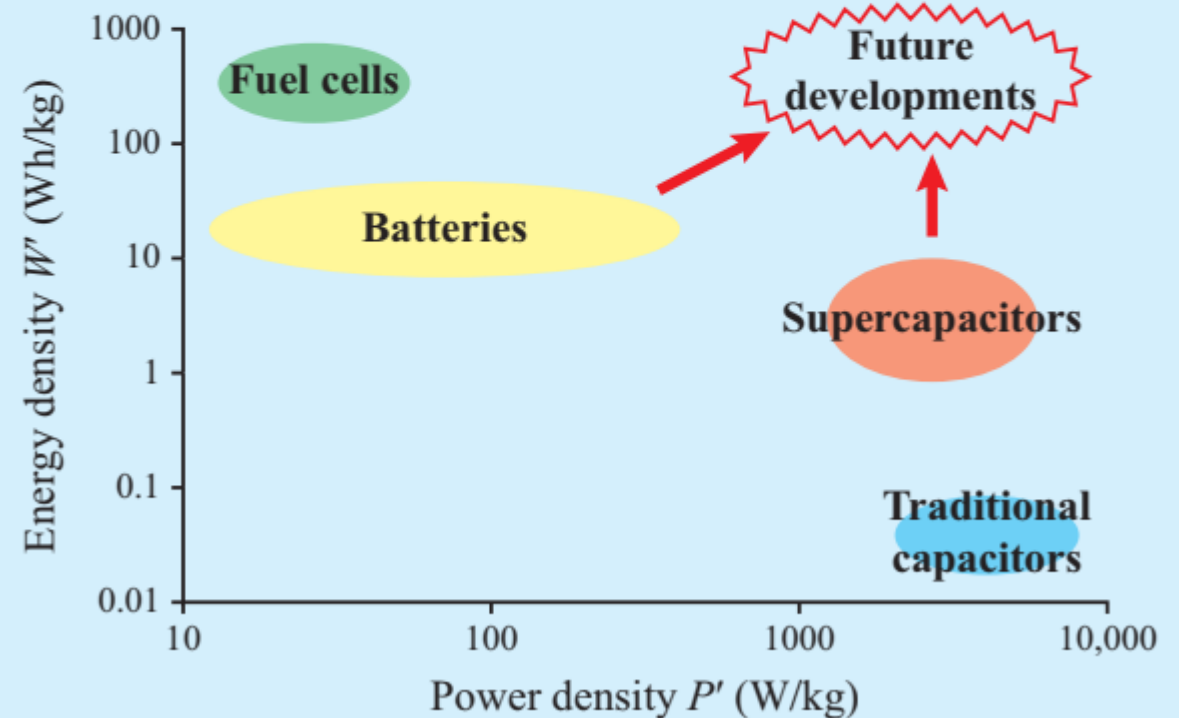
Gambar 5.2 Berbagai peralatan yang menggunakan superkapasitor

► The energy storage capacity of a traditional capacitor is about four orders of magnitude smaller than the energy density capability of a lithium-ion battery. ◀

▲ Supercapacitors are capable of storing 100 to 1000 times more energy than a traditional capacitor but 10 times less than a battery (**Gambar 5.3**). On the other hand, supercapacitors can discharge their stored energy in a matter of seconds when compared with hours for a battery. ▲

Energy Storage Devices

Feature	Traditional Capacitor	Supercapacitor	Battery
Energy density W' (Wh/kg)	$\sim 10^{-2}$	1 to 10	5 to 150
Power density P' (W/kg)	1,000 to 10,000	1,000 to 5,000	10 to 500
Charge and discharge rate T	10^{-3} sec	~ 1 sec to 1 min	~ 1 to 5 hrs
Cycle life N_c	∞	$\sim 10^6$	$\sim 10^3$



Gambar 5.3 Perbandingan kemampuan penyimpanan energi dari beberapa komponen

Kelajuan Drift (*Drift Velocity*)

Kelajuan drift $\mathbf{u}_e$ pada elektron di material konduktor memiliki relasi dengan medan listrik eksternal $\mathbf{E}$ yang diberikan, yakni:

$$\mathbf{u}_e = -\mu_e \mathbf{E} \quad (\text{m/s}) \quad (5.2)$$

Pada semikonduktor, arus mengalir karena pergerakan elektron dan lubang (*hole*) dan karena lubang merupakan pembawa muatan positif (*positive-charge carriers*), maka (hole-drift velocity):

$$\mathbf{u}_h = -\mu_h \mathbf{E} \quad (\text{m/s}) \quad (5.3)$$

Dengan menggunakan relasi kerapatan arus ($\mathbf{J}$), $\mathbf{J} = \rho_v \mathbf{u}$ di mana kerapatan arus mengandung komponen elektron ($\mathbf{J}_e$) dan lubang ($\mathbf{J}_h$), maka kerapatan arus konduksi total adalah:

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_e + \mathbf{J}_h$$

$$\mathbf{J} = \rho_{ve} \mathbf{u}_e + \rho_{vh} \mathbf{u}_h \quad (\text{A/m}^2) \quad (5.4)$$

$$\rho_{ve} = -N_e e \text{ dan } \rho_{vh} = N_h e$$

sehingga

$$\mathbf{J} = (-\rho_{ve} \mathbf{u}_e + \rho_{vh} \mathbf{u}_h) \mathbf{E}$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (\text{A/m}^2) \quad (5.5)$$

μ_e adalah mobilitas elektron ($\text{m}^2/\text{V.s}$)

μ_h adalah mobilitas lubang ($\text{m}^2/\text{V.s}$)

ρ_{ve} adalah kerapatan volume elektron

ρ_{vh} adalah kerapatan volume lubang

N_e adalah banyaknya elektron bebas

N_h adalah banyaknya lubang bebas

$$\sigma = -\rho_{ve}\mu_e + \rho_{vh}\mu_h = (N_e\mu_e + N_h\mu_h)e \quad (\text{S/m}),$$

(semiconductor)

$$\sigma = -\rho_{ve}\mu_e = N_e\mu_e e \quad (\text{S/m}).$$

(good conductor)

Perfect dielectric: $\mathbf{J} = 0$,

Perfect conductor: $\mathbf{E} = 0$.

▲ In view of Eq. (5.4), in a perfect dielectric with $\sigma = 0$, $\mathbf{J} = 0$ regardless of $\mathbf{E}$. Similarly, in a perfect conductor with $\sigma = \infty$, $\mathbf{E} = \mathbf{J}/\sigma = 0$ regardless of $\mathbf{J}$. ▲

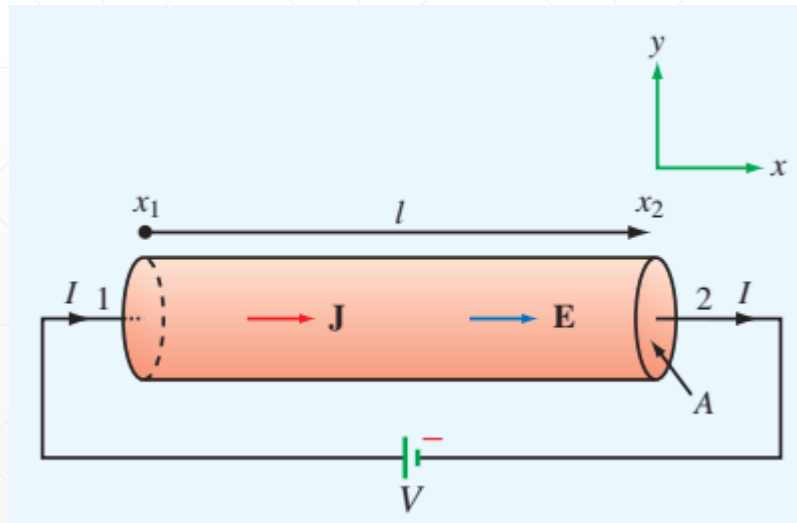
Concept Question 5-4: What are the electromagnetic constitutive parameters of a material?

Concept Question 5-5: What classifies a material as a conductor, a semiconductor, or a dielectric? What is a superconductor?

Concept Question 5-6: What is the conductivity of a perfect dielectric?

Resistansi

- Gambar 5.4 untuk memperlihatkan hukum Ohm di mana sumbu konduktor sepanjang arah x pada titik x_1 dan x_2 , dengan panjang (l) = $x_2 - x_1$.
- Tegangan V diberikan melewati terminal konduktor sehingga memunculkan medan listrik $\mathbf{E} = -\hat{\mathbf{x}}E_x$. Arah medan listrik dimulai dari potensial tinggi (titik 1) ke potensial rendah (titik 2).



Gambar 5.4 Perpotongan melintang resistor, A dan panjang l terhubung dengan sumber tegangan DC

Hubungan antara V dan E_x adalah

$$V = V_1 - V_2 = \int_{x_2}^{x_1} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$$

$$V = V_1 - V_2 = - \int_{x_2}^{x_1} -\hat{\mathbf{x}}E_x \cdot \hat{\mathbf{x}}dl = E_x l \quad (\text{V}) \quad (5.6)$$

Ingat bahwa $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$

$$I = \int_A \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s} = \int_A \sigma \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = \sigma E_x A \quad (\text{A}) \quad (5.7)$$

Ingat bahwa $R = V/I$, maka

$$R = \frac{l}{\sigma A} \quad (\Omega) \quad (5.8)$$

$$R = \frac{V}{I} = \frac{- \int_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}}{\int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s}} = \frac{- \int_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}}{\int_S \sigma \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s}} \quad (\Omega) \quad (5.9)$$

Kebalikannya, konduktansi G adalah $1/R$ dengan satuan Ω^{-1}

Hukum Joule

- Tahukah bahwa ketika medan listrik (elektrostatik) $\mathbf{E}$ hadir pada konduktor, maka akan muncul daya terdisipasi?
- Nilai usaha dikarenakan medan listrik untuk muatan q_e bergerak sepanjang Δl_e dan muatan q_h sepanjang Δl_h adalah

$$\Delta W = \mathbf{F}_e \cdot \Delta \mathbf{l}_e + \mathbf{F}_h \cdot \Delta \mathbf{l}_h \quad (5.10)$$

$$\Delta P = \frac{\Delta W}{\Delta t} = \mathbf{F}_e \cdot \frac{\Delta \mathbf{l}_e}{\Delta t} + \mathbf{F}_h \cdot \frac{\Delta \mathbf{l}_h}{\Delta t} \quad (5.11)$$

$$\Delta P = \mathbf{F}_e \cdot \mathbf{u}_e + \mathbf{F}_h \cdot \mathbf{u}_h$$

$$\Delta P = (\rho_{ve} \mathbf{E} \cdot \mathbf{u}_e + \rho_{vh} \mathbf{E} \cdot \mathbf{u}_h) \Delta v = \mathbf{E} \cdot \mathbf{J} \Delta v \quad (5.12)$$

$$P = \int_v \mathbf{E} \cdot \mathbf{J} d\mathcal{V} \quad (\text{W}) \quad \textbf{(Joule's law)},$$

$$V = IR$$

$$P = IV$$

$$P = I^2 R$$

$$(\text{W}) \quad (5.13)$$