

**Materi Kuliah : Fisika Listrik**

# Potensial Listrik

**Dosen :**

**Tri Surawan M.Si**

**Fakultas Teknik  
Universitas Jayabaya**

# Energi Potensial Listrik

- Ketika sebuah muatan uji  $q_0$  mengalami perpindahan di dalam medan listrik  $\mathbf{E}$ , perubahan energi potensial elektrostatisnya adalah :

$$dU = -q_0 \mathbf{E} \cdot d\ell$$

- Jika muatan dipindahkan dari suatu titik awal  $a$  ke suatu titik akhir  $b$ , perubahan energi potensial elektrostatisnya adalah :

$$\Delta U = U_b - U_a = \int_a^b dU = -\int_a^b q_0 \mathbf{E} \cdot d\ell$$

- Perubahan energi potensial sebanding dengan muatan uji  $q_0$ . Perubahan energi potensial per satuan muatan disebut **beda potensial**.

# Energi Potensial Listrik

- Ketika gaya beraksi pada partikel sehingga bergerak dari titik a ke titik b, maka kerja yang dilakukan adalah :

$$W_{a \rightarrow b} = \int_a^b \vec{F} \cdot d\vec{l} = \int_a^b F \cos \phi \, dl$$

Dimana  $\phi$  adalah sudut antara  $F$  dan  $dl$  untuk setiap titik pada lintasan partikel.

- Kerja dinyatakan sebagai energi potensial  $U$ .

$$W_{a \rightarrow b} = U_a - U_b = -(U_b - U_a) = -\Delta U$$

Jika  $W$  positif maka  $U_a$  lebih besar dari  $U_b$ ,  $U$  negatif dan energi potensial menurun.

- Kekekalan energi potensial menyatakan :

$$K_a + U_a = K_b + U_b$$

Dimana  $K = \frac{1}{2} mv^2$  merupakan energi kinetik partikel.

dan  $U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r}$  adalah energi potensial partikel.

# Contoh soal

Sebuah muatan titik  $q_1 = +2,40 \mu\text{C}$  berada di titik asal. Muatan titik kedua  $q_2 = -4,30 \mu\text{C}$  bergerak dari titik  $x = 0,150 \text{ m}$ ,  $y = 0$  ke titik  $x = 0,250 \text{ m}$ ,  $y = 0,250 \text{ m}$ . Berapa besar kerja yang dilakukan oleh gaya listrik pada  $q_2$ ?

## Penyelesaian :

Misalkan posisi awal  $q_2$  pada titik a dan posisi akhir pada titik b, seperti yang ditunjukkan pada gambar di samping.

$$r_a = 0.150 \text{ m}$$

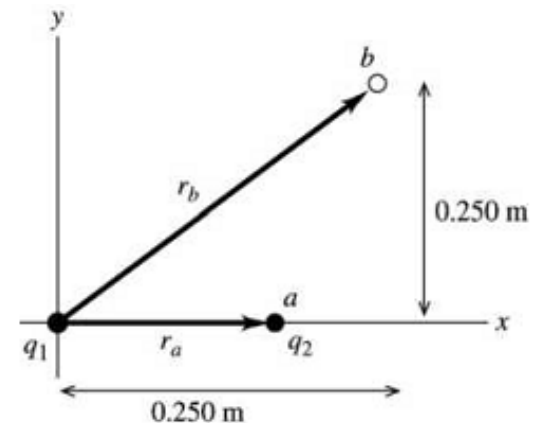
$$r_b = \sqrt{(0.250 \text{ m})^2 + (0.250 \text{ m})^2} = 0.3536 \text{ m}$$

$$U_a = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_a} = (8.988 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(+2.40 \times 10^{-6} \text{ C})(-4.30 \times 10^{-6} \text{ C})}{0.150 \text{ m}} = -0.6184 \text{ J}$$

$$U_b = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_b} = (8.988 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(+2.40 \times 10^{-6} \text{ C})(-4.30 \times 10^{-6} \text{ C})}{0.3536 \text{ m}} = -0.2623 \text{ J}$$

Kerja yang dilakukan oleh gaya listrik pada  $q_2$  adalah :

$$W_{a \rightarrow b} = U_a - U_b = -0.6184 \text{ J} - (-0.2623 \text{ J}) = -0.356 \text{ J}$$



# Beda Potensial Listrik

- Beda potensial  $V_b - V_a$  adalah negatif dari kerja per satuan muatan yang dilakukan oleh medan listrik pada muatan uji  $q_0$  positif jika muatan pindah dari titik a ke titik b.

$$dV = \frac{dU}{q_0} = -\mathbf{E} \cdot d\boldsymbol{\ell}$$

$$\Delta V = V_b - V_a = \frac{dU}{q_0} = -\int_a^b \mathbf{E} \cdot d\boldsymbol{\ell}$$

# Satuan Potensial Listrik

- Karena potensial listrik adalah energi potensial elektrostatik per satuan muatan, maka satuan SI untuk beda potensial adalah **joule per coulomb** atau **volt (V)**.

$$1 \text{ V} = 1 \text{ J/C}$$

- Karena diukur dalam volt maka beda potensial terkadang disebut **voltase** atau **tegangan**.
- Jika diperhatikan dari persamaan, beda potensial merupakan integral dari medan listrik E terhadap perubahan jarak dl, maka satuani E dapat juga dinyatakan :

$$1 \text{ N/C} = 1 \text{ V/m}$$

- Oleh karenanya maka :

$$\text{Beda Potensial (V)} = \text{Medan Listrik (E)} \times \text{Jarak (L)}$$

$$\text{Satuan V} = (\text{V/m}) \cdot (\text{m})$$

# Menghitung Potensial Listrik

- Dalam bagian ini, kita akan menghitung  $V$  untuk beberapa **distribusi muatan kontinu** yang penting.
- **Jika medan listrik diketahui**, potensial akibat distribusi muatan kontinu dapat dihitung dengan persamaan :

$$\Delta V = V_b - V_a = \frac{dU}{q_0} = -\int_a^b \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$$

- Potensial listrik dari sebuah muatan titik  $q$  dinyatakan :

$$V = \frac{U}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r} = k \frac{q}{r}$$

- Dengan **elemen muatan  $dq$**  yang dianggap sebagai muatan titik, **potensial listrik** dapat juga dihitung dengan persamaan :

$$V = \int \frac{k dq}{r} \quad \text{Dimana :}$$

$k = 8,99 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2$

# Contoh Soal

Ada sebuah muatan  $Q = 40 \mu\text{C}$ .

- Berapa potensial di titik A yang berjarak 20 cm dan titik B yang berjarak 60 cm?
- Berapakah beda potensial antara titik A dan B ?

## Penyelesaian :

- Potensial dititik A yang berjarak 20 cm dan titik B yang berjarak 60 cm adalah :

$$V_A = k \frac{Q}{r_A} = (8,99 \times 10^9) \frac{40 \times 10^{-6}}{20 \times 10^{-2}} = 1,8 \times 10^6 \text{ V}$$

$$V_B = k \frac{Q}{r_B} = (8,99 \times 10^9) \frac{40 \times 10^{-6}}{60 \times 10^{-2}} = 0,6 \times 10^6 \text{ V}$$

- Beda potensial antara titik A dan B adalah :

$$\begin{aligned} V_{AB} &= V_A - V_B \\ &= 1,8 \times 10^6 - 0,6 \times 10^6 \\ &= 1,2 \times 10^6 \text{ V} \\ &= 1,2 \text{ MV} \end{aligned}$$

# Contoh Soal

- (a) Berapakah potensial listrik elektron pada jarak  $r = 0,529 \times 10^{-10}$  m dari proton? (Ini adalah jarak rata-rata proton dan elektron dalam atom hidrogen),
- (b) Berapakah energi potensial elektron dan proton pada pemisahan ini?

## Penyelesaian :

Muatan proton adalah  $q = 1,6 \times 10^{-19}$  C, maka potensial listriknya adalah :

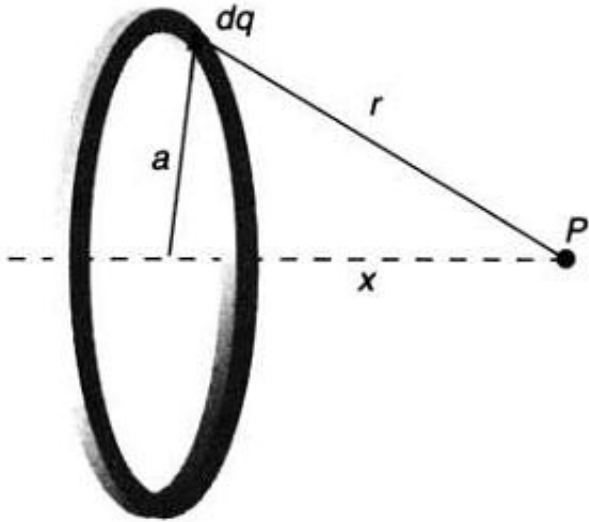
$$V = \frac{kq}{r} = \frac{(8,99 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(1,6 \times 10^{-19} \text{ C})}{0,529 \times 10^{-10} \text{ m}}$$
$$= 27,2 \text{ J/C} = 27,2 \text{ V}$$

Muatan elektron adalah  $e = -1,6 \times 10^{-19}$  C.

Dalam satuan SI, energi potensial adalah :

$$U = qV = (-1,6 \times 10^{-19} \text{ C})(27,2 \text{ V}) = -4,35 \times 10^{-18} \text{ J}$$

# Potensial V pada Sumbu Cincin Bermuatan



Cincin muatan seragam berjari-jari  $a$  dan bermuatan  $Q$ . Ambil sebagian dari cincin sebagai elemen muatan  $dq$ .

Jarak elemen muatan ini ke titik medan  $P$  pada sumbu cincin adalah :

$$r = \sqrt{x^2 + a^2}$$

Maka potensial pada titik  $P$  dari cincin adalah :

$$\begin{aligned} V &= \int \frac{k dq}{r} = \int \frac{k dq}{\sqrt{x^2 + a^2}} = \frac{k}{\sqrt{x^2 + a^2}} \int dq \\ &= \frac{kQ}{\sqrt{x^2 + a^2}} \end{aligned}$$

Dimana :

$$k = 8,99 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2$$

# Contoh soal

Cincin berjari-jari 4 cm membawa muatan seragam 8 nC. Sebuah partikel kecil dengan massa  $m = 6 \times 10^{-6}$  kg dengan muatan  $q_0 = 5$  nC diletakkan pada  $x = 3$  cm dan bergerak lurus menjauhi pusat sumbu cincin.

Tentukan kecepatan muatan ketika berjarak sangat jauh dari cincin.

## Penyelesaian :

Energi potensial muatan  $q_0$  pada  $x = 3$  cm adalah

$$U = q_0 V = \frac{kQq_0}{\sqrt{x^2 + a^2}} = \frac{(8,99 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(8 \times 10^{-9} \text{ C})(5 \times 10^{-9} \text{ C})}{\sqrt{(0,03 \text{ m})^2 + (0,04 \text{ m})^2}} \\ = 7,19 \times 10^{-6} \text{ J}$$

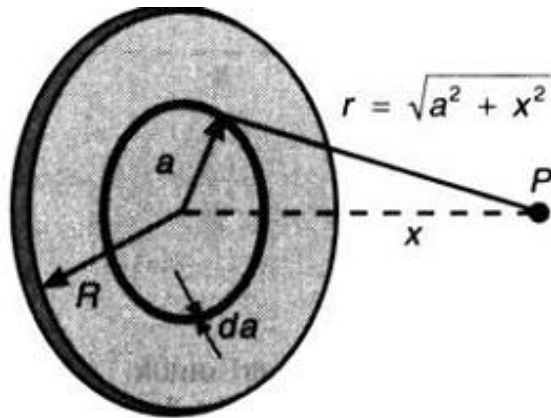
Saat partikel bergerak sepanjang sumbu  $x$  menjauh dari cincin, energi potensialnya berkurang dan energi kinetiknya bertambah. Ketika partikel sangat jauh dari cincin, energi potensialnya nol dan energi kinetiknya adalah  $7,19 \times 10^{-6}$  J.

Maka kecepatannya adalah :

$$\frac{1}{2}mv^2 = 7,19 \times 10^{-6} \text{ J}$$

$$v = \sqrt{\frac{2(7,19 \times 10^{-6} \text{ J})}{6 \times 10^{-6} \text{ kg}}} = 1,55 \text{ m/s}$$

# Potensial V pada Sumbu Cakram bermuatan homogen



Misalkan cakram mempunyai radius  $R$  dan membawa muatan total  $Q$ . Maka densitas muatan permukaan pada cakram adalah :

$$\sigma = Q/\pi R^2$$

ambil sumbu  $x$  sebagai sumbu cakram dan memperlakukan cakram sebagai kumpulan muatan cincin berjari-jari  $a$  dan tebal  $da$ .

Luas cincin adalah  $2\pi a da$ , dan muatannya adalah  $dq = \sigma dA = \sigma 2\pi a da$ .

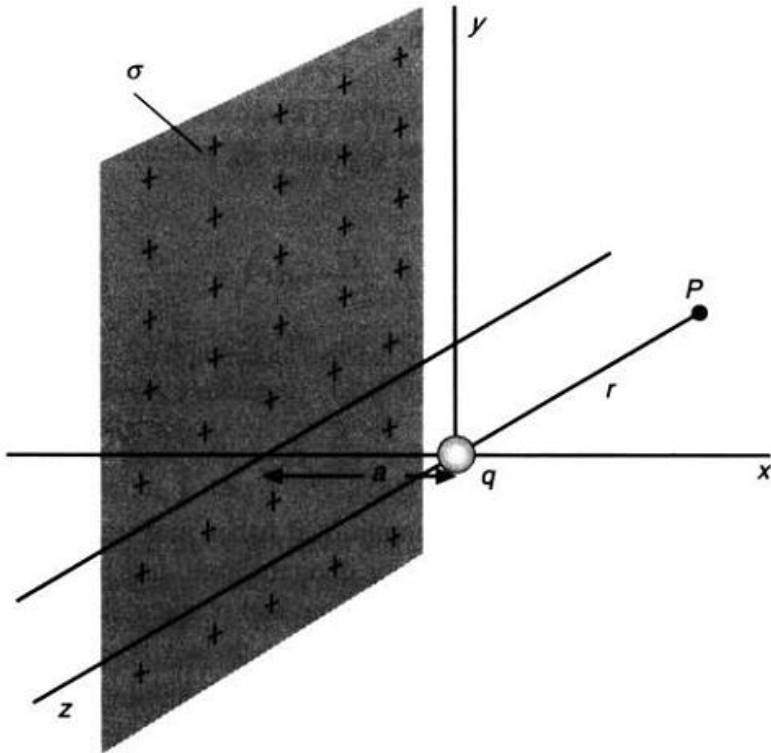
Potensial pada titik  $P$  pada sumbu  $x$  oleh elemen cincin muatan dinyatakan oleh persamaan :

$$dV = \frac{k dq}{(x^2 + a^2)^{1/2}} = \frac{k 2\pi\sigma a da}{(x^2 + a^2)^{1/2}}$$

Potensial pada sumbu cakram ditentukan dengan integral dari  $a = 0$  ke  $a = R$ , maka :

$$\begin{aligned} V &= \int_0^R \frac{k 2\pi\sigma a da}{(x^2 + a^2)^{1/2}} = k\sigma\pi \int_0^R (x^2 + a^2)^{-1/2} 2a da \\ &= k\sigma\pi \frac{(x^2 + a^2)^{+1/2}}{\frac{1}{2}} \Big|_{a=0}^{a=R} \\ &= 2\pi k\sigma [(x^2 + R^2)^{1/2} - x] \end{aligned}$$

# Potensial V di Dekat Bidang Muatan Tak hingga: Kontinuitas V



Jika  $V_0$  adalah potensial pada bidang  $yz$  di mana  $x = 0$ .

Potensial pada harga  $x$  positif adalah :

$$V(x) = V_0 - \frac{\sigma}{2\epsilon_0}x \quad x > 0$$

Potensial pada harga  $x$  negatif adalah :

$$V(x) = V_0 + \frac{\sigma}{2\epsilon_0}x \quad x < 0$$

Dimana :

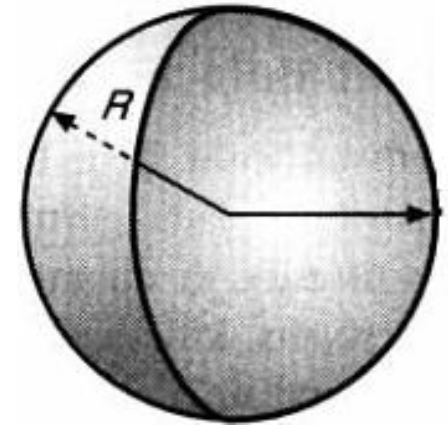
$\sigma$  = kerapatan muatan per satuan luas bidang

$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N}\cdot\text{m}^2$

# Potensial $V$ di Dalam dan di Luar Kulit Bola Bermuatan

Menentukan potensial kulit bola berjari-jari  $R$  dan bermuatan seragam  $Q$  yang terdistribusi pada permukaan.

Di dalam kulit bola, medan listrik nol, maka perubahan potensial juga nol.



Secara umum, potensial kulit bola berjari-jari  $R$  yang bermuatan seragam  $Q$  adalah :

$$V = \begin{cases} \frac{kQ}{R} & r \leq R \\ \frac{kQ}{r} & r \geq R \end{cases}$$

Dimana :

$r$  = jarak antara titik potensial dengan pusat bola

$k = 8,99 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2$

# Contoh soal

Bola bermuatan seragam mempunyai potensial pada permukaannya sebesar 450 V. Pada jarak radial 20 cm di luar permukaan ini, potensialnya 150 V. Berapakah jari-jari bola dan berapakah muatan bola?

# Penyelesaian

Potensial pada permukaan bola :

$$\frac{kQ}{R} = 450 \text{ V} \quad \text{.....(1)}$$

Potensial pada jarak 20 cm dari permukaan bola :

$$\frac{kQ}{R+0.2 \text{ m}} = 150 \text{ V} \quad \text{.....(2)}$$

Pers (1) dibagi dengan pers (2) adalah :

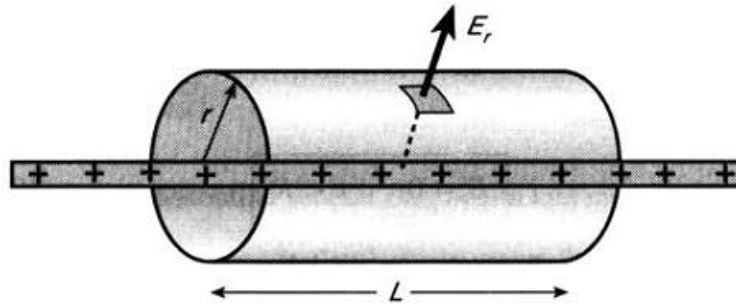
$$\frac{\frac{kQ}{R}}{\frac{kQ}{R+0.2 \text{ m}}} = \frac{450 \text{ V}}{150 \text{ V}} \quad \Rightarrow \quad \frac{R+0.2 \text{ m}}{R} = 3 \quad \Rightarrow \quad R = \boxed{0.100 \text{ m}}$$

Besar muatan bola diperoleh dari pers (1) adalah :

$$\begin{aligned} Q &= (450 \text{ V}) \frac{R}{k} \\ &= (450 \text{ V}) \frac{(0.1 \text{ m})}{(8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)} \\ &= \boxed{5.01 \text{ nC}} \end{aligned}$$

# Potensial $V$ di Dekat Muatan Garis Tak hingga

Menghitung potensial akibat muatan garis takhingga yang memiliki **kerapatan muatan per satuan panjang  $\lambda$** .



Secara umum, potensial akibat muatan garis takhingga dengan muatan per satuan panjang  $\lambda$  dinyatakan :

$$V = 2k\lambda \ln a - 2k\lambda \ln r$$

atau

$$V = -2k\lambda \ln \frac{r}{a}$$

Dimana :

$V = 0$  ketika  $r = a$

# Contoh soal

Sebuah muatan garis tak terhingga memiliki densitas muatan linear =  $1,5 \mu\text{C}/\text{m}$  terletak pada sumbu z. Cari potensial pada jarak dari muatan garis (a) 2,0 m, (b) 4.0 m, dan (c) 12 m, dengan asumsi bahwa  $V = 0$  pada 2,5 m.

**Penyelesaian :**

Karena  $V = 0$  pada  $r = 2.5 \text{ m}$ , maka :

$$\begin{aligned}0 &= -2k\lambda \ln \frac{2.5 \text{ m}}{a} \\0 &= \ln \frac{2.5 \text{ m}}{a} \\ \frac{2.5 \text{ m}}{a} &= \ln^{-1} 0 = 1 \\ a &= 2.5 \text{ m}\end{aligned}$$

Potensial karena muatan garis adalah :

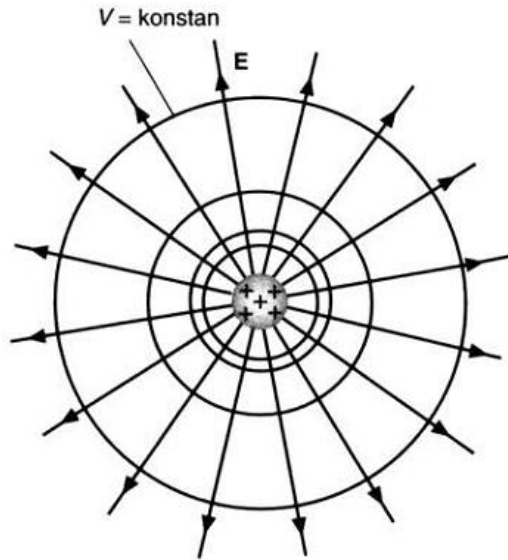
$$V = -2k\lambda \ln \frac{r}{a} = -2(8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)(1.5 \mu\text{C}/\text{m}) \ln \left( \frac{r}{2.5 \text{ m}} \right) = -(2.70 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{C}) \ln \left( \frac{r}{2.5 \text{ m}} \right)$$

(a) potensial pada jarak 2,0 m :  $V = -(2.70 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{C}) \ln \left( \frac{2 \text{ m}}{2.5 \text{ m}} \right) = \boxed{6.02 \text{ kV}}$

(b) potensial pada jarak 4,0 m :  $V = -(2.70 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{C}) \ln \left( \frac{4 \text{ m}}{2.5 \text{ m}} \right) = \boxed{-12.7 \text{ kV}}$

(c) potensial pada jarak 12 m :  $V = -(2.70 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{C}) \ln \left( \frac{12 \text{ m}}{2.5 \text{ m}} \right) = \boxed{-42.3 \text{ kV}}$

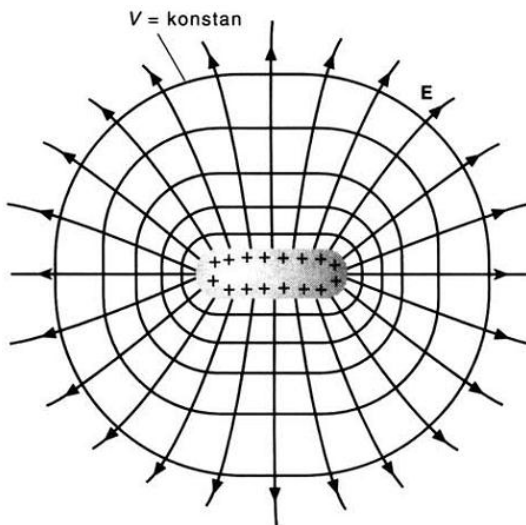
# Permukaan Ekuipotensial



Gambar disamping menunjukkan garis medan listrik oleh muatan titik di pusat. Jika kita memindahkan muatan uji **tegak lurus** pada garis ini, **tidak ada kerja** yang dilakukan dan **potensial tidak berubah**.

*Permukaan saat potensial listrik konstan disebut **permukaan ekuipotensial**.*

Untuk **muatan titik di pusat**, garis-garis medan listrik adalah garis-garis radial, dan permukaan ekuipotensialnya adalah **bola**.



Permukaan-permukaan ekuipotensial dan garis-garis medan listrik di luar **konduktor bukan bola selalu tegak lurus** terhadap permukaan-permukaan ekuipotensial.

# Gradien Potensial

- Garis-garis medan listrik mengarah pada arah potensial yang semakin berkurang.
- Misalkan  $E_t$  adalah komponen  $E$  yang sejajar dengan perpindahan  $d\ell$ , maka :

$$E_t = -\frac{dV}{d\ell}$$

- Jika perpindahan tegak lurus terhadap medan listrik, potensial tidak berubah.
- Perubahan paling besar potensial  $V$  terjadi ketika perpindahan  $d\ell$  sejajar atau anti sejajar terhadap  $E$ .
- Vektor yang menunjuk ke arah perubahan fungsi skalar paling besar dan mempunyai besar sama dengan turunan fungsi tersebut terhadap jarak dalam arah tersebut disebut gradien fungsi.
- Jadi, medan listrik  $E$  adalah gradien negatif dari potensial  $V$ , karena garis-garis medan tersebut mengarah pada arah berkurangnya fungsi potensial yang paling besar.
- Dalam notasi vektor, gradien  $V$  ditulis  $\nabla V$  (nabla  $V$ ), sehingga :

$$\mathbf{E} = -\nabla V$$

# Gradien Potensial

- Untuk suatu distribusi muatan simetrik bola, potensial berubah hanya terhadap  $r$ , dan medan listrik dinyatakan :

$$\mathbf{E} = -\nabla V = -\frac{dV}{dr} \hat{\mathbf{r}}$$

- Untuk medan listrik seragam dalam arah  $x$ , maka fungsi potensial  $V$  hanya bergantung pada  $x$ .
- Medan listrik dinyatakan :

$$E = -\frac{dV}{dx} \mathbf{i}$$

- Secara umum, **fungsi potensial bergantung pada  $x$ ,  $y$  dan  $z$** , sehingga persamaan medan listrik dalam koordinat rectangular adalah :

$$\mathbf{E} = -\nabla V = -\left( \frac{\partial V}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial V}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial V}{\partial z} \mathbf{k} \right)$$

# Contoh Soal

Tentukan medan listrik untuk fungsi potensial  $V(x)$  yang dinyatakan oleh

$$V(x) = 100 \text{ V} - (25 \text{ V/m}) x.$$

## Penyelesaian :

Fungsi potensial ini hanya bergantung hanya pada  $x$ , maka medan listriknya adalah :

$$\mathbf{E} = -\frac{dV}{dx} \mathbf{i} = +25 \text{ V/m } \mathbf{i}$$

Perhatikan bahwa konstanta 100 V dalam pernyataan untuk  $V(x)$  tidak mempunyai pengaruh pada medan listrik.

**Terima Kasih**