

# Bab 2 POTENSIAL LISTRIK DAN KAPASITOR

**J**ika kita tempatkan sebuah partikel bermuatan dalam ruang yang mengandung medan listrik maka partikel yang mula-mula diam akan bergerak. Ini berarti partikel mengalami penambahan energi kinetik yang semula nol menjadi tidak nol. Pertambahan energi kinetik ini hanya mungkin disebabkan oleh dua faktor, yaitu:

- i) Ada kerja luar yang bekerja pada muatan, atau
- ii) Ada energi lain yang mengalami pengurangan

Jika tidak ada gaya luar yang kita berikan pada muatan, maka pastilah penambahan energi kinetik dibarengi oleh pengurangan energi bentuk lain sehingga energi total konstan (hukum kekekalan energi). Energi bentuk lain yang paling mungkin dimiliki partikel tersebut adalah energi potensial. Dengan demikian, partikel bermuatan listrik yang berada dalam ruang yang mengandung medan listrik memiliki energi potensial listrik.

### 2.1 Definisi Energi Potensial

Pada kuliah semester lalu kita sudah mempelajari energy potensial. Kalau kita kembali membuka materi tersebut maka kita dapatkan definisi bahwa perubahan energy potensial sama dengan negative kerja yang dilakukan gaya konservatif. Gaya listrik termasuk gaya konservatif sehingga kita dapat mendefinisikan energy potensial pada gaya listrik. Dengan menggunakan definisi tersebut, mari kita menentukan persamaan energy potensial listrik.

Misalkan muatan listrik  $q$  berada dalam ruang yang memiliki medan

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

---

listrik  $\vec{E}(\vec{r})$ . Gaya yang dialami muatan tersebut adalah

$$\vec{F}(\vec{r}) = q\vec{E}(\vec{r}) \quad (2.1)$$

Dengan demikian, kerja yang dilakukan untuk memindahkan muatan dari posisi  $\vec{r}_1$  ke posisi  $\vec{r}_2$  (lihat **Gambar 2.1**) adalah

$$\begin{aligned} W_{12} &= \int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} \vec{F}(\vec{r}) \cdot d\vec{r} \\ &= q \int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} \vec{E}(\vec{r}) \cdot d\vec{r} \end{aligned}$$

Dengan menggunakan definisi bahwa *kerja oleh gaya konservatif sama dengan negatif perubahan energi potensial* maka kita dapat menulis

$$\begin{aligned} \Delta U &= -W_{12} \\ U(\vec{r}_2) - U(\vec{r}_1) &= -q \int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} \vec{E}(\vec{r}) \cdot d\vec{r} \end{aligned}$$

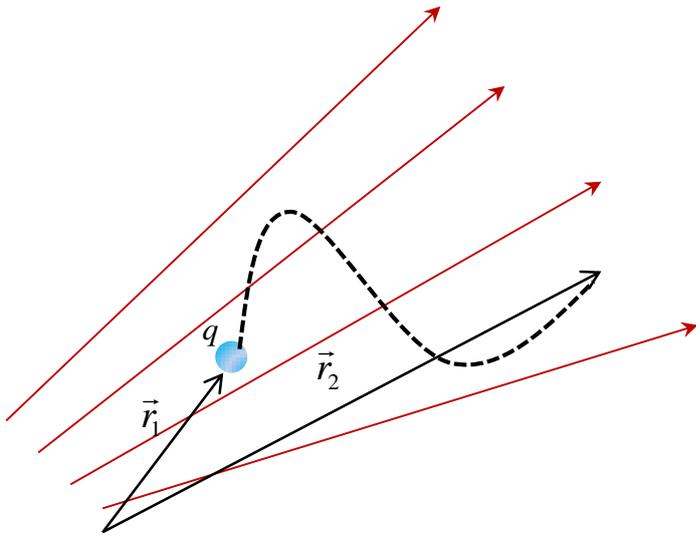
atau

$$U(\vec{r}_2) = U(\vec{r}_1) - q \int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} \vec{E}(\vec{r}) \cdot d\vec{r} \quad (2.2)$$

dengan

$U(\vec{r}_1)$  adalah energi potensial listrik pada posisi acuan  $\vec{r}_1$  dan  
 $U(\vec{r}_2)$  adalah energi potensial listrik pada posisi acuan  $\vec{r}_2$ .

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor



**Gambar 2.1** Muatan dipindahkan dari posisi  $\vec{r}_1$  ke posisi  $\vec{r}_2$  yang berada dalam ruang yang mengandung medan listrik. Diperlukan kerja untuk memindahkan muatan tersebut. Energi potensial didefinisikan sebagai negatif erja yang dilakukan.

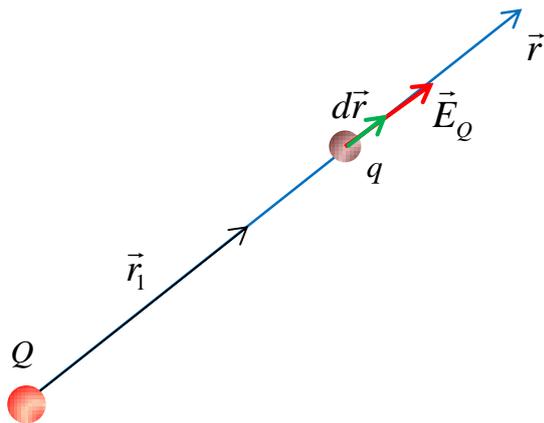
Agar melihat lebih eksplisit bentuk-bentuk persamaan energy potensial, mari kita menghitung energi potensial sebuah partikel yang bermuatan  $q$  yang berada pada jarak  $r$  dari muatan lain  $Q$  (**Gambar 2.2**). Kedua muatan sama-sama berupa titik. Kuat medan listrik di sekitar muatan  $Q$  dapat dihitung dengan mudah menggunakan hukum Coulomb dan didapatkan

$$\vec{E}_Q = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \hat{r} \quad (2.3)$$

Dengan demikian, energi potensial yang dimiliki muatan  $q$  adalah

$$U(\vec{r}) = U(\vec{r}_1) - q \int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}} \vec{E}_Q \cdot d\vec{r}$$

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor



**Gambar 2.2.** Menentukan energi potensial muatan  $q$  di sekitar muatan  $Q$

Karena  $\vec{E}_Q$  dan  $d\vec{r}$  sejajar (membentuk sudut  $0^\circ$ ) maka  $\vec{E}_Q \cdot d\vec{r} = E_Q dr \cos 0^\circ = E_Q dr$ . Dengan demikian, persamaan sebelumnya dapat ditulis menjadi

$$\begin{aligned} U(\vec{r}) &= U(\vec{r}_1) - q \int_{r_1}^r E_Q dr \\ &= U(\vec{r}_1) - \int_{r_1}^r q \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \right) dr \\ &= U(r_1) - \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0} \int_{r_1}^r \frac{dr}{r^2} \\ &= U(r_1) - \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0} \left[ -\frac{1}{r} \right]_{r_1}^r \\ &= U(r_1) - \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r} \right] \end{aligned}$$

Bila kita ambil titik acuan pada jarak tak berhingga,  $r_1 = \infty$ , potensial ditetapkan sama dengan nol,  $U(\infty) = 0$  maka diperoleh

$$U(r) = 0 - \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{1}{\infty} - \frac{1}{r} \right]$$

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

$$= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{r} \quad (2.4)$$

Tampak bahwa energy potensial sebuah muatan dalam medan yang dihasilkan muatan lain berbentuk titik berbanding terbalik dengan jarak. Namun, perlu dipahami bahwa persamaan energy potensial tidak selalu demikian. Jika medan listrik tidak dihasilkan oleh titik maka energy potensial belum tentu berbanding terbalik dengan jarak.

### Contoh 2.1

Sebuah bola konduktor dengan jari-jari  $R$  memiliki muatan  $Q$ . Jika sebuah muatan  $q$  berada pada permukaan bola, energi potensialnya adalah  $U_0$ . Berapa energi potensial muatan  $q$  di luar bola pada jarak sembarang dari pusat bola?

### Jawab

Kuat medan listrik di luar bola dapat dihitung dengan mudah menggunakan hukum Gauss. Kuat medan listrik tersebut adalah

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \hat{r}$$

Energi potensial yang dimiliki muatan  $q$  pada jarak  $r$  dari pusat bola adalah

$$\begin{aligned} U(r) &= U(r_1) - \int_{r_1}^r q\vec{E} \cdot d\vec{r} \\ &= U(r_1) - \int_{r_1}^r qE dr \\ &= U(r_1) - \int_{r_1}^r q \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \right) dr = U(r_1) - \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0} \int_{r_1}^r \frac{dr}{r^2} \\ &= U(r_1) - \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0} \left[ -\frac{1}{r} \right]_{r_1}^r = U(r_1) - \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r} \right] \end{aligned}$$

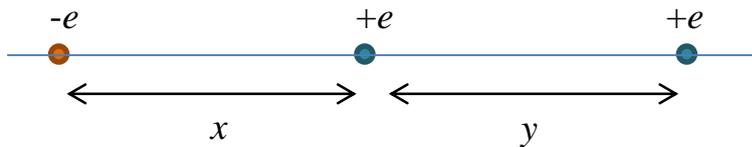
Karena pada  $r_0 = R$  energi potensial memenuhi  $U(R) = U_0$  maka

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

$$U(r) = U_o - \frac{qQ}{4\pi\epsilon_o} \left[ \frac{1}{R} - \frac{1}{r} \right]$$

### Contoh 2.2

Sebuah partikel bermuatan  $+e$  dan dua partikel bermuatan  $-e$  ditempatkan pada garis lurus seperti pada **Gambar 2.3**. Tentukan perbandingan  $x$  dan  $y$  sehingga energi potensial sistem keseluruhan nol.



Gambar 2.3 Gambar untuk Contoh 2.2

### Jawab

Energi potensial total semua partikel adalah

$$V = -k \frac{e^2}{x} + k \frac{e^2}{y} - k \frac{e^2}{x+y}$$

Agar energy potensial nol maka harus terpenuhi

$$-\frac{1}{x} + \frac{1}{y} - \frac{1}{x+y} = 0$$

Persamaan di atas dapat ditulis menjadi

$$\frac{(y-x)(x+y) - xy}{xy(x+y)} = 0$$

Persamaan di atas pasti nol jika pembilang nol, atau

$$(y-x)(x+y) - xy = 0$$

atau

$$y^2 - xy - x^2 = 0$$

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

---

$$\left(\frac{y}{x}\right)^2 - \left(\frac{y}{x}\right) - 1 = 0$$

Misalkan  $z = y/x$  maka kita memiliki persamaan kuadrat berikut  $z^2 - z - 1 = 0$ . Solusi untuk persamaan kuadrat  $z$  adalah

$$z_{1,2} = \frac{1 \pm \sqrt{1+4}}{2}$$

Karena jarak bernilai positif maka akar positif saja yang kita ambil. Jadi solusi yang benar adalah

$$z = \frac{y}{x} = \frac{1 + \sqrt{5}}{2}$$

### 2.2 Potensial Listrik

Sehari-hari kita lebih sering mendengar potensial listrik atau tegangan listrik daripada energi potensial listrik. Contohnya, kita menyebut tegangan listrik PLN 220 Volt, tegangan baterai 1,5 Volt, tegangan aki 12 Volt, dan seterusnya. Lalu apa tegangan listrik atau potensial listrik?

Potensial listrik didefinisikan sebagai energi potensial per satuan muatan listrik. Dengan menggunakan definisi energi potensial sebelumnya, maka definisi potensial listrik menjadi

$$\begin{aligned} V(\vec{r}) &= \frac{U(\vec{r})}{q} \\ &= \frac{U(\vec{r}_1)}{q} - \frac{\int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}} q\vec{E} \cdot d\vec{r}}{q} \\ &= V(\vec{r}_1) - \int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}} \vec{E} \cdot d\vec{r} \end{aligned} \tag{2.5}$$

di mana  $V(\vec{r}) = U(\vec{r})/q$ . Tampak di sini bahwa potensial listrik semata-mata bergantung pada medan listrik dan tidak bergantung pada muatan yang

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

ditempatkan dalam medan tersebut.

Berikutnya kita akan membahas potensial listrik yang dihasilkan oleh sejumlah system, seperti satu partikel, banyak partikel, pelat sejajar dan benda dengan distribusi muatan tertentu.

### 2.3 Potensial listrik oleh sebuah partikel

Sudah kita hitung di Bab 1 sebelumnya bahwa kuat medan listrik pada jarak  $r$  dari partikel bermuatan  $Q$  adalah

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \hat{r}$$

Potensial listrik pada jarak  $r$  dari partikel tersebut kita hitung menggunakan persamaan (2.9). Medan listrik  $\vec{E}$  dan  $d\vec{r}$  sejajar, sehingga  $\vec{E} \cdot d\vec{r} = E dr \cos 0^\circ = E dr$ . Dengan demikian,

$$\begin{aligned} V(r) &= V(r_1) - \int_{r_1}^r E dr \\ &= V(r_1) - \int_{r_1}^r \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} dr \\ &= V(r_1) - \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \int_{r_1}^r \frac{dr}{r^2} \\ &= V(r_1) - \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left[ -\frac{1}{r} \right]_{r_1}^r \\ &= V(r_1) - \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r} \right) \end{aligned}$$

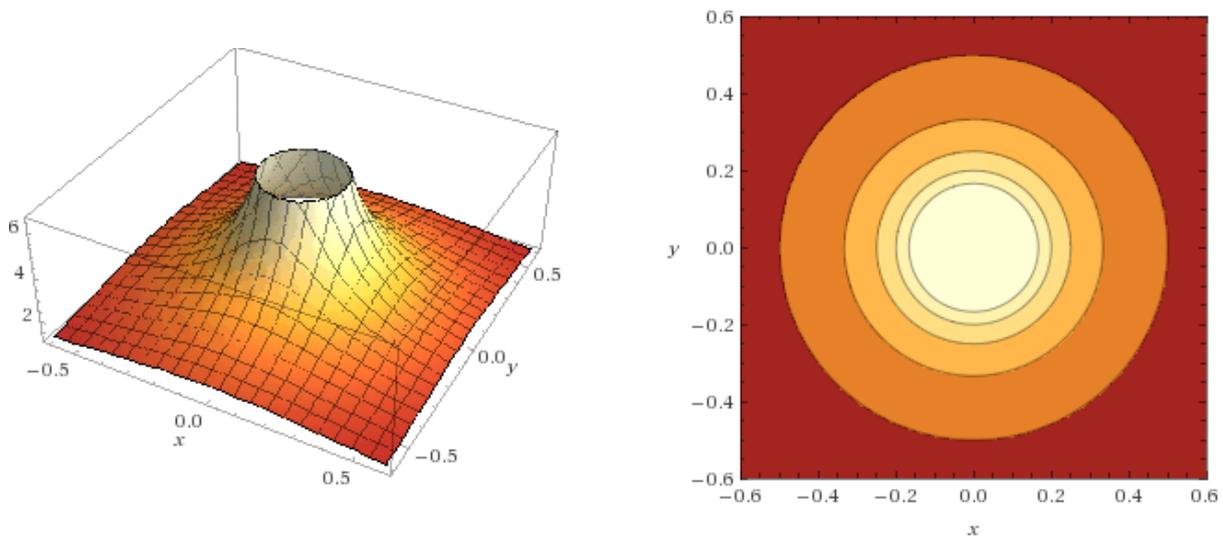
Dengan menetapkan bahwa pada jarak tak berhingga besar potensial sama dengan nol maka,

$$V(r) = V(\infty) - \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{\infty} - \frac{1}{r} \right)$$

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

$$\begin{aligned} &= 0 - \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left( 0 - \frac{1}{r} \right) \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r} \end{aligned} \tag{2.6}$$

Tampak dari persamaan (2.10) bahwa potensial listrik berbanding terbalik dengan jarak dari pusat muatan. Potensial listrik adalah besaran scalar. Di mana pun posisi pengukuran, asal jaraknya sama dari muatan maka potensial listrik nol. **Gambar 2.4** adalah profil potensial listrik pada berbagai posisi di sekitar muatan. Muatan ada di pusat koordinat. Kurva dibuat dengan Wolfram Alpha dengan perintah plot. Gambar kiri adalah kurva potensial sebagai fungsi koordinat  $x$  dan  $y$ , artinya kalau kita bergerak sekeliling muatan pada suatu bidang yang sama dengan muatan maka kita ukur perubahan potensial seperti pada gambar tersebut. Gambar kanan adalah kurva yang menyatakan potensial yang bernilai sama. Kurva tersebut dinamakan kurva ekipotensial.



**Gambar 2.4** (kiri) Profil perubahan potensial listrik pada berbagai titik di bidang yang sama dengan tempat muatan berada. Muatan berada di pusat koordinat. (kanan) Kurva yang menyatakan lokasi dengan potensial konstan (kurva ekipotensial).

### 2.4 Potensial listrik yang dihasilkan banyak partikel

Cara menentukan potensial listrik yang dihasilkan banyak partikel cukup mudah, yaitu hanya dengan melakukan penjumlahan aljabar

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

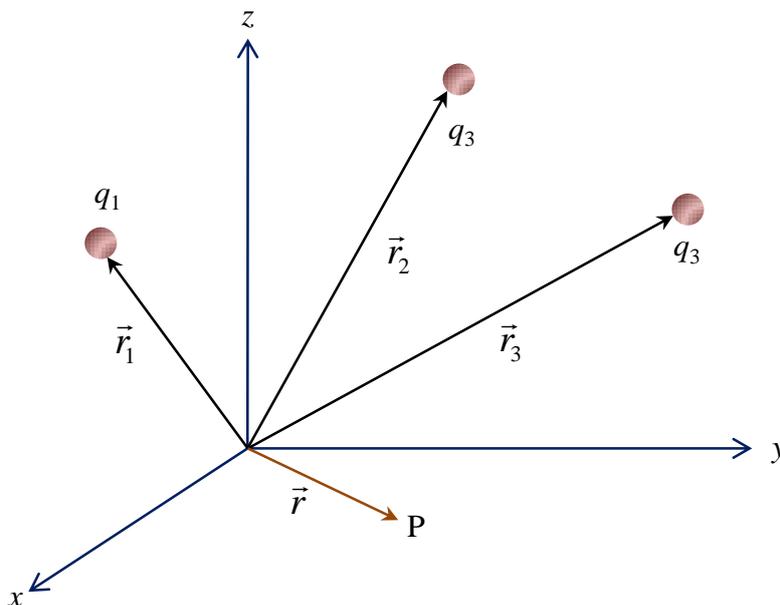
(penjumlahan biasa) potensial listrik yang dihasilkan masing-masing partikel. Hal ini mudah dilakukan karena potensial listrik merupakan besaran skalar. Penjumlahan ini sangat berbeda dengan penjumlahan medan listrik yang dihasilkan oleh sejumlah muatan. Untuk medan listrik kita harus melakukan penjumlahan secara vektor (memperhatikan besar dan arah).

Lihat skema pada **Gambar 2.5**. Sejumlah partikel berada pada posisi  $\vec{r}_1$ ,  $\vec{r}_2$ , dan  $\vec{r}_3$ . Muatan masing-masing partikel adalah  $q_1$ ,  $q_2$ , dan  $q_3$ . Kita ingin menentukan potensial pada titik pengamatan P yang berada pada posisi  $\vec{r}$ . Yang pertama yang harus dilakukan adalah mencari jarak masing-masing muatan ke titik P.

i) Jarak muatan  $q_1$  ke titik P:  $R_1 = |\vec{r} - \vec{r}_1|$

ii) Jarak muatan  $q_2$  ke titik P:  $R_2 = |\vec{r} - \vec{r}_2|$

iii) Jarak muatan  $q_3$  ke titik P:  $R_3 = |\vec{r} - \vec{r}_3|$



**Gambar 2.5** Menentukan potensial listrik yang dihasilkan oleh sejumlah titik muatan.

Potensial pada titik pengamatan yang dihasilkan oleh masing-masing muatan.

i) Potensial yang dihasilkan muatan  $q_1$ :  $V_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{R_1} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{|\vec{r} - \vec{r}_1|}$

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

ii) Potensial yang dihasilkan muatan  $q_2$ :  $V_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2}{R_2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2}{|\vec{r} - \vec{r}_2|}$

iii) Potensial yang dihasilkan muatan  $q_3$ :  $V_3 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_3}{R_3} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_3}{|\vec{r} - \vec{r}_3|}$

Potensial total di titik pengamatan menjadi

$$\begin{aligned} V &= V_1 + V_2 + V_3 \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{|\vec{r} - \vec{r}_1|} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2}{|\vec{r} - \vec{r}_2|} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_3}{|\vec{r} - \vec{r}_3|} \end{aligned}$$

Secara umum potensial listrik pada posisi  $\vec{r}$  yang dihasilkan sejumlah muatan titik adalah

$$V(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_i \frac{q_i}{|\vec{r} - \vec{r}_i|} \quad (2.7)$$

dengan  $\vec{r}_i$  adalah posisi partikel bermuatan  $q_i$ .

Agar lebih paham dengan potensial yang dihasilkan sejumlah titik, mari kita lihat contoh berikut ini.

### Contoh 2.3

Tiga partikel berada pada posisi seperti pada **Gambar 2.6**. Muatan masing-masing partikel adalah  $q_1 = 2 \mu\text{C}$ ,  $q_2 = 4 \mu\text{C}$ , dan  $q_3 = -5 \mu\text{C}$ . Berapa potensial listrik di titik P.

### Jawab

Pertama kita mencari koordinat posisi masing-masing muatan serta posisi P. Tampak dari gambar

$$\vec{r}_1 = 2\hat{j} \text{ m}, \quad \vec{r}_2 = 2\hat{i} - 3\hat{j} \text{ m}, \quad \vec{r}_3 = 4\hat{i} + \hat{j} \text{ m}, \quad \vec{r} = 4\hat{i} + 4\hat{j} \text{ m}$$

Jarak masing-masing muatan ke titik pengamatan adalah

$$\begin{aligned} R_1 &= |\vec{r} - \vec{r}_1| \\ &= |(4\hat{i} + 4\hat{j}) - (2\hat{j})| \end{aligned}$$

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

$$= \sqrt{4^2 + 2^2} = \sqrt{20} \text{ m}$$

$$R_2 = |\vec{r} - \vec{r}_2|$$

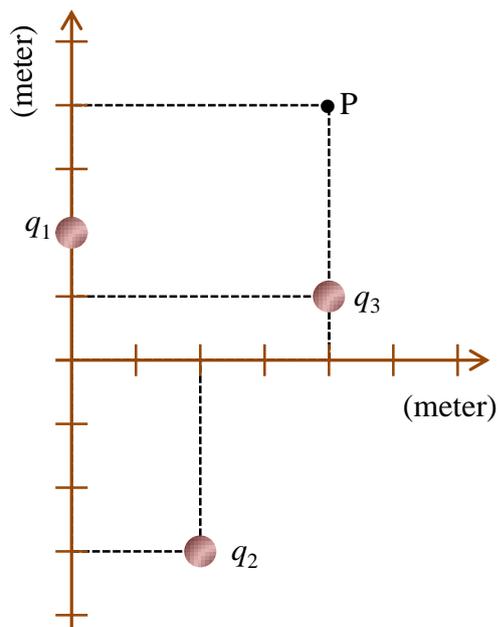
$$= |(4\hat{i} + 4\hat{j}) - (2\hat{i} - 3\hat{j})|$$

$$= \sqrt{2^2 + 7^2} = \sqrt{53} \text{ m}$$

$$R_3 = |\vec{r} - \vec{r}_3|$$

$$= |(4\hat{i} + 4\hat{j}) - (4\hat{i} + \hat{j})| \text{ m}$$

$$= |3\hat{j}| = 3 \text{ m}$$



Gambar 2.6 Gambar untuk Contoh 2.3

Potensial di titik P yang dihasilkan masing-masing muatan adalah

$$V_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{R_1}$$

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

---

$$= (9 \times 10^9) \frac{(2 \times 10^{-6})}{\sqrt{20}} = 4025 \text{ Volt}$$

$$V_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2}{R_2}$$

$$= (9 \times 10^9) \frac{(4 \times 10^{-6})}{\sqrt{53}} = 4945 \text{ Volt}$$

$$V_3 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_3}{R_3}$$

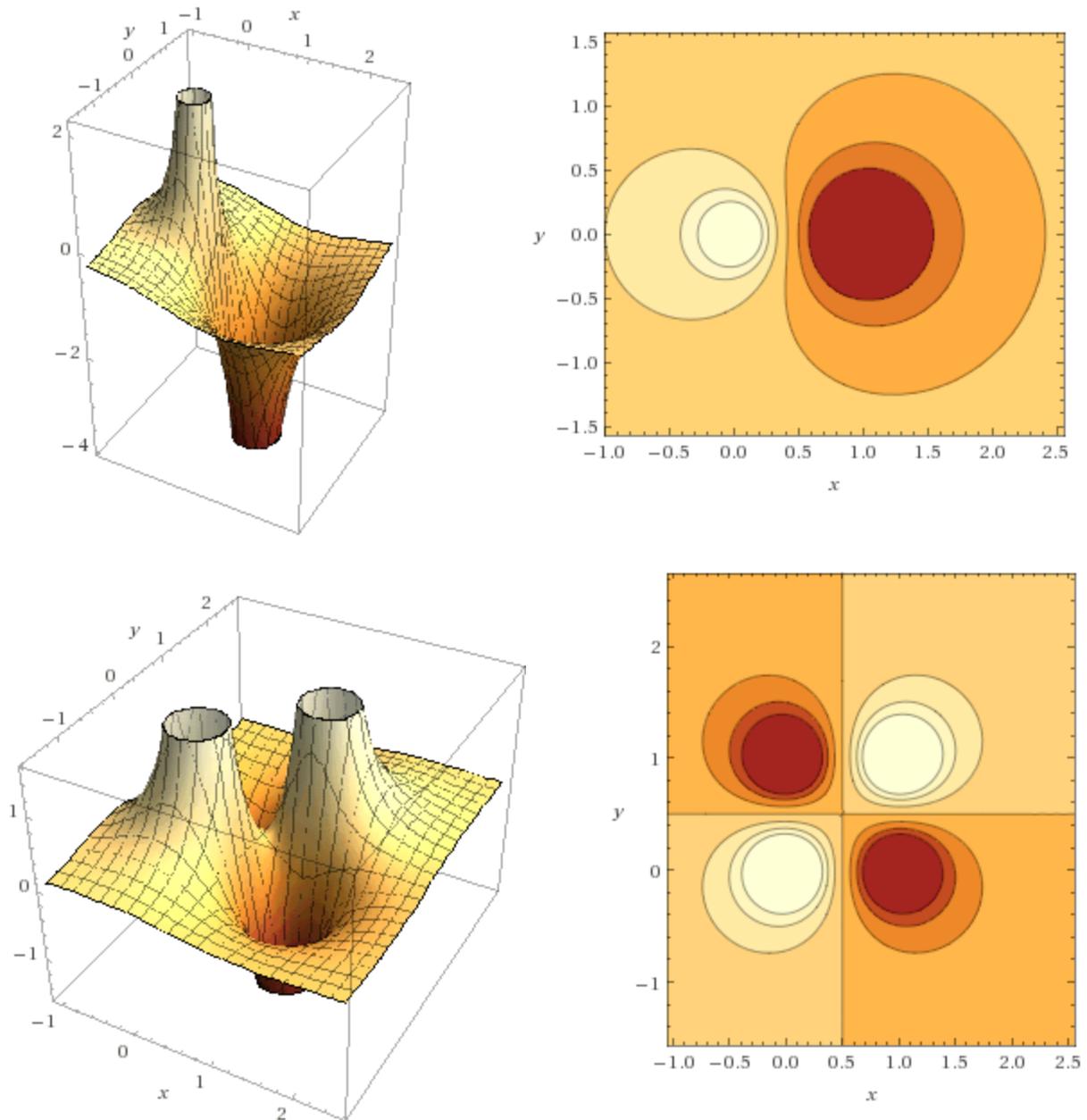
$$= (9 \times 10^9) \frac{(-5 \times 10^{-6})}{3} = -15000 \text{ Volt}$$

Potensial total di titik P adalah

$$\begin{aligned} V &= V_1 + V_2 + V_3 \\ &= 4025 + 4945 - 15000 \\ &= -6030 \text{ Volt} \end{aligned}$$

Sebagai ilustrasi, **Gambar 2.7** adalah ilustrasi potensial listrik pada berbagai posisi di bidang yang sama dengan muatan yang dihasilkan oleh lebih dari satu muatan. Gambar atas adalah profil potensial serta kurva ekuipotensial yang dihasilkan muatan  $+q$  yang berada pada koordinat  $(0,0)$  dan muatan  $-2q$  yang berada pada koordinat  $(1,0)$ . Gambar bawah adalah profil potensial serta kurva ekuipotensial yang dihasilkan empat muatan, masing-masing  $+q$  yang berada pada koordinat  $(0,0)$ ,  $-q$  pada koordinat  $(1,0)$ ,  $+q$  pada koordinat  $(1,1)$ , dan  $-q$  pada koordinat  $(0,1)$ . Semua Gambar dibuat menggunakan perintah plot pada Wolfram alpha.

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor



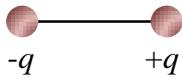
**Gambar 2.7** (atas) Profil potensial (kiri) dan kurva ekuipotensial (kanan) yang dihasilkan muatan  $+q$  yang berada pada koordinat  $(0,0)$  dan muatan  $-2q$  yang berada pada koordinat  $(1,0)$ . (bawah) Profil potensial (kiri) dan kurva ekuipotensial (kanan) yang dihasilkan empat muatan, masing-masing  $+q$  yang berada pada koordinat  $(0,0)$ ,  $-q$  pada koordinat  $(1,0)$ ,  $+q$  pada koordinat  $(1,1)$ , dan  $-q$  pada koordinat  $(0,1)$ . Semua Gambar dibuat menggunakan perintah plot pada **Wolfram alpha**

### 2.5 Potensial Momen Dipol

Kita telah mendefinisikan momen dipole sebagai dua muatan yang besarnya sama tetapi berbeda tanda dan dipisahkan oleh jarak tertentu

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

(tidak berimpit). Momen dipol dilukiskan pada **Gambar 2.8**.



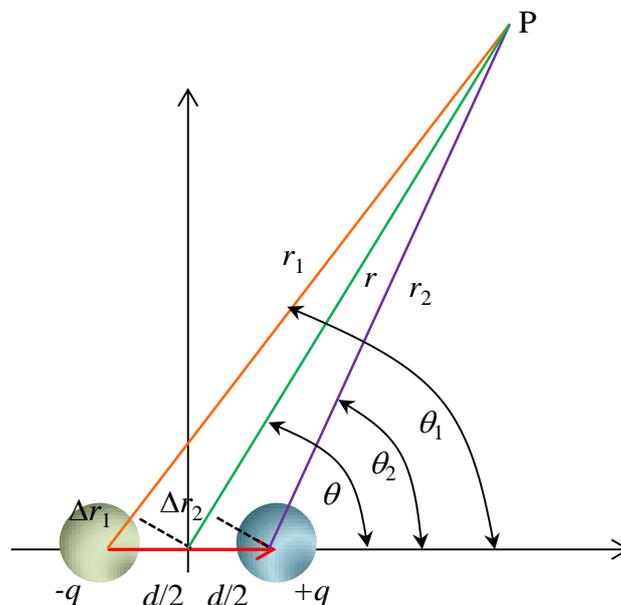
**Gambar 2.8** Skema momen dipol listrik

Apabila dilihat dari jauh, dua muatan momen dipol tampak sangat berdekatan (hampir berimpit) sehingga muatan total momen dipol yang terukur nol. Namun, jika diamati dari dekat, momen dipol tampak sebagai dua muatan yang terpisah.

Kita ingin menentukan potensial di sekitar suatu momen dipol. Untuk mudahnya, lihat skema pada **Gambar 2.9**. Kita akan hitung potensial pada jarak  $r$  dari pusat momen dipol (titik tengah antara dua muatan) yang membentuk sudut  $\theta$  dengan sumbu momen dipol (sumbu vertikal). Tampak dari **Gambar. 2.9**.

- i) Jarak titik pengamatan ke muatan  $-q$  adalah  $r_1$
- ii) Jarak titik pengamatan ke muatan  $+q$  adalah  $r_2$

Kita cari hubungan antara  $r_1$ ,  $r_2$ , dan  $r$  dengan bantuan **Gambar 2.9**.



**Gambar 2.9** Menentukan potensial di titik P yang dihasilkan oleh dipol listrik

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

---

Tampak dari **Gambar 2.9** bahwa

$$r_1 = r + \Delta r_1$$

$$r_2 = r - \Delta r_2$$

$$\Delta r_1 = \frac{d}{2} \cos \theta_1$$

$$\Delta r_2 = \frac{d}{2} \cos \theta_2$$

Jika jarak titik pengamatan sangat besar dibandingkan dengan  $d$  maka kita dapat melakukan aproksimasi  $\theta_1 \approx \theta_2 \approx \theta$  sehingga

$$\Delta r_1 = \frac{d}{2} \cos \theta$$

$$\Delta r_2 = \frac{d}{2} \cos \theta$$

Potensial di titik P yang dihasilkan oleh muatan  $-q$  adalah

$$V_1 = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r_1}$$

Potensial di titik P yang dihasilkan oleh muatan  $+q$  adalah

$$V_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r_2}$$

Potensial total di titik P akibat muatan  $-q$  dan  $+q$  menjadi

$$\begin{aligned} V &= V_1 + V_2 \\ &= -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r_1} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r_2} \\ &= \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right) \end{aligned}$$

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

---

$$\begin{aligned}
 &= \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{r_1}{r_1 r_2} - \frac{r_2}{r_1 r_2} \right) \\
 &= \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{r_1 - r_2}{r_1 r_2} \right) \\
 &= \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{[r + \Delta r_1] - [r - \Delta r_2]}{r_1 r_2} \right) \\
 &= \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{\Delta r_1 + \Delta r_2}{r_1 r_2} \right) \\
 &= \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{\frac{d}{2} \cos\theta + \frac{d}{2} \cos\theta}{r_1 r_2} \right) \\
 &= \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{d \cos\theta}{r_1 r_2} \right)
 \end{aligned}$$

Untuk jarak  $r$  yang sangat besar dibandingkan dengan  $d$ , kita dapat mengaproksimasi  $r_1 \approx r$ ,  $r_2 \approx r$ ,  $r_1 \times r_2 \approx r \times r = r^2$ . Dengan demikian,

$$\begin{aligned}
 V &\approx \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{d \cos\theta}{r^2} \right) \\
 &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{(qd) \cos\theta}{r^2}
 \end{aligned}$$

Kita telah mendefinisikan momen dipol di Bab 1 sebagai  $p = qd$ . Dengan demikian, diperoleh bentuk potensial yang dihasilkan momen dipole

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p}{r^2} \cos\theta \tag{2.8}$$

Momen dipol sebenarnya sebuah besaran vektor dengan titik pangkal berada pada muatan negatif dan kepala berada pada muatan positif. Sudut  $\theta$  adalah sudut antara momen dipol dan vektor posisi pengamatan.

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

Tabel 2.1 adalah contoh momen dipol sejumlah molekul.

**Tabel 2.1 Momen dipol beberapa molekul**

Molekul	Momen dipol (C m)
Air [H <sub>2</sub> <sup>(+)</sup> O <sup>(-)</sup> ]	6,1 × 10 <sup>-30</sup>
HCl [H <sup>(+)</sup> O <sup>(-)</sup> ]	3,4 × 10 <sup>-30</sup>
NH <sub>3</sub> [N <sup>(-)</sup> H <sub>3</sub> <sup>(+)</sup> ]	5,0 × 10 <sup>-30</sup>
Grup CO [C <sup>(+)</sup> O <sup>(-)</sup> ]	8,0 × 10 <sup>-30</sup>
Grup NH [N <sup>(-)</sup> H <sup>(+)</sup> ]	3,0 × 10 <sup>-30</sup>

### Contoh 2.4

Jarak antara karbon (+) dan oksigen (-) dalam grup CO adalah  $1,2 \times 10^{-10}$  m. Hitunglah:

- muatan  $q$  pada atom karbon dan atom oksigen,
- potensial pada jarak  $9,0 \times 10^{-10}$  m dari dipol pada arah sejajar sumbu dengan oksigen merupakan atom terdekat titik pengamatan.

### Jawab

a) Berdasarkan Tabel 1, momen dipol grup CO adalah  $\mu = 8,0 \times 10^{-30}$  C m. Dari soal diberikan  $d = 1,2 \times 10^{-10}$  m. Dengan demikian, muatan atom C adalah

$$q = + \frac{\mu}{d} = + \frac{8,0 \times 10^{-30}}{1,2 \times 10^{-10}} = + 6,7 \times 10^{-12} \text{ C}$$

Muatan atom O sama besar dengan muatan atom C, tetapi berlawanan tanda. Jadi muatan atom O adalah  $- 6,7 \times 10^{-12}$  C

b) Jarak dipol ke titik pengamatan:  $r = 9,0 \times 10^{-10}$  m

Karena atom O (bermuatan negatif) berada pada jarak terdekat titik pengamatan, maka arah momen dipol menjauhi titik pengamatan. Akibatnya, sudut antara momen dipol dengan titik pengamatan adalah  $\theta = 180^\circ$ . Potensial yang dihasilkan dipol adalah

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\mu}{r^2} \cos\theta = (9 \times 10^9) \frac{(8 \times 10^{-30})}{(9 \times 10^{-10})^2} \cos 180^\circ = -0,09 \text{ V}$$

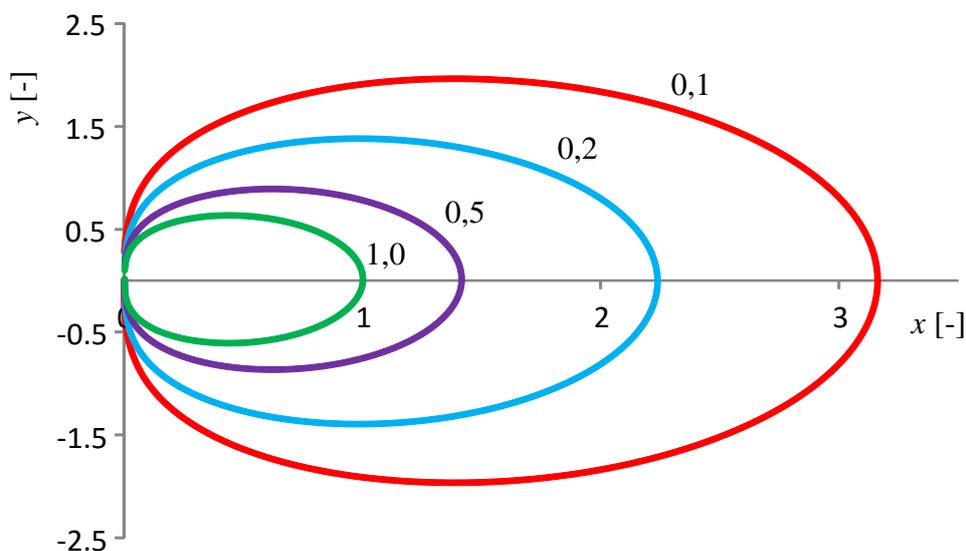
Kembali ke persamaan (2.12). Kita dapat menulis persamaan tersebut dalam bentuk

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

$$r^2 = \left( \frac{p}{4\pi\epsilon_0 V} \right) \cos\theta \quad (2.9)$$

Kita dapat mencari nilai  $r$  pada berbagai nilai  $\theta$  untuk satu nilai potensial (nilai potensial konstan). Dari nilai  $\theta$  dan nilai  $r$  yang diperoleh maka kita dapat mencari koordinat  $x = r\cos\theta$  dan  $y = r\sin\theta$ . Kemudian kita buat kurva  $y$  sebagai fungsi  $x$ . Pada kurva tersebut nilai potensial konstan. Kurva tersebut dinamakan kurva ekipotensial. Kurva tersebut dapat digambar dengan mudah menggunakan excel.

**Gambar 2.10** adalah contoh kurva ekipotensial pada berbagai nilai  $4\pi\epsilon_0 V/p$  (tertulis pada kurva). Makin besar  $V$  maka kurva makin kecil. Artinya kurva dengan potensial yang besar lebih dekat ke momen dipol. Potensial terbesar berada pada sumbu momen dipol dan terkecil pada sumbu tegak lurus momen dipol.



**Gambar 2.10** Kurva ekipotensial yang dihasilkan momen dipol. Ekipotensial artinya potensial sama besar. Pada kurva yang sama besar potensial sama.

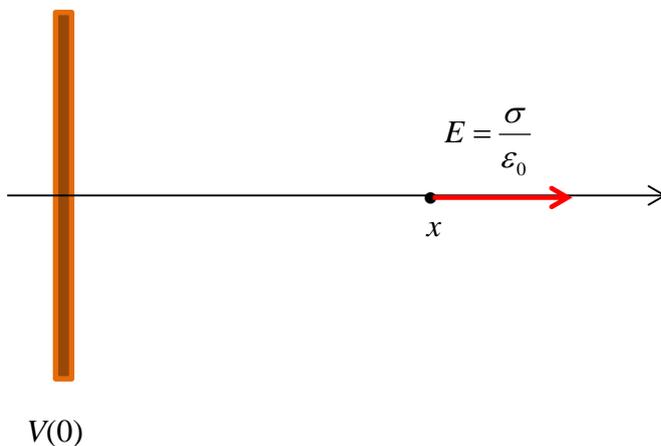
*Tambahan:* Kurva pada **Gambar 2.10** dapat digambar dengan mudah menggunakan Excel. Caranya sebagai berikut. Simpan nilai sembarang untuk  $4\pi\epsilon_0 V/p$ , misalnya di Cell F1. Masukkan batas sudut minimum di Cell A1 dengan menulis =

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

$-\pi()/2$ . Simpan kursor di Cell A2 lalu tulis persamaan  $=A1+\pi()/400$ . Copy Cell A2 hingga ke Cell A400. Jadi kita sudah dapat semua sudut dari  $-\pi/$  sampai  $\pi/2$ . Kita selanjutnya akan menghitung  $r$ . Tempatkan kursor pada Cell B1. Lalu tulis persamaan  $=SQRT(\cos(A1)/\$F\$1)$ . Ingat pada Cell F1 harus sudah terisi nilai. Lalu copy Cell B1 ke seluruh cell di bawahnya hingga B400. Jadi kita sudah mendapatkan pasangan  $\theta$  dan  $r$ . Untuk menggambar kurva kita perlu nilai  $x$  dan  $y$ . Kita mencari nilai  $x$  pada kolom C dan nilai  $y$  pada kolom D. Tempatkan kursor pada Cell C1. Ketik persamaan  $=B1*\cos(A1)$ . Tempatkan kursor pada Cell D1 lalu ketik persamaan  $=B1*\sin(A1)$ . Kemudian copy Cell C1 dan D1 ke seluruh cell di bawahnya hingga cell ke 400. Akhirnya kita dapatkan pasangan nilai  $x$  dan  $y$ . Lalu pilih kolom C dan kolom D dan buatlah kurvanya.

### 2.6 Potensial listrik pelat tak berhingga

Pada Bab 1 kita telah menghitung kuat medan listrik yang dihasilkan oleh pelat tak berhingga, yaitu  $E = \sigma/2\epsilon_0$ . Tampak bahwa kuat medan listrik konstan di mana pun lokasinya dan pada jarak berapa pun dari pelat. Selanjutnya kita akan menghitung berapa potensial di sekitar pelat tak berhingga.



**Gambar 2.11** Medan listrik yang dihasilkan pelat tak berhingga arahnya tegak lurus pelat karena sifat simetri. Setiap titik pada pelat memiliki sifat yang sama. Ke mana pun kita bergerak sepanjang pelat maka kita mendeteksi medan yang arahnya sama. Ini hanya mungkin terjadi jika arah medan tegak lurus pelat.

Persoalan ini dapat dilihat hanya dalam kasus satu dimensi. Kita akan mencari potensial pada titik sembarang yang berjarak  $x$  dari pelat

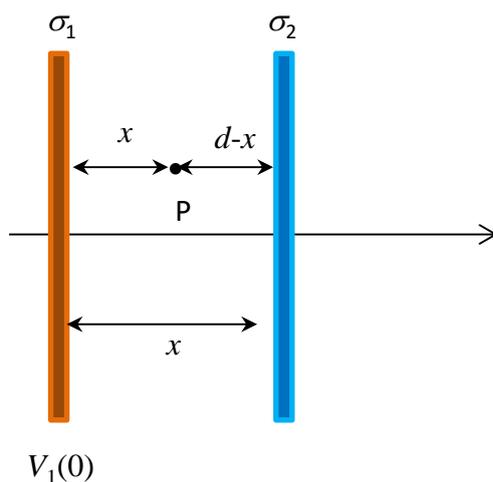
## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

seperti diilustrasikan pada Gambar 2.11. Potensial pelat kita anggap  $V(0)$ . Dengan menggunakan persamaan (2.5) maka kita dapatkan

$$\begin{aligned} V(x) &= V(0) - \int_0^x E dx \\ &= V(0) - \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \int_0^x dx \\ &= V(0) - \frac{\sigma x}{2\epsilon_0} \end{aligned} \tag{2.10}$$

Tampak bahwa potensial yang dihasilkan pelat tak berhingga berubah secara linier terhadap jarak dari pelat. Pada jarak tak berhingga, potensial menjadi tak berhingga (potensial positif atau negatif tergantung pada jenis muatan pelat).

Berikutnya kita akan mencari potensial listrik yang dihasilkan oleh dua pelat tak berhingga dalam posisi sejajar dan terpisah sejauh  $d$ . Masing-masing pelat memiliki kerapatan muatan  $\sigma_1$  dan  $\sigma_2$ . Misalkan potensial pelat pertama  $V_1(0)$  dijadikan referensi (**Gambar 2.12**). Kita mulai dengan mencari potensial di antara dua pelat pada jarak  $x$  dan pelat pertama, berarti pada jarak  $d - x$  dari pelat kedua.



**Gambar 2.12** Variabel-variabel untuk menentukan potensial listrik antara dua pelat tak berhingga.

Kuat medan listrik antara dua pelat adalah  $E_i = (\sigma_1 - \sigma_2)/2\epsilon_0$ .

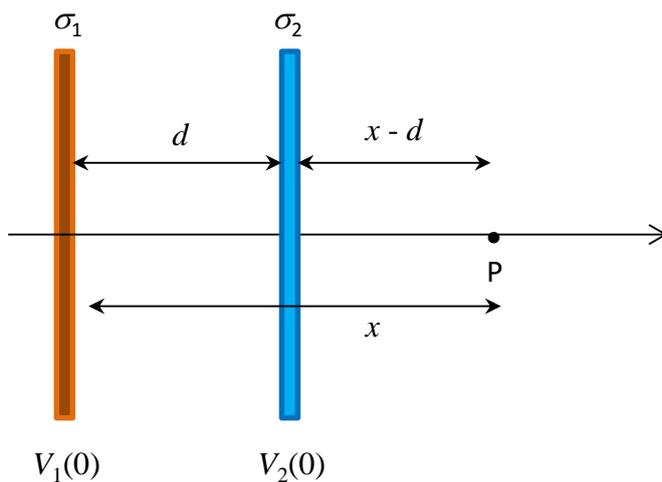
## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

Dengan demikian, potensial pada berbagai titik di antara dua pelat menjadi

$$\begin{aligned} V(x) &= V_1(0) - \int_0^x E_i dx \\ &= V_1(0) - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2\epsilon_0} x \end{aligned} \quad (2.11)$$

Pelat kedua berada pada posisi  $x = d$  sehingga potensial pelat kedua menjadi

$$\begin{aligned} V_2 &= V(d) \\ &= V_1(0) - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2\epsilon_0} d \end{aligned}$$



**Gambar 2.13** Menentukan potensial listrik di sebelah kanan pelat kedua.

Berikutnya kita tentukan potensial di sebelah kanan pelat kedua seperti diilustrasikan pada **Gambar 2.13**. Kita ambil pelat kedua sebagai referensi. Kuat medan listrik pada daerah di sebelah kanan pelat kedua adalah  $E_{kn} = (\sigma_1 + \sigma_2)/2\epsilon_0$ . Maka potensial listrik pada koordinat  $x$  di ruang sebelah kanan pelat kedua adalah

$$V(x) = V_2 - \int_d^x E_{kn} dx$$

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

---

$$= V_2 - \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2\epsilon_0}(d - x)$$

Atau dapat juga dinyatakan dalam potensial  $V_1(0)$  sebagai berikut

$$V(x) = V_1(0) - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2\epsilon_0}d - \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2\epsilon_0}(d - x)$$

Kasus menarik adalah jika dua pelat memiliki muatan yang sama besar tetapi berbeda tanda, atau  $\sigma_2 = -\sigma_1$ . Ada kasus ini maka potensial di antara dua pelat menjadi

$$V(x) = V_1(0) - \frac{\sigma_1 - (-\sigma_1)}{2\epsilon_0}x$$

$$= V_1(0) - \frac{\sigma_1}{\epsilon_0}x$$

Potensial di sebelah kanan pelat kedua adalah

$$V(x) = V_1(0) - \frac{\sigma_1 - (-\sigma_1)}{2\epsilon_0}d - \frac{\sigma_1 + (-\sigma_1)}{2\epsilon_0}(d - x)$$

$$= V_1(0) - \frac{\sigma_1}{\epsilon_0}d$$

Berarti pada ruang di sebelah kanan pelat kedua potensial listrik berharga konstan. Mengapa demikian? Jika dua pelat memiliki muatan yang sama dan berlawanan tanda maka kuat medan listrik di luar pelat nol. Kuat medan listrik nol menyebabkan potensial berharga konstan.

### 2.7 Potensial Listrik sekitar kawat Lurus

Ada yang menguntungkan dalam menghitung potensial listrik dibandingkan dengan menghitung medan listrik. Pada perhitungan potensial listrik kita tidak perlu memperhatikan arah. Penjumlahan atau integral dilakukan secara skalar. Berbeda dengan perhitungan medan listrik. Kita harus memperhatikan arah secara seksama sehingga sering menghadapi sejumlah kesulitan atau langkah-langkah yang ditempuh cukup panjang.

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

---

Sebagai ilustrasi untuk memperlihatkan mudahnya menghitung potensial listrik, mari kita hitung potensial yang dihasilkan oleh silinder logam yang panjangnya tak berhingga. Silinder tersebut memiliki jari-jari  $a$  dan dipasang pada potensial  $V_0$ . Dengan menggunakan hukum Gauss mudah kita buktikan bahwa kuat medan listrik di luar silinder memenuhi

$$E(r) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\lambda}{r}$$

Sedangkan kuat medan listrik di dalam silinder nol.

Mari kita hitung potensial di luar silinder pada jarak  $r$  dari sumbu silinder. Kita gunakan permukaan silinder sebagai posisi referensi di mana  $V(R) = V_0$ . Potensial pada sembarang posisi di luar silinder memenuhi

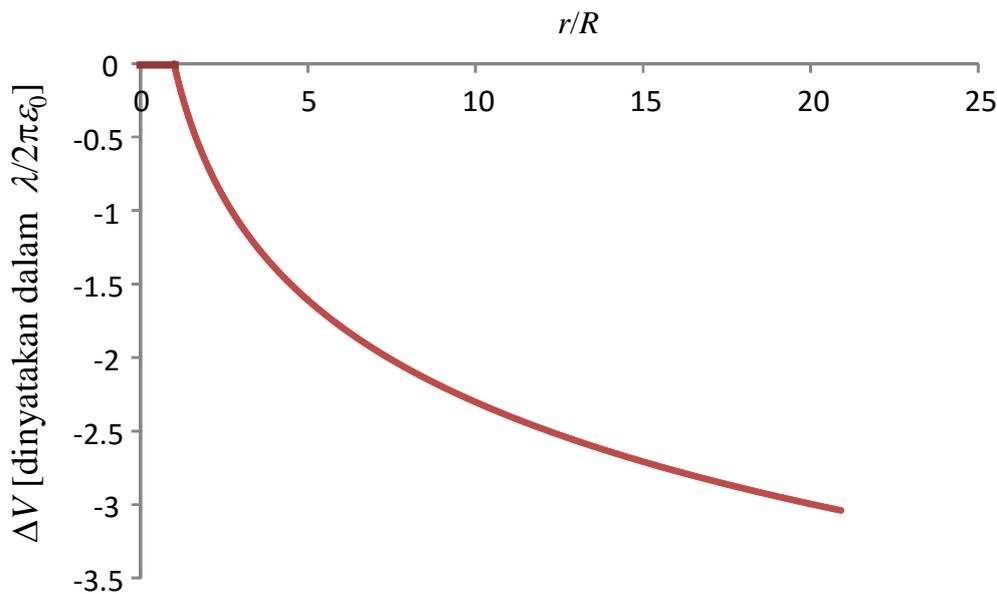
$$\begin{aligned} V(r) &= V(R) - \int_R^r E dr \\ &= V(R) - \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \int_R^r \frac{dr}{R} \\ &= V(R) - \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r}{R} \end{aligned} \tag{2.11}$$

Karena silinder terbuat dari konduktor maka potensial di seluruh bagian konduktor sama. Jadi pada posisi  $0 < r < R$  besar potensial sama dengan potensial di permukaan, yaitu  $V_0$ .

Dari persamaan (2.11) kita mendapatkan perbedaan potensial di suatu titik di luar silinder yang berjarak  $r$  dari pusat silinder dengan potensial pada permukaan silinder adalah

$$\begin{aligned} \Delta V(r) &= V(r) - V(R) \\ &= -\frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r}{R} \end{aligned} \tag{2.12}$$

**Gambar 2.14** adalah plot beda potensial sebagai fungsi jarak dari sumbu kawat.



**Gambar 2.14** Perbedaan potensial sebagai fungsi jarak dari sumbu kawat. Beda potensial dinyatakan dalam satuan  $\lambda/2\pi\epsilon_0$  sedangkan jarak dari sumbu kawat dinyatakan dalam satuan  $R$ .

### 2.8 Mencari medan dari potensial

Kita sudah menyinggung di atas bahwa mencari potensial jauh lebih mudah daripada mencari medan listrik. Mencari medan listrik melibatkan integral besaran vector sedangkan mencari potensial hanya melibatkan integral besaran skalar. Oleh karena itu menjadi pertanyaan, dapatkah kita menentukan medan dari besaran potensial dengan cara yang mudah? Karena kesulitan biasanya muncul dalam proses integral. Biarlah integral dilakukan pada potensial sehingga didapat solusi dengan mudah. Lalu kita mencari kuat medan dari potensial. Jawabnya, ternyata ada. Skemanya ditunjukkan pada **Gambar 2.15**.

**Gambar 2.15** menyatakan bahwa medan listrik merupakan negative dari gradient dari potensial listrik, atau

$$\vec{E}(x, y, z) = -\hat{i} \frac{\partial V}{\partial x} - \hat{j} \frac{\partial V}{\partial y} - \hat{k} \frac{\partial V}{\partial z} \quad (2.13)$$

Hubungan ini menyatakan bahwa komponen-komponen medan listrik memenuhi

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

$$E_x = -\frac{\partial V}{\partial x}$$

$$E_y = -\frac{\partial V}{\partial y}$$

$$E_z = -\frac{\partial V}{\partial z}$$

$$-\left(\hat{i} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{j} \frac{\partial}{\partial y} + \hat{k} \frac{\partial}{\partial z}\right)$$



**Gambar 2.15** Langkah mencari kuat medan listrik jika potensial listrik diketahui. Kuat medan listrik sama dengan negative dari gradient potensial.

Sebagai contoh, mari kita aplikasikan persamaan ini untuk mencari medan listrik yang dihasilkan oleh momen dipol. Kita sudah menghitung dengan cara cukup mudah potensial yang dihasilkan oleh momen dipol sebagai berikut

$$V(r, \theta) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p \cos\theta}{r^2}$$

Mengingat  $\cos\theta = x/r$  dan  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$  maka kita dapat menyatakan  $V$  dalam koordinat kartesian sebagai berikut

$$V(x, y, z) = \frac{p}{4\pi\epsilon_0} \frac{x}{(x^2 + y^2)^{3/2}}$$

Dari bentuk ini kita dapat mencari komponen-komponen medan listrik

$$E_x = -\frac{p}{4\pi\epsilon_0} \frac{\partial}{\partial x} \frac{x}{(x^2 + y^2)^{3/2}}$$

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

---

$$= -\frac{p}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{1}{(x^2 + y^2)^{3/2}} - \frac{3}{2} \frac{x(2x)}{(x^2 + y^2)^{5/2}} \right]$$

$$= -\frac{p}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{(x^2 + y^2)}{(x^2 + y^2)^{5/2}} - \frac{3x^2}{(x^2 + y^2)^{5/2}} \right]$$

$$= -\frac{p}{4\pi\epsilon_0} \frac{(y^2 - 2x^2)}{(x^2 + y^2)^{5/2}}$$

$$= -\frac{p}{4\pi\epsilon_0} \frac{(y^2 - 2x^2)}{r^5}$$

$$= -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p}{r^3} \left[ \left( \frac{y}{r} \right)^2 - 2 \left( \frac{x}{r} \right)^2 \right]$$

$$= -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p}{r^3} [\sin^2 \theta - 2 \cos^2 \theta]$$

$$E_y = -\frac{p}{4\pi\epsilon_0} \frac{\partial}{\partial y} \frac{x}{(x^2 + y^2)^{3/2}}$$

$$= -\frac{p}{4\pi\epsilon_0} \left[ -\frac{3}{2} \frac{x(2y)}{(x^2 + y^2)^{5/2}} \right]$$

$$= \frac{p}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{3xy}{(x^2 + y^2)^{5/2}} \right]$$

$$= \frac{p}{4\pi\epsilon_0} \frac{3xy}{r^5}$$

$$= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{3p}{r^3} \left[ \left( \frac{x}{r} \right) \left( \frac{y}{r} \right) \right]$$

$$= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{3p}{r^3} \sin \theta \cos \theta$$

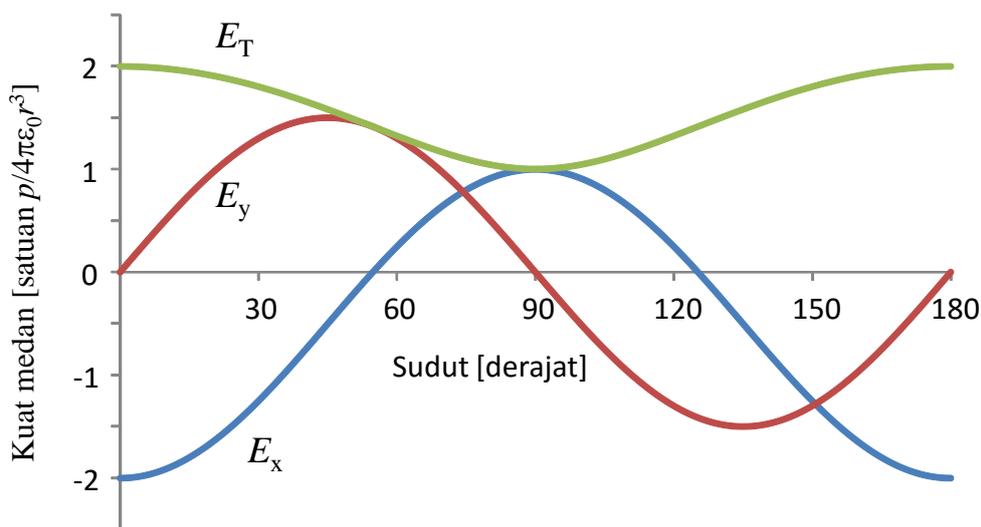
## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

$$E_z = -\frac{p}{4\pi\epsilon_0} \frac{\partial}{\partial z} \frac{x}{(x^2 + y^2)^{3/2}} = 0$$

Besar kuat medan pada berbagai sudut memenuhi

$$E_T = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$$

**Gambar 2.16** adalah contoh kurva kuat medan pada berbagai sudut. Kuat medan dinyatakan dalam satuan  $p/4\pi\epsilon_0 r^3$ . Tampak bahwa kuat medan simetri terhadap sumbu yang melewati sudut  $90^\circ$ . Sumbu tersebut adalah sumbu  $x$ .



**Gambar 2.16** Komponen kuat medan dan kuat besar kuat medan total yang dihasilkan momen dipol sebagai fungsi sudut dari sumbu dipol. Kuat medan dinyatakan dalam satuan  $p/4\pi\epsilon_0 r^3$  dan sudut dinyatakan dalam satuan derajat.

### Contoh 2.4

Potensial yang dihasilkan muatan titik memenuhi persamaan (2.6), yaitu

$$V(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}$$

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

---

Tentukan medan listrik di mana-mana.

### Jawab

Mengingat  $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$  maka kita dapat menyatakan  $V$  dalam koordinat Cartesian berikut ini

$$V(x, y, z) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}$$

Dengan demikian komponen medan listrik dalam arah  $x$ ,  $y$ , dan  $z$  adalah

$$\begin{aligned} E_x &= -\frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{(x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}} \\ &= -\frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left[ -\frac{1}{2} \frac{2x}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \right] \\ &= \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{x}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \end{aligned}$$

Dengan caar serupa kita dapatkan

$$\begin{aligned} E_y &= \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{y}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \\ E_z &= \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{z}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \end{aligned}$$

Besar medan listrik adalah

$$\begin{aligned} E &= \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} \\ &= \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{(x^2 + y^2 + z^2)} \end{aligned}$$

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

---

$$= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$$

Hasil ini persis seperti yang telah kita peroleh sebelumnya.

### 2.9 Bahan dielektrik

Bahan dielektrik adalah bahan di mana atom-atom atau molekul-molekul penyusunnya dapat mengalami polarisasi jika dikenai medan listrik. Polarisasi artinya muatan positif dan negative mengalami sedikit pergeseran sehingga terbentuk momen-momen dipol. Tanpa penerapan medan listrik maka titik pusat muatan positif dan muatan negative berimpit sehingga tidak terbentuk momen dipol. Namun, begitu dikenai medan listrik maka partikel yang bermuatan positif sedikit ditarik searah medan dan partikel bermuatan negative sedikit ditarik dalam arah berlawanan medan. Besarnya momen dipol yang dihasilkan berbanding lurus dengan medan yang mengenai momen dipol tersebut, atau kita dapat menulis

$$p = \alpha E \tag{2.14}$$

di mana

$p$  adalah momen dipol yang dihasilkan

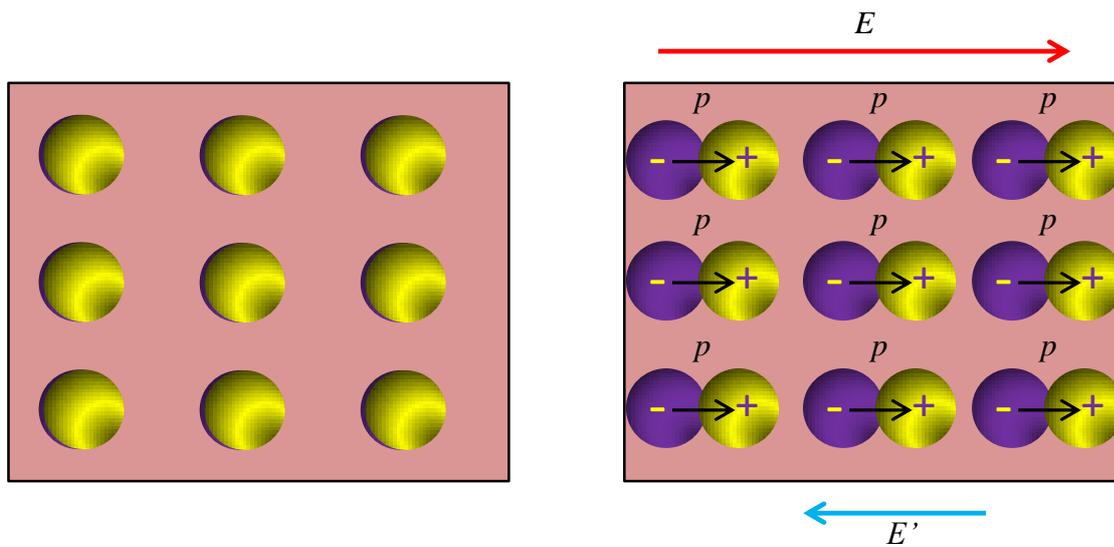
$E$  adalah medan luar yang diterapkan

$\alpha$  sebuah konstanta pembandingan yang bergantung pada jenis bahan.

Konstanta  $\alpha$  sering disebut polarisabilitas. Konstanta ini mengukur seberapa mudah suatu material dipolarisasi dengan menggunakan medan listrik dari luar.

**Gambar 2.17** adalah ilustrasi bagaimana menghasilkan polarisasi material. Ketika telah terbentuk momen dipol dalam material maka terbentuk medan listrik induksi,  $E'$ , yang arahnya melawan medan listrik luar yang digunakan untuk menghasilkan polarisasi. Kehadiran medan listrik induksi melemahkan medan listrik luar tersebut di dalam material. Medan listrik efektif dalam material menjadi  $E - E'$ .

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor



**Gambar 2.17** (kiri) Kondisi atom-atom atau molekul-molekul penyusun material sebelum diberikan medan listrik luar. Muatan positif dan negative berimpit sehingga tidak terbentuk momen dipol. (kanan) Ketika diberikan medan listrik luar maka terbentuk momen-momen dipol di dalam material. Besar momen dipol yang dihasilkan sebanding dengan medan listrik luar yang diterapkan. Akibat munculnya momen-momen dipol tersebut maka tercipta medan listrik induksi yang arahnya berlawanan dengan medan listrik luar yang diterapkan.

Jika terdapat  $N$  buah momen dipol maka momen dipol total yang dihasilkan adalah

$$\begin{aligned} M &= Np \\ &= N\alpha E \end{aligned} \tag{2.15}$$

Misalkan volum baha dielektron adalah  $V$  maka momen dipol total per satuan volum adalah

$$\begin{aligned} P &= \frac{M}{V} \\ &= \frac{N}{V} \alpha E \\ &= n\alpha E \end{aligned} \tag{2.16}$$

Besaran  $P$  dinamakan polarisasi dan  $n = N/V$  adalah konsentrasi momen

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

---

dipol (jumlah momen dipol per satuan volum).

Polarisasi dalam bahan dielektrik menyebabkan terbentuknya medan listrik induksi dalam arah berlawanan dengan medan listrik luar yang diterapkan. Ingat, medan listrik luar menggeser muatan positif searah medan dan muatan negative dalam arah berlawanan medan. Pasangan muatan tersebut akhirnya menghasilkan medan listrik dalam arah berlawanan medan luar. Karena banyak sekali jumlah pasangan muatan yang dihasilkan maka medan arah berlawanan yang dihasilkan bahan dielektrik menjadi cukup besar. Besarnya medan arah berlawanan yang dihasilkan bahan dielektrik berbanding lurus dengan polarisasi, atau

$$E' = \gamma P \quad (2.17)$$

Dengan adanya medan listrik induksi arah berlawanan ini, maka kuat medan dalam bahan dielektrik menjadi lebih kecil daripada kuat medan yang diterapkan. Kuat medan dalam bahan dielektrik menjadi

$$E_d = E - E' \quad (2.18)$$

Kita sudah menghitung momen dipol sebanding dengan kuat medan listrik yang mengenai pasangan muatan. Dari momen dipol tersebut kita menghitung polarisasi. Ketika medan listrik luar mulai diterapkan pada material maka tiap molekul merasakan medan listrik yang sama dengan medan listrik luar sehingga terbentuk momen dipol. Namun, begitu momen dipol-momen dipol terbentuk maka medan listrik dalam bahan menjadi berkurang akibat dihasilkannya medan listrik induksi yang memiliki arah melawan medan listrik luar. Setelah terjadi penurunan medan tersebut maka tiap atom atau molekul merasakan medan yang lebih kecil juga sehingga dihasilkan nilai momen dipol baru yang lebih kecil. Momen dipol baru yang dihasilkannya menjadi  $p = \alpha E_d$ . Ini berimplikasi polarisasi yang dihasilkan juga berubah menjadi  $P = n\alpha E_d$ . Polarisasi baru inilah yang stabil menghasilkan medan listrik induksi sebesar

$$E' = \gamma n\alpha E_d \quad (2.19)$$

Substitusi persamaan (2.19) ke dalam persamaan (2.18) maka diperoleh persamaan lengkap untuk kuat medan listrik dalam bahan dielektrik sebagai berikut

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

---

$$E_d = E - \gamma\alpha E_d$$

atau

$$(1 + \gamma\alpha)E_d = E$$

Kita definisikan konstanta dielektrik bahan sebagai berikut

$$\kappa = 1 + \gamma\alpha \tag{2.20}$$

Dengan definisi ini maka persamaan sebelumnya dapat ditulis menjadi

$$E_d = \frac{E}{\kappa} \tag{2.21}$$

Parameter  $\gamma$  dan  $\alpha$  mempunyai positif sehingga berdasarkan persamaan (2.33) kita simpulkan  $\kappa > 1$ . Jadi kita simpulkan bahwa dalam bahan dielektrik kuat medan listrik lebih kecil daripada medan luar yang diterapkan. Akibatnya, potensial listrik pun berkurang. Sebagai contoh, jika antara dua pelat sejajar dipasang bahan dielektrik, maka beda potensial antara dua pelat menjadi

$$\Delta V = \frac{\sigma d}{\kappa \epsilon_0}$$

Begitu pula potensial listrik di sekitar muatan titik yang ditempatkan dalam medium dengan konstanta dielektrik  $\kappa$  adalah

$$V = \frac{1}{4\pi\kappa\epsilon_0} \frac{Q}{r}$$

### Contoh 2.5

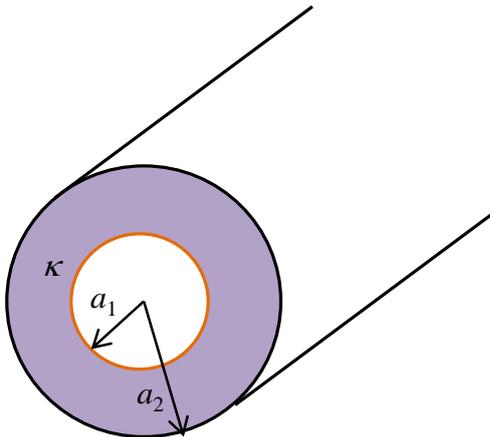
Dua buah kulit silinder dengan jari-jari  $a_1$  dan  $a_2$  dipasang konsentris. Silinder dalam mengandung kerapatan muatan per satuan panjang  $\lambda_1$  dan silinder kedua mengandung kerapatan muatan per satuan panjang  $\lambda_2$ . Pada ruang antara dua silinder diisi penuh dengan bahan

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

dielektrik yang memiliki constant  $\kappa$ . Kita misalkan silinder pertama dihubungkan dengan sumber potensial  $V_0$ . Kita ingin menghitung kuat medan listrik dan potensial di semua posisi dari  $r = 0$  sampai  $r = \infty$ .

### Jawab

Persoalan kita diilustrasikan pada **Gambar 2.18**



Gambar 2.18 Gambar untuk Contoh 2.5

Dengan menggunakan hukum Gauss kita dapat membuktikan dengan mudah bahwa kuat medan listrik pada berbagai posisi. Jika belum dimasukkan bahan dielektrik antara silinder pertama dan kedua maka kuat medan listrik pada berbagai posisi sebagai berikut

$$E = 0 \text{ pada } 0 < r < a_1$$

$$E(r) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\lambda_1}{r} \text{ pada } a_1 < r < a_2$$

$$E(r) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{r} \text{ pada } r > a_2$$

Namun, setelah dimasukkan bahan dielektrik antara dua silinder maka kuat medan listrik antara dua silinder berkurang menjadi

$$E(r) = \frac{1}{2\pi\kappa\epsilon_0} \frac{\lambda_1}{r} \text{ pada } a_1 < r < a_2$$

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

---

Sekarang kita mencari persamaan potensial listrik. Pertama kita cari potensial listrik pada lokasi antara dua silinder dan di sini ada bahan dielektrik. Potensial tersebut memenuhi

$$\begin{aligned}V(r) &= V(a_1) - \int_{a_1}^r E dr \\&= V(a_1) - \frac{\lambda_1}{2\pi\kappa\epsilon_0} \int_{a_1}^r \frac{dr}{r} \\&= V(a_1) - \frac{\lambda_1}{2\pi\kappa\epsilon_0} \ln \frac{r}{a_1}\end{aligned}$$

Potensial pada silinder kedua menjadi

$$V(a_2) = V(a_1) - \frac{\lambda_1}{2\pi\kappa\epsilon_0} \ln \frac{a_2}{a_1}$$

Selanjutnya kita menghitung potensial di luar silinder kedua. Kita gunakan permukaan silinder kedua sebagai referensi sehingga

$$\begin{aligned}V(r) &= V(a_2) - \int_{a_2}^r E dr \\&= V(a_2) - \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2\pi\epsilon_0} \int_{a_2}^r \frac{dr}{r} \\&= V(a_2) - \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r}{a_2} \\&= V(a_1) - \frac{\lambda_1}{2\pi\kappa\epsilon_0} \ln \frac{a_2}{a_1} - \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r}{a_2}\end{aligned}$$

Selanjutnya kita tentukan potensial di dalam ruang silinder pertama. Karena medan listrik di sini nol maka potensial di seluruh ruang tersebut konstan dan sama dengan potensial di permukaan silinder pertama, yaitu

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

$V(a_1)$ . Jadi, potensial di berbagai posisi adalah

$$V(r) = V(a_1) \quad \text{untuk } 0 < r < a_1$$

$$V(r) = V(a_1) - \frac{\lambda_1}{2\pi\kappa\epsilon_0} \ln \frac{r}{a_1}, \quad \text{untuk } a_1 < r < a_2$$

$$V(r) = V(a_1) - \frac{\lambda_1}{2\pi\kappa\epsilon_0} \ln \frac{a_2}{a_1} - \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r}{a_2}, \quad \text{untuk } r > a_2$$

Tabel 2.2 Konstanta dielektrik sejumlah material.

Material	Konstanta Dielektrik
vakum	1 (berdasarkan definisi)
udara	1,00058986 ± 0,00000050 (pada STP dan frekuensi pengukura 0,9 MHz)
Teflon	2,1
Polietilen	2,25
polipropilen	2,2-2,36
Karbon disulfida	2,6
kertas	3,85
Polimer elektroaktif	2-12
mika	3-6
Silicon dioksida	3,9
beton	4,5
kaca	3,7-10
intan	5,5 - 10
grafit	10-15
silikon	11,68
metanol	30
air	Sekitar 80 (sangat bergantung suhu)
Titanium dioksida	86-173
Strinsium titanat	301
Barium stronsium titanat	500
Timba zirkonat titanat	500-6000
Barium titanat	1200 - 10000
Kalsium tembaga titanat	< 250000

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

Konstanta dielektrik material bervariasi sangat jauh mulai dari mendekati satu hingga puluhan ribu. Konstanta dielektrik sama dengan satu dimiliki oleh ruang hampa. Material memiliki konstanta dielektrik lebih dari satu. Tabel 2.2 adalah daftar konstanta dielektrik sejumlah material. Konstanta dielektrik yang berbeda memiliki jenis aplikasi yang berbeda

### 2.10 Teorema usaha energi

Dalam ruang dengan kuat medan listrik  $\vec{E}$ , sebuah muatan mengalami gaya listrik  $\vec{F} = q\vec{E}$ . Kerja yang dilakukan gaya listrik untuk memindahkan muatan dari posisi  $\vec{r}_1$  ke posisi  $\vec{r}_2$  adalah

$$W = \int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} \vec{F} \cdot d\vec{r} = \int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} (q\vec{E}) \cdot d\vec{r} = q \int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

Berdasarkan teorema usaha energi, kerja yang dilakukan gaya luar sama dengan perubahan energi kinetik. Jadi,  $W$  dapat diganti dengan

$$W = K_2 - K_1$$

Berdasarkan definisi potensial listrik, integral yang berada di ruas kanan persamaan sebelumnya dapat diganti dengan

$$\int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} \vec{E} \cdot d\vec{r} = - \left( - \int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} \vec{E} \cdot d\vec{r} \right) = -(V_2 - V_1)$$

Dengan demikian, persamaan (2.36) dapat ditulis menjadi

$$K_2 - K_1 = q \{ -(V_2 - V_1) \} = qV_1 - qV_2$$

Tetapi,  $qV$  adalah energi potensial listrik,  $U$  sehingga kita dapat menulis

$$K_2 - K_1 = U_1 - U_2$$

atau

$$K_1 + U_1 = K_2 + U_2$$

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

Hubungan (2.17) merupakan ungkapan hukum kekekalan energi mekanik bagi partikel yang bergerak dalam ruang yang mengandung medan listrik. Hukum yang sama telah kita bahas di mekanika ketika benda bergerak dalam medan konservatif. Ini menunjukkan bahwa medan listrik juga merupakan medan konservatif.

### Contoh 2.6

Sebuah elektron lepas dari katoda menuju anoda dengan laju awal nol. Beda potensial antara anoda dan katoda adalah 100 kV. Berapa laju elektron saat mencapan anoda? Muatan elektron adalah  $-1,6 \times 10^{-19}$  C dan massanya  $9,1 \times 10^{-31}$  kg.

### Jawab

Dari soal kita dapatkan sejumlah informasi sebagai berikut.  $V_1 = 0$  sehingga  $U_1 = qV_1 = (1,6 \times 10^{-19}) \times 0 = 0$  J.  $V_2 = 100$  kV =  $10^5$  V sehingga  $U_2 = qV_2 = (-1,6 \times 10^{-19}) \times 10^5 = -1,6 \times 10^{-14}$  J.  $K_1 = 0$  dan  $K_2 = (1/2) m v^2 = (1/2) \times 9,1 \times 10^{-31} \times v^2 = 4,55 \times 10^{-31} \times v^2$ . Dengan menggunakan hukum kekekalan energi mekanik maka

$$K_2 = K_1 + U_1 - U_2$$

$$4,55 \times 10^{-31} \times v^2 = 0 + 0 - (-1,6 \times 10^{-14})$$

sehingga

$$v^2 = \frac{1,6 \times 10^{-14}}{4,55 \times 10^{-31}} = 3,3 \times 10^{16}$$

atau

$$v = 1,8 \times 10^8 \text{ m/s}$$

### 2.11 Satuan elektronvolt

Salah satu satuan energi yang sering dipakai ketika membahas atom dan molekul adalah elektron volt yang disingkat eV. Satu elektron volt adalah energi yang dimiliki elektron ketika berada pada potensial satu volt. Jadi

$$\begin{aligned} 1 \text{ eV} &= \text{muatan elektron} \times \text{satu volt} \\ &= (1,6 \times 10^{-19} \text{ C}) \times 1 \text{ V} \\ &= 1,6 \times 10^{-19} \text{ J} \end{aligned}$$

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

### Contoh 2.7

Energi yang diperlukan untuk melepaskan elektron dari atom hydrogen disebut energi ionisasi atom hydrogen. Besar energi tersebut adalah 13,6 eV. Berapa besar energi tersebut dalam satuan SI?

### Jawab

$$13,6 \text{ eV} = 13,6 \times (1,6 \times 10^{-19}) = 2,18 \cdot 10^{-18} \text{ J}$$

### 2.12. Kapasitor

Kamu tentu pernah memencet tombol keyboard komputer. Jika kamu pencet tombol A maka di monitor komputer muncul huruf A. Mengapa hal itu terjadi? Jawabannya adalah karena tombol keyboard berfungsi sebagai saklar dan sebagian sebagai kapasitor. Untuk keyboard jenis kapasitor, pemencetan tombol keyboard mengubah nilai kapasitansi tombol tersebut. Mikroprocessor dalam komputer mendeteksi perubahan nilai tersebut sehingga mengetahui tombol mana yang sedang dipencet. Akhirnya, huruf yang bersesuaian dengan tombol tersebut ditampilkan di layar. **Gambar 2.19** adalah contoh kapasitor yang dijual di pasaran.



**Gambar 2.19** Contoh kapasitor yang dijual di pasaran (SparkFun Learn)

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor



**Gambar 2.20** Contoh kapasitor yang terpasang pada rangkaian elektronik (Capacitor Lab)

Apa sebenarnya kapasitor itu? Kapasitor adalah piranti elektronik yang dapat menyimpan muatan listrik. Kemampuan kapasitor menyimpan muatan listrik diungkapkan oleh besaran yang namanya kapasitansi. Makin besar kapasitansi sebuah kapasitor, maka makin besar pula muatan yang dapat disimpan kapasitor tersebut. Ukuran kapasitor merepresentasikan kemampuan menyimpan muatan. Makin besar ukuran kapasitor maka makin banyak muatan yang dapat disimpan. **Gambar 2.20** contoh kapasitor yang terpasang pada rangkaian elektronik. Satu rangkaian elektronik dapat memuat puluhan atau lebih kapasitor.

Jika sebuah kapasitor yang mampu menyimpan muatan  $Q$  ketika dihubungkan dengan potensial  $V$ , maka kapasitansi kapasitor tersebut,  $C$ , didefinisikan sebagai

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.22)$$

Tampak bahwa satuan kapasitansi kapasitor adalah  $C/V$ . Satuan ini memiliki nama khusus, yaitu Farad yang disingkat F. Berbagai tipe

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

kapasitor yang ada beserta jangkauan kapasitansi dan tegangan kerjanya tampak pada Tabel 2.3

**Tabel 2.3** Berbagai tipe kapasitor dan sifat-sifatnya

Tipe	Jangkauan kapasitansi	Tegangan maksimum	Komentar
mika	1 pF – 10 nF	100 – 600 V	Sangat berguna digunakan pada daerah frekuensi radio
keramik	10 pF – 1 $\mu$ F	50 – 30 000 V	Kecil dan murah
polistiren	10 pF – 2,7 $\mu$ F	100 – 600 V	Kualitas tinggi, digunakan pada filter yang teliti
polikarbonat	100 pF – 30 $\mu$ F	50 – 800 V	Kualitas tinggi, ukuran kecil
tantalum	100 nF – 500 $\mu$ F	6 – 100 V	Kapasitansi tinggi
Elektrolit (aluminium)	100 nF – 2 F	3 – 600 V	Filer catu daya untuk meratakan tegangan

### 2.13 Kapasitor pelat sejajar

Bentuk kapasitor yang paling sederhana adalah kapasitor pelat sejajar. Kapasitor ini terdiri dari dua pelat konduktor yang sejajar dan dipisahkan oleh sebuah lapisan isolator seperti diilustrasikan pada **Gambar 2.21**. Kita misalkan luas masing-masing pelat adalah  $A$  dan jarak antar pelat adalah  $d$ . Misalkan pula kerapatan muatan listrik yang diberikan pada masing-masing pelat adalah  $+\sigma$  dan  $-\sigma$ .

Dengan demikian muatan yang dikandung masing-masing pelat adalah  $+Q = +\sigma A$  dan  $-Q = -\sigma A$ . Dalam keadaan demikian, kita katakan kapasitor menyimpan muatan  $Q$ . Jadi kapasitor menyimpan muatan  $Q$  jika salah satu pelat memiliki muatan  $-Q$  dan pelat lainnya memiliki muatan  $+Q$ .

Kita sudah bahas dalam Bab 1 bahwa kuat medan listrik antar dua pelat sejajar yang dipisahkan oleh udara atau vakum adalah  $E = \sigma / \epsilon_0$ . Dengan demikian, beda potensial antara dua pelat kapasitor adalah

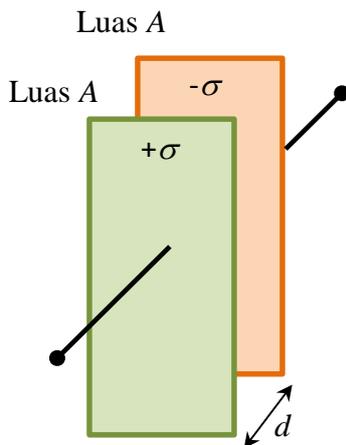
$$V = Ed$$

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

$$\begin{aligned} &= \frac{\sigma}{\epsilon_0} d \\ &= \frac{(\sigma A) d}{\epsilon_0 A} \\ &= \frac{Q d}{\epsilon_0 A} \end{aligned}$$

Dengan menggunakan persamaan di atas dan definisi kapasitor maka kita dapatkan kapasitansi kapasitor pelat sejajar adalah

$$\begin{aligned} C &= \frac{Q}{V} \\ &= \epsilon_0 \frac{A}{d} \end{aligned} \tag{2.23}$$



**Gambar 2.21** Skema kapasitor pelat sejajar. Bagian utamanya adalah dua pelat sejajar yang terpisah sangat dekat. Biasanya dua pelat dipisahkan dengan lapisan tipis osilator.

Terlihat dari persamaan (2.23) bahwa kapasitansi kapasitor pelat sejajar hanya bergantung pada geometri kapasitor, yaitu lebar pelat dan jarak antar pelat. Kapasitansi kapasitor tidak bergantung pada jenis bahan elektroda.

### 2.14 Memperbesar kapasitansi kapasitor

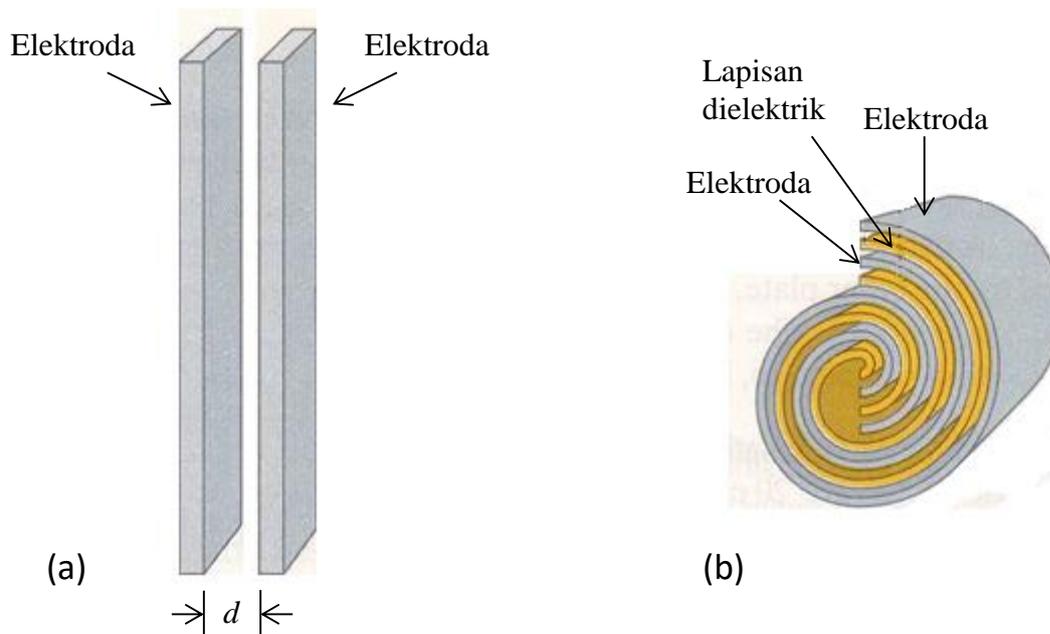
Berdasarkan persamaan (2.23), ada sejumlah cara untuk memperbesar kapasitansi sebuah kapasitor. Beberapa di antaranya sebagai

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

berikut

### **Memperbesar luas pelat.**

Salah satu cara memperbesar nilai kapasitansi adalah memperbesar pelat kapasitor. Secara teori, dengan memperbesar ukuran pelat sebesar-besarnya maka kapasitansi dapat diperbesar sebesar-besarnya. Namun, jika ukuran pelat diperbesar, maka ukuran kapasitor menjadi sangat besar. Adakah cara lain untuk memperbesar kapasitansi kapasitor tetapi tetap mempertahankan ukuran kapasitor tidak terlalu besar. Agar ukuran kapasitor tidak terlalu besar, maka ke dua pelat dibatasi dengan lapisan tipis isolator seperti kertas, kemudian keduanya digulung secara bersama, seperti diilustrasikan pada **Gambar 2.22**. Akhirnya kita mendapatkan bodi kapasitor berbentuk silinder yang mengandung pelat yang cukup luas,



**Gambar 2.22** Kapasitor pelat sejajar biasanya digulung untuk memperbesar luas pelat.

Pendekatan terbaru untuk memperluas konduktor pada kapasitor adalah menggunakan elektroda berpori. Keberadaan pori-pori menyebabkan bidang kontak antara dielektrik dengan pelat makin besar. Bahan berpori memiliki luas permukaan lebih besar daripada bahan dengan permukaan halus. Luas permukaan bahan berpori bisa puluhan kali lipat luas permukaan bahan dengan permukaan halus. Superkapasitor adalah

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

---

kapasitor yang memiliki kapasitansi yang sangat besar dan salah satu cara membuatnya adalah menggunakan elektroda berpori.

### **Memperkecil jarak antar pelat**

Kapasitansi kapasitor dapat diperbesar dengan memperkecil jarak antar pelat. Tetapi pendekatan ini memiliki batas. Jika jarak antar dua pelat sangat kecil maka kuat medan listrik antar dua pelat menjadi sangat besar (ingat hubungan  $E = V/d$ ). Medan yang sangat besar dapat mengionisasi atom/molekul antar dua pelat sehingga bahan pembatas yang semula isolator dapat berubah menjadi konduktor. Ini berakibat mengalirnya muatan dari satu pelat ke pelat lain melalui lapisan pembatas tersebut. Dalam keadaan demikian kita katakan kapasitor bocor.

Sebagai ilustrasi untuk kapasitor dengan ketebalan lapisan dielektrik 100 nm. Dengan menggunakan tegangan 5 V yang merupakan tegangan yang umumnya dipakai untuk divais digital maka dihasilkan medan listrik dalam lapisan dielektrik sekitar 5 Volt/100 nm =  $5 \times 10^7$  V/m. Nilai medan tersebut cukup besar tetapi masih aman karena berada di bawah ambang batas “avalanche breakdown” material. Jika ketebalan lapisan dielektrik direduksi hingga 20 nm sampai 30 nm maka penerapan tegangan sekitar 5 Volt menghasilkan medan listrik dalam dielektrik antara  $1,7 \times 10^9$  sampai  $2,5 \times 10^9$  V/m. Medan tersebut sangat besar sehingga meningkatkan peluang terjadinya “avalanche breakdown” material serta meningkatkan peluang terjadinya penerobosan electron (electron tunneling) melewati dielektrik. Ke dua fenomena tersebut merusak performance kapasitor yang dibuat.

### **Menggunakan bahan dielektrik**

Pendekatan yang lebih umum dipakai dalam meningkatkan kapasitansi kapasitor adalah menggunakan bahan dielektrik dengan konstanta dielektrik tinggi sebagai lapisan pemisah dua pelat. Dengan penggunaan bahan dielektrik ini maka kapasitansi kapasitor menjadi

$$C = \kappa \epsilon_0 \frac{A}{d} \tag{2.24}$$

dengan  $\kappa$  adalah konstanta dielektrik bahan.

Material dengan konstanta dielektrik tinggi seperti hafnium oksida makin banyak digunakan dalam perancangan divais elektronik. Material

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

dielektrik berbasis hafnium memiliki konstanta dielektrik yang sangat tinggi dan dapat mengatasi sejumlah permasalahan yang dihadapi jika materiil dibuat tipis untuk memperbesar kapasitansi. Tahun 2007 Intel mengembangkan prosessor dengan berbasis material dielektrik hafnium oksida ketebalan 45 nanometer. IBM dan NEC (Jepang) juga mengembangkan divasis menggunakan material dielektrik berbasis hafnium.

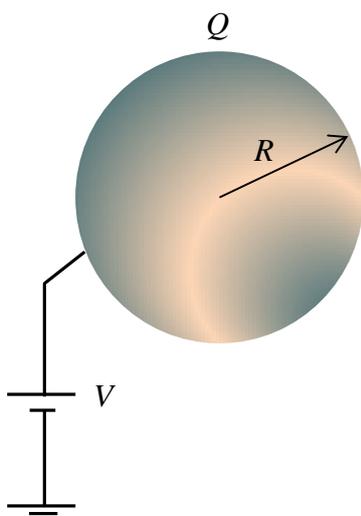
### 2.15 Kapasitor satu bola konduktor

Sebuah bola konduktor dapat juga berfungsi sebagai sebuah kapasitor. Lihat **Gambar 2.23** sebagai ilustrasi. Pada **Gambar 2.23** bola konduktor yang berjari-jari  $R$  memiliki potensial  $V$  relatif terhadap tanah. Telah dibahas di Bab 1 bahwa potensial di permukaan bola konduktor yang memiliki muatan  $Q$  adalah

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R}$$

Berdasarkan definisi persamaan (2.22), kapasitansi bola konduktor menjadi

$$\begin{aligned} C &= \frac{Q}{V} \\ &= 4\pi\epsilon_0 R \end{aligned} \tag{2.25}$$

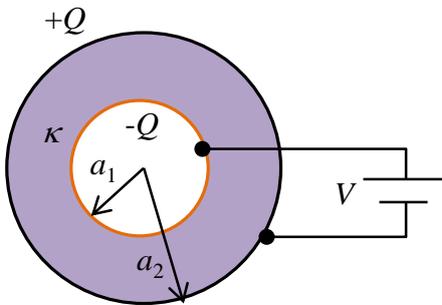


**Gambar 2.23** Bola konduktor yang diberi potensial.

### 2.16 Kapasitansi dua bola konduktor konsentris

Sekarang kita perhatikan dua bola konduktor konsentris yang memiliki jari-jari  $a_1$  dan  $a_2$ , dan diantara keduanya disisipkan bahan dielektrik, seperti diperlihatkan dalam **Gambar 2.24**. Ke dua bola dihubungkan dengan beda potensial  $V$ . Misalkan muatan masing-masing bola adalah  $+Q$  dan  $-Q$ . Kuat medan listrik antara dua bola hanya ditentukan oleh muatan bola  $a_1$ . Mengingat antara dua bola disisipkan bahan dielektrik maka kuat medan listrik antara dua bola adalah

$$E = \frac{1}{4\pi\kappa\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$$



**Gambar 2.24** Dua bola konsentris dipasang pada suatu beda potensial

Dengan demikian, beda potensial antara dua bola memenuhi

$$\begin{aligned} V &= \int_{R_1}^{R_2} E dr \\ &= \frac{Q}{4\pi\kappa\epsilon_0} \int_{a_1}^{a_2} \frac{dr}{r^2} \\ &= \frac{Q}{4\pi\kappa\epsilon_0} \left[ -\frac{1}{r} \right]_{a_1}^{a_2} \\ &= \frac{Q}{4\pi\kappa\epsilon_0} \left( \frac{1}{a_1} - \frac{1}{a_2} \right) \end{aligned}$$

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

Berdasarkan definisi kapasitansi, maka kapasitansi bola konsentris adalah

$$\begin{aligned} C &= \frac{Q}{V} \\ &= \frac{4\pi\kappa\epsilon_0}{(1/a_1 - 1/a_2)} \end{aligned} \quad (2.26)$$

### 2.17 Kapasitor dua silinder konsentris

Terakhir kita tinjau kapasitor yang berupa dua silinder konsentris yang sangat panjang. Skema kapasitor tampak pada **Gambar 2.25**. Silinder dalam memiliki jari-jari  $a_1$  dan silinder luar memiliki jari-jari  $a_2$ . Antara dua silinder diselipkan material dengan konstanta dielektrik  $\kappa$ . Kuat medan listrik antar dua silinder hanya ditentukan oleh muatan silinder dalam, yaitu

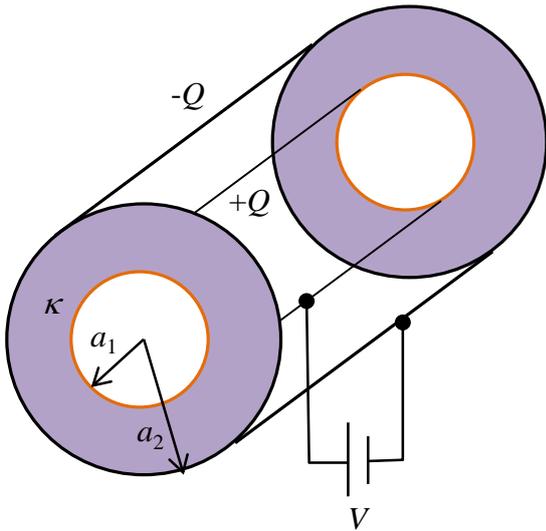
$$E = \frac{1}{2\pi\kappa\epsilon_0} \frac{\lambda}{r}$$

dengan  $\lambda$  adalah rapat muatan per satuan panjang silinder. Beda potensial antara dua silinder adalah

$$\begin{aligned} V &= \int_{a_1}^{a_2} E dr \\ &= \frac{\lambda}{2\pi\kappa\epsilon_0} \int_{a_1}^{a_2} \frac{dr}{r} \\ &= \frac{\lambda}{2\pi\kappa\epsilon_0} \ln\left(\frac{a_2}{a_1}\right) \end{aligned}$$

Rapat muatan silinder memenuhi  $\lambda = Q/L$ , dengan  $Q$  adalah muatan silinder dan  $L$  adalah panjang silinder. Substitusi hubungan ini ke dalam persamaan di atas maka kita dapat menulis

$$V = \frac{Q/L}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{a_2}{a_1}\right)$$



**Gambar 2.25** Dua silinder konsentris dipasang pada suatu beda potensial

Selanjutnya dengan menggunakan definisi kapasitansi diperoleh kapasitansi kapasitor silinder konsentris adalah

$$C = \frac{Q}{V}$$
$$= \frac{2\pi\kappa\epsilon_0 L}{\ln(a_2/a_1)} \quad (2.27)$$

Tampak juga dari persamaan (2.27) bahwa kapasitansi hanya bergantung pada factor geometri silinder.

### 2.18 Kapasitor variabel

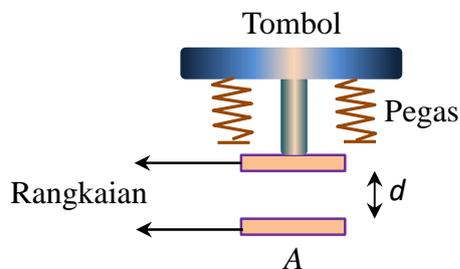
Kapasitor variable adalah kapasitor yang dapat diubah-ubah kapasitansinya. Simbol kapasitor variable tampak pada **Gambar 2.26**.



**Gambar 2.26** Simbol kapasitor variabel

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

Contoh kapasitor variable adalah keyboard komputer. Sebagian keyboard computer masih menggunakan system kapasitor pada tombol-tombolnya, namun sebagian tidak. Skema tombol keyboard komputer yang berbasis pada kapasitor tampak pada **Gambar 2.27**.



**Gambar 2.27** Skema tombol keyboard computer yang berbasis kapasitor. Penekanan tombol bermakna perubahan jarak antar pelat sehingga mengubah nilai kapasitansi. Tiap tombol berfungsi sebagai sebuah kapasitor. Sisten kompoter mendeteksi kapasitor mana yang berubah nilainya sehingga diketahui tombol mana yang dipencet.

Ketika tombol tidak ditekan maka jarak antar dua pelat adalah  $d_0$  sehingga kapasitansi kapasitor adalah

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{d_0}$$

Tetapi, ketika tombol ditekan, jarak antar dua pelat menjadi lebih kecil  $d = d_0 - \Delta d$ , dengan  $\Delta d$  adalah pergeseran pelat. Dengan demikian kapasitansi kapasitor menjadi

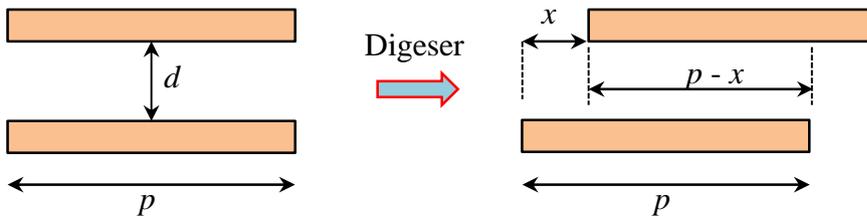
$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d_0 - \Delta d}$$

Maka perubahan nilai kapasitansi akibat pemencetan tombol adalah

$$\begin{aligned} \Delta C &= C - C_0 \\ &= \epsilon_0 \frac{A}{d_0 - \Delta d} - \epsilon_0 \frac{A}{d_0} \end{aligned}$$

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

$$\begin{aligned}
 &= \epsilon_0 \frac{Ad_0 - A(d_0 - \Delta d)}{d_0(d_0 - \Delta d)} \\
 &= \epsilon_0 \frac{A\Delta d}{d_0(d_0 - \Delta d)} \tag{2.28}
 \end{aligned}$$



**Gambar 2.28** Kapasitor variable dengan cara penggeseran dua pelat

Bentuk lain dari kapasitor variable adalah kapasitor geser seperti pada **Gambar 2.28**. Posisi relatif pelat digeser sehingga penampang pelat yang berimpitan berubah. Misalkan panjang pelat adalah  $p$  dan lebarnya  $l$ . Luas pelat adalah  $A_0 = pl$ . Kapasitansi kapasitor sebelum menggeser pelat adalah

$$\begin{aligned}
 C_0 &= \kappa \epsilon_0 \frac{A_0}{d} \\
 &= \kappa \epsilon_0 \frac{pl}{d}
 \end{aligned}$$

dengan  $\kappa$  adalah konstanta dielektrik antar dua pelat. Misalkan satu pelat digeser sejauh  $x$  maka panjang bagian pelat yang berimpitan menjadi  $p-x$  sehingga luas pelat yang berimpitan menjadi

$$A = (p-x)l$$

Kapasitansi kapasitor menjadi

$$C = \kappa \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

---

$$\begin{aligned} &= \kappa \epsilon_0 \frac{(p-x)l}{d} \\ &= \kappa \epsilon_0 \frac{pl}{d} - \kappa \epsilon_0 \frac{lx}{d} \end{aligned}$$

Perubahan kapasitansi akibat penggeseran adalah

$$\begin{aligned} \Delta C &= C - C_0 \\ &= \left( \kappa \epsilon_0 \frac{pl}{d} - \kappa \epsilon_0 \frac{lx}{d} \right) - \kappa \epsilon_0 \frac{pl}{d} \\ &= -\kappa \epsilon_0 \frac{l}{d} x \end{aligned} \tag{2.29}$$

Tampak bahwa perubahan kapasitansi berbanding lurus dengan pergeseran dua pelat.

### 2.19 Rangkaian kapasitor

Kapasitansi kapasitor yang dijual di pasaran tidak selalu sama dengan apa yang kita inginkan. Bagaimana cara mendapatkan kapasitansi yang diinginkan sementara di pasar tidak ada? Caranya adalah dengan merangkai sejumlah kapasitor. Rangkaian sejumlah kapasitor menghasilkan kapasitansi total yang berbeda dengan kapasitansi kapasitor-kapasitor awal.

Secara umum rangkaian kapasitor dapat dikelompokkan atas dua bagian besar, yaitu rangkaian seri dan parallel. Rangkaian-rangkaian kapasitor yang lain dapat dipandang sebagai kombinasi rangkaian seri dan parallel. Kita akan membahas secara khusus rangkaian jkapsitor secara seri dan parallel.

#### Rangkaian Seri

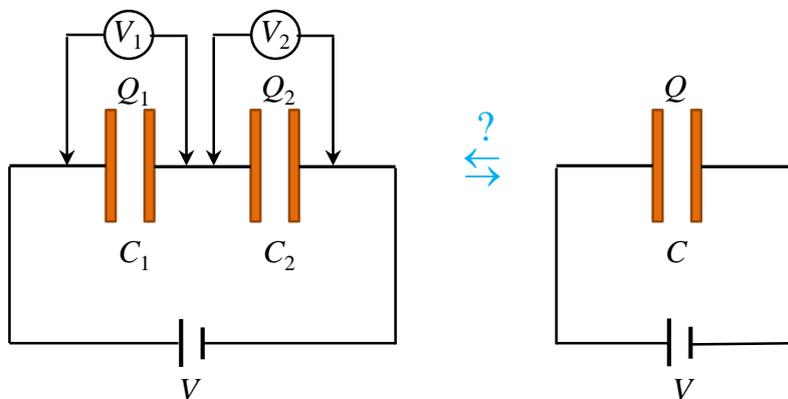
Misalkan dua kapasitor  $C_1$  dan  $C_2$  dirangkaian secara seri seperti pada **Gambar 2.29**. Berapakah kapasitansi pengganti dua kapasitor tersebut?

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor



**Gambar 2.29** (a) Rangkaian seri kapasitor  $C_1$  dan  $C_2$  dan (b) adalah kapasitor pengganti (ekivalen)

Untuk mengetahui besar kapasitansi pengganti, mari kita hubungkan rangkaian kapasitor dengan sumber tegangan  $V$  seperti ditunjukkan pada **Gambar 2.30**.



**Gambar 2.30** (a) Dua kapasitor seri dihubungkan ke sumber tegangan dan (b) kapasitor pengganti dihubungkan ke sumber tegangan yang sama besarnya

Pada rangkaian yang disusun secara seri, muatan yang dikandung masing-masing kapasitor sama besarnya, karena muatan negatif yang berada di pelat kanan kapasitor  $C_1$  berasal dari electron yang ditarik dari pelat kiri kapasitor  $C_2$ . Akibatnya besar muatan positif pada pelat kiri kapasitor  $C_2$  persis sama dengan besar muatan negative pada pelat kanan kapasitor  $C_1$ . Jadi

$$Q_1 = Q_2 = Q$$

Jumlah tegangan pada dua kapasitor sama dengan tegangan total. Jadi

$$V = V_1 + V_2$$

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

Tetapi hubungan antara tegangan, kapasitansi, dan muatan memenuhi

$$V_1 = \frac{Q_1}{C_1} = \frac{Q}{C_1}$$

$$V_2 = \frac{Q_2}{C_2} = \frac{Q}{C_2}$$

Untuk kapasitor pengganti yang ada di sebelah kanan **Gambar 2.30** dipenuhi

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

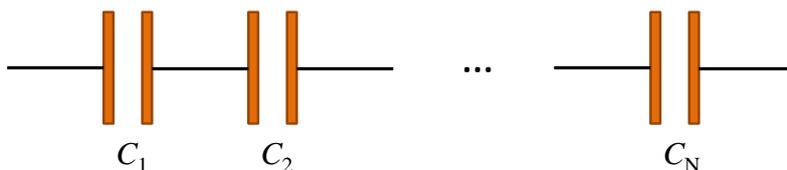
Substitusi ungkapan potensial pada masing-masing kapasitor pada ruas kiri persamaan di atas maka kita peroleh hubungan berikut ini.

$$\frac{Q}{C} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2}$$

Akhirnya, dari hubungan di atas diperoleh persamaan untuk kapasitansi pengganti sebagai berikut

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \tag{2.30}$$

Persamaan (2.30) dapat dibuat lebih umum lagi. Jika terdapat  $N$  kapasitor yang disusun secara seri seri seperti diilustrasikan pada Gambar 2.31 maka kapasitansi total,  $C$ , memenuhi



**Gambar 2.31** Hubungan seri  $N$  buah kapasitor.

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

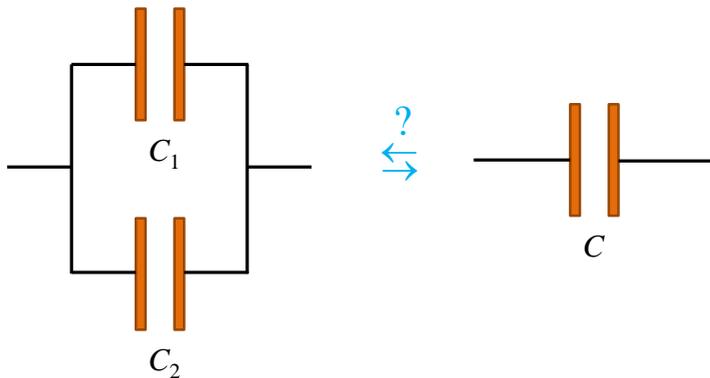
$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_N}$$

Penjumlahan di atas dapat disingkat menjadi

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{C_i} \quad (2.31)$$

### Susunan Paralel

Susunan lain yang dapat diterapkan pada kapasitor adalah susunan paralel. **Gambar 2.32** adalah susunan parallel dua kapasitor  $C_1$  dan  $C_2$ . Kita ingin mencari kapasitor pengganti dua kapasitor parallel di atas. Untuk itu mari kita hubungkan dengan sebuah sumber tegangan seperti pada **Gambar 2.33**.



**Gambar 2.32** Susunan parallel dua kapasitor

Ketika dihubungkan secara parallel maka tegangan antara dua ujung kapasitor  $C_1$  dan  $C_2$  sama besarnya, yaitu  $V$ . Muatan total yang dikandung dua kapasitor sama dengan jumlah muatan masing-masing kapasitor, atau

$$Q = Q_1 + Q_2$$

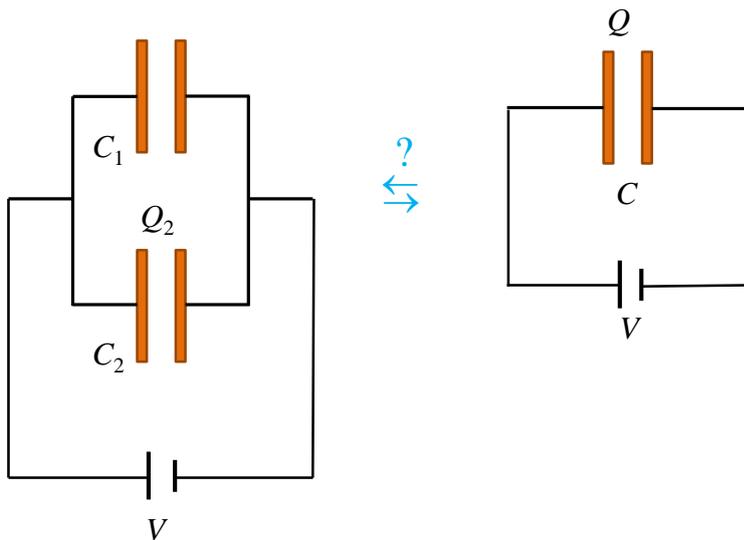
Tetapi  $Q_1 = C_1V$ ,  $Q_2 = C_2V$ , dan  $Q = CV$ . Dengan demikian persamaan (2.61) dapat ditulis menjadi

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

$$CV = C_1V + C_2V$$

yang memberikan ungkapan untuk kapasitansi pengganti susunan paralel

$$C = C_1 + C_2 \quad (2.32)$$



**Gambar 2.33** (a) Dua kapasitor paralel dihubungkan ke sumber tegangan dan (b) kapasitor pengganti dihubungkan ke sumber tegangan yang sama besarnya

Secara umum, jika terdapat  $N$  buah kapasitor yang disusun secara paralel, seperti pada **Gambar 2.34**, maka kapasitansi total memenuhi

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_N$$

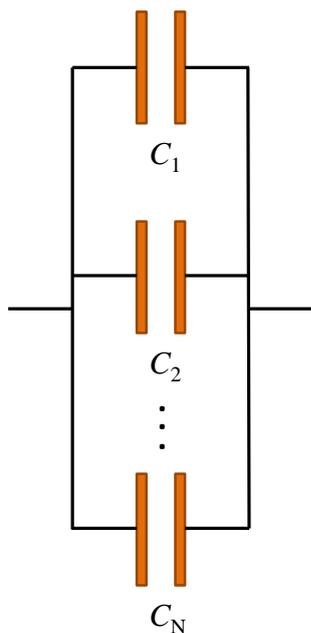
Penjumlahan di atas dapat disingkat menjadi

$$C = \sum_{i=1}^N C_i \quad (2.33)$$

### Contoh 2.7

Tiga buah kapasitor dengan kapasitansi sama, masing-masing 1 mF. Tulislah semua susunan yang mungkin bagi tiga kapasitor tersebut dan hitung kapasitansi pengganti masing-masing susunan tersebut.

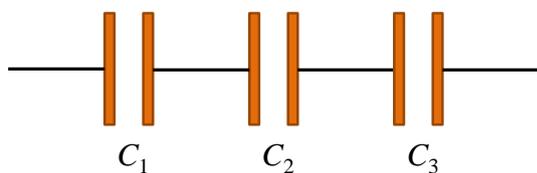
## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor



**Gambar 2.34** Susunan parallel N buah kapasitor

### Jawab

Informasi yang diberikan soal:  $C_1 = C_2 = C_3 = 1 \text{ mF}$ .  
Susunan-susunan yang mungkin ditunjukkan pada **Gambar 2.35 – 2.38**.



**Gambar 2.35** Tiga kapasitor disusun seri

Berdasarkan **Gambar. 2.35**, tiga kapasitor disusun secara seri, sehingga kapasitor pengganti,  $C$ , memenuhi

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} = \frac{1}{1} + \frac{1}{1} + \frac{1}{1} = 3$$

atau

$$C = 1/3 \text{ mF}$$

Berdasarkan **Gambar 2.36**, kapasitor  $C_2$  dan  $C_3$  diparalel kemudian diseri dengan  $C_1$ . Susunan parallel  $C_2$  dan  $C_3$  menghasilkan kapasitansi total

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

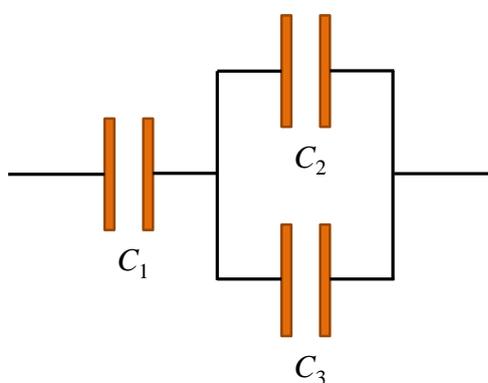
$$C' = C_2 + C_3 = 1 + 1 = 2 \text{ mF}$$

Susunan seri  $C_1$  dan  $C'$  menghasilkan kapasitansi total  $C$  yang memenuhi

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C'} = \frac{1}{1} + \frac{1}{2} = \frac{3}{2}$$

atau

$$C = 2/3 \text{ mF}$$



**Gambar 2.36** Dua kapasitor parallel dan diseri dengan kapasitor lainnya

Berdasarkan **Gambar 2.37** tiga kapasitor disusun secara parallel, sehingga kapasitansi total memenuhi

$$C = C_1 + C_2 + C_3 = 1 + 1 + 1 = 3 \text{ mF}$$

Berdasarkan **Gambar 2.38**, dua kapasitor disusun seri kemudian disusun paralel dengan kapasitor ke tiga. Kapasitansi total  $C_1$  dan  $C_2$  yang disusun seri memenuhi

$$\frac{1}{C'} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{1}{1} + \frac{1}{1} = 2$$

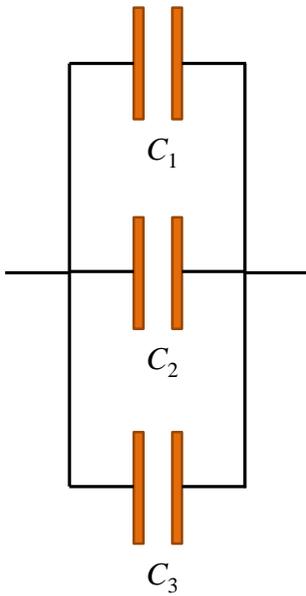
atau

$$C' = 1/2 \text{ mF}$$

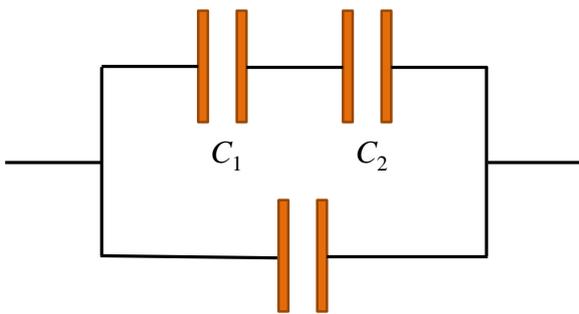
Selanjutnya  $C'$  dan  $C_3$  disusun secara parallel sehingga menghasilkan kapasitansi total

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

$$C = C + C_3 = 1/2 + 1 = 3/2 \text{ mF}$$



Gambar 2.37 Tiga kapasitor disusun paralel



Gambar 2.38 Dua kapasitor seri kemudian diparalel dengan kapasitor ketiga

### 2.20 Energi yang yersimpan dalam kapasitor

Kapasitor yang bermuatan dapat memberikan arus listrik pada komponen-komponen lain dalam rangkaian. Pemberian arus listrik bermakna pemberian energi, serupa dengan baterai dan aki yang dapat memberikan arus listrik dalam rangkaian. Dengan demikian, kapasitor yang bermuatan menyimpan sejumlah energi. Pada bagian berikut ini kita akan menghitung energi yang disimpan sebuah kapasitor. Untuk mudahnya, kita mengambil contoh kapasitor pelat sejajar.

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

---

Misalkan suatu saat kapasitor mengandung muatan  $q$  (belum penuh). Beda potensial antar dua pelat kapasitor adalah  $v$ . Maka terpenuhi hubungan:

$$v = \frac{q}{C} \quad (2.34)$$

Jika muatan listrik sebesar  $dq$  ditambahkan lagi pada kapasitor maka kerja yang diberikan pada kapasitor adalah

$$dW = v dq = \frac{1}{C} q dq$$

Dengan demikian, kerja total yang diberikan pada kapasitor untuk mengisi muatan kapasitor dari keadaan kosong ( $q = 0$ ) sampai bermuatan  $q = Q$  adalah

$$\begin{aligned} W &= \int_0^Q dW \\ &= \int_0^Q \frac{1}{C} q dq \\ &= \frac{1}{C} \int_0^Q q dq \\ &= \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} \end{aligned}$$

Kerja total yang diperlukan untuk mengisi kapasitor dengan muatan  $Q$  sama akan berubah menjadi energi yang tersimpan dalam kapasitor. Jadi, kapasitor yang memiliki muatan  $Q$  menyimpan energi sebesar

$$U = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} \quad (2.35)$$

Karena  $Q = CV$  maka dapat pula ditulis

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

---

$$\begin{aligned}U &= \frac{1}{2} \frac{(CV)^2}{C} \\ &= \frac{1}{2} CV^2\end{aligned}\tag{2.36}$$

Untuk kapasitor pelat sejajar maka berlaku hubungan  $V = Ed$  dan  $C = \kappa\epsilon_0 A/d$ . Dengan demikian energy yang tersimpan dalam kapasitor memenuhi hubungan

$$\begin{aligned}U &= \frac{1}{2} \left( \kappa\epsilon_0 \frac{A}{d} \right) (Ed)^2 \\ &= \frac{1}{2} \kappa\epsilon_0 E^2 (Ad) \\ &= \frac{1}{2} \kappa\epsilon_0 E^2 Vol\end{aligned}$$

dengan *Vol* adalah volum ruang antar dua pelat (volum kapasitor).

Selanjutnya kita definisikan rapat energi yang tersimpan dalam kapasitor (= energi per satuan volum), yaitu

$$\begin{aligned}u &= \frac{U}{Vol} \\ &= \frac{1}{2} \kappa\epsilon_0 E^2\end{aligned}\tag{2.37}$$

Tampak dari persamaan (2.37) bahwa rapat energy yang tersimpan dalam kapasitor semata-mata hanya bergantung pada kuat medan listrik dan constant dielektrik bahan kapasitor. Rapat energy sama sekali tidak bergantung pada factor geometri yang dimiliki kapasitor. Apa pun bentuk kapasitor maka rapat energy yang dikandungnya selalu sama asal constant dielektri maupun kuat medan listrik sama.

### Contoh 2.8

Dua buah kapasitor identik yang mula-mula belum bermuatan akan

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

---

dihubungkan dengan baterai 10 V. Bila hanya salah satu kapasitor yang dihubungkan dengan baterai 10 V, energi yang tersimpan dalam kapasitor adalah  $U$ . Berapa energi yang akan tersimpan jika dua kapasitor tersebut dihubungkan secara seri dengan baterai.

### Jawab

Jika hanya satu kapasitor yang digunakan maka energi yang disimpan dalam kapasitor adalah

$$U = \frac{1}{2} CV^2$$

Jika dua kapasitor disusun secara seri maka kapasitansi total memenuhi

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C} + \frac{1}{C} = \frac{2}{C}$$

atau

$$C_T = \frac{C}{2}$$

Sehingga energi yang tersimpan dalam kapasitor seri menjadi

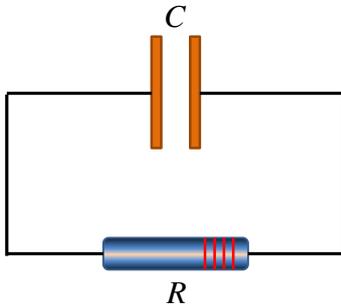
$$\begin{aligned} U' &= \frac{1}{2} C_T V^2 \\ &= \frac{1}{2} \left( \frac{C}{2} \right) V^2 \\ &= \frac{1}{2} \left( \frac{1}{2} CV^2 \right) = \frac{1}{2} U \end{aligned}$$

### 2.21 Pengosongan kapasitor

Misalkan sebuah kapasitor yang berisi muatan dihubungkan secara seri dengan sebuah hambatan  $R$  seperti diilustrasikan pada **Gambar 2.39**. Maka muatan pada kapasitor akan mengalir melalui hambatan  $R$  sehingga lama-kelamaan muatan kapasitor makin kecil dan akhirnya habis. Peristiwa

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

ini disebut pengosongan kapasitor (discharge). Bagaimana kebergantungan muatan kapasitor terhadap waktu selama proses pengosongan? Mari kita bahas di bagian ini



**Gambar 2.39** Sebuah kapasitor dihubungkan seri dengan sebuah tahanan

Kita anggap suatu saat, arus yang mengalir adalah  $I$ . Setelah selang waktu  $\Delta t$  terjadi perubahan muatan kapasitor sebesar

$$\Delta q = -I \Delta t$$

Tanda minus menunjukkan bahwa muatan kapasitor berkurang (akibat pengosongan). Dengan menggunakan hukum Ohm  $I = V/R$  dan hubungan antara muatan dan tegangan kapasitor  $V = q/C$  maka dapat kita tulis

$$\Delta q = -\left(\frac{q}{RC}\right)\Delta t$$

Jika  $\Delta t$  diambil menuju nol ( $\Delta t \rightarrow 0$ ) maka kita dapat mengganti  $\Delta q \rightarrow dq$  dan  $\Delta t \rightarrow dt$ . Dengan demikian, persamaan di atas menjadi

$$dq = -\left(\frac{q}{RC}\right)dt$$

Misalkan pada saat  $t = 0$  muatan kapasitor adalah  $Q_0$  dan saat  $t$  sembarang muatan kapasitor adalah  $Q$ . Kita integralkan waktu dari 0 sampai  $t$  dan integralkan muatan dari  $Q_0$  sampai  $Q$ .

$$\int_{Q_0}^Q \frac{dq}{q} = -\frac{1}{RC} \int_0^t dt$$

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

---

$$\ln q \Big|_{Q_0}^Q = -\frac{1}{RC} t \Big|_0^t$$

$$\ln \frac{Q}{Q_0} = -\frac{1}{RC} t$$

atau

$$\frac{Q}{Q_0} = \exp\left[-\frac{t}{RC}\right]$$

atau

$$Q = Q_0 \exp\left[-\frac{t}{RC}\right] \quad (2.38)$$

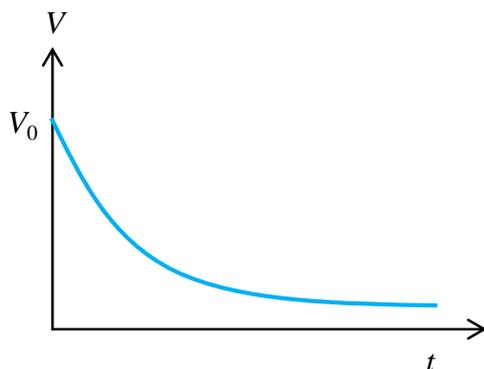
Dengan menggunakan hubungan  $Q = VC$  maka tegangan antara dua ujung kapasitor berubah menurut hubungan

$$VC = V_0 C \exp\left[-\frac{t}{RC}\right]$$

atau

$$V = V_0 \exp\left[-\frac{t}{RC}\right] \quad (2.39)$$

**Gambar 2.40** adalah grafik pengosongan kapasitor, yaitu kebergantungan tegangan kapasitor terhadap waktu.

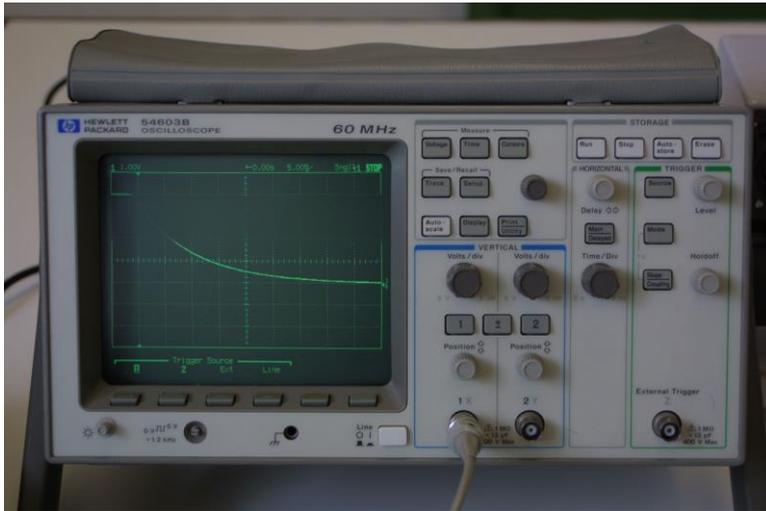


**Gambar 2.40** Grafik pengosongan kapasitor. Sumbu datar adalah waktu dan sumbu tegak adalah potensial antara dua ujung kapasitor.

Kurva pengosongan kapasitor berubag sangat cepat sehingga sulit

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

diamati dengan mata. Jika kita mengukur tegangan antara dua ujung kapasitor saat proses pengukuran menggunakan voltmeter digital maka angka yang ditunjukkan berubah secara cepat dan dengan segera menjadi nol. Jika kita mengukur menggunakan voltmeter jarum (analog) maka jarum bergerak sangat cepat menuju nol. Dengan menggunakan dua alat tersebut maka bentuk kurva pengosongan tidak dapat dilihat secara detail.



**Gambar 2.41** Contoh kurva pengosongan kapasitor yang diamati dengan osiloskop (dict.space.4goo.net)

Untuk mengamati secara detail bentuk kurva pengosongan kapasitor maka kita dapat menampilkan pola pulsa pada layar osiloskop. Perubahan tegangan sebagai fungsi waktu dapat diamati dengan jelas. **Gambar 2.41** adalah contoh kurva pengosongan kapasitor yang diamati dengan osiloskop. Tanpa kurva turun secara transien menuju nol. Sumbu datar adalah sumbu waktu di mana satu skala memiliki periode waktu tertentu yang dapat diseting dengan menggunakan tombol-tombol pada osiloskop tersebut. Sumbu vertikal adalah sumbu tegangan di mana satu skala juga dapat diseting merepresentasikan tegangan berapa.

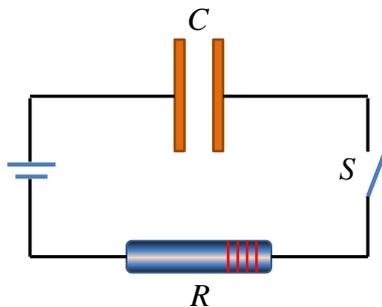
Yang menarik dari persamaan (2.39) adalah jika  $t = RC$ . Pada selang waktu ini maka  $V = V_0 \exp(-1) = 0,368 V_0$ . Perkalian  $RC$  memiliki dimensi waktu dan besaran ini sering disebut waktu karakteristik pengosongan kapasitor. Pada selang waktu ini tegangan yang tersisa di kapasitor adalah  $0,368 V_0$  atau 36,8% dari tegangan mula-mula. Dengan perkataan lain, tegangan kapasitor telah hilang sebanyak  $100\% - 36,8\% = 63,2\%$ . Dengan demikian kita dapat mengatakan bahwa waktu karakteristik pengosongan kapasitor adalah waktu yang diperlukan sehingga tegangan pada kapasitor

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

berkurang sebesar 63,2%.

### 2.22 Pengisian kapasitor

Sebaliknya kita akan mengkaji proses pengisian kapasitor. Kapasitor, tahanan, dan sumber tegangan dirangkakan seperti pada **Gambar 2.42**. Mula-mula kapasitor kosong dan saklar dalam keadaan tegangan. Tegangan antara dua kaki kapasitor nol. Pada saat  $t = 0$  saklar ditutup sehingga arus listrik mengalir dan kapasitor mulai terisi. Dengan demikian tegangan antara dua ujung kapasitor makin meningkat. Bagaimana kebergantungan tegangan tersebut terhadap waktu? Mari kita analisis.



**Gambar 2.42** Skema rangkaian pengisian kapasitor

Misalkan tegangan baterai yang dipasang adalah  $V_o$ . Ketika saklar ditutup maka rangkaian pada **Gambar 2.42** menjadi rangkaian tertutup sehingga hubungan antara tegangan baterai, tegangan kapasitor dan tegangan pada hambatan adalah

$$V_o = V_{res} + V_{kap} \quad (2.40)$$

Tetapi  $V_{res} = IR$  dan  $V_{kap} = q/C$  sehingga

$$V_o = IR + \frac{q}{C}$$

Lakukan diferensial terhadap waktu ruas kiri dan ruas kanan persamaan (2.40)

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

$$\frac{dV_o}{dt} = \frac{dI}{dt}R + \frac{1}{C} \frac{dq}{dt}$$

Mengingat  $V_o$  konstan maka  $\frac{dV_o}{dt} = 0$  dan berdasarkan definisi,  $\frac{dq}{dt} = I$ .

Dengan demikian, persamaan di atas dapat ditulis

$$0 = \frac{dI}{dt}R + \frac{1}{C}I$$

atau

$$\frac{dI}{I} = -\frac{1}{RC}dt$$

Pada saat  $t = 0$  arus yang mengalir memiliki nilai maksimum,  $I_0$ . Kita lakukan integral di ruas kanan dari  $t = 0$  sampai  $t$  sembarang dan di ruas kiri dari  $I_0$  sampai  $I$  sembarang. Maka

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = -\frac{1}{RC} \int_0^t dt$$

$$\ln I \Big|_{I_0}^I = -\frac{1}{RC}t$$

$$\ln \left( \frac{I}{I_0} \right) = -\frac{1}{RC}t$$

atau

$$I = I_0 e^{-t/RC} \tag{2.41}$$

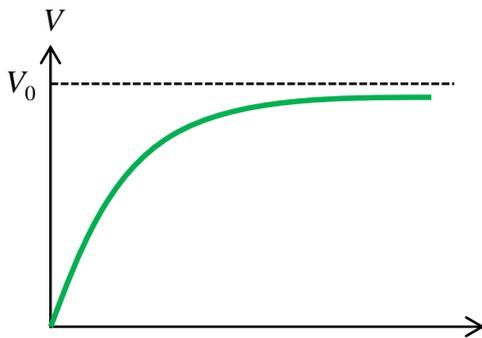
Berdasarkan persamaan (2.73), tegangan antara dua ujung kapasitor memenuhi

$$\begin{aligned} V_{kap} &= V_o - V_{res} \\ &= V_o - IR \\ &= V_o - (I_0 e^{-t/RC})R = V_o - (I_0 R) e^{-t/RC} = V_o - V_o e^{-t/RC} \end{aligned}$$

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

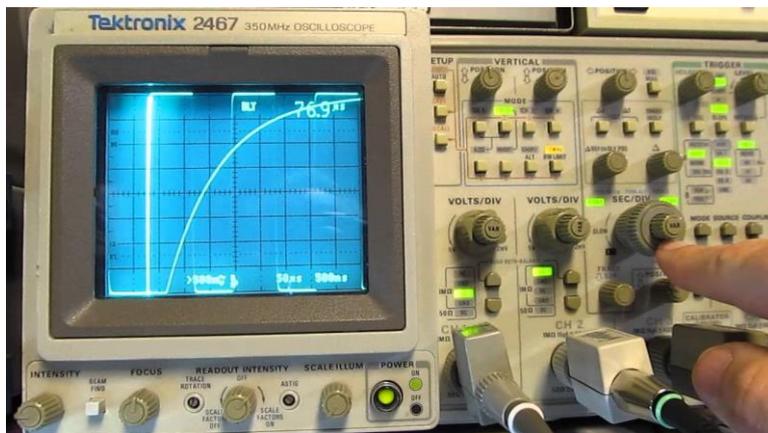
$$= V_0(1 - e^{-t/RC}) \quad (2.42)$$

**Gambar 2.43** adalah grafik pengisian kapasitor, yaitu kebergantungan tegangan kapasitor terhadap waktu.



**Gambar 2.43** Grafik pengisian kapasitor. Sumbu datar adalah waktu dan sumbu tegak adalah tegangan antara dua ujung kapasitor. Tegangan  $V_0$  merupakan batas tertinggi tegangan yang terukur antara dua ujung kapasitor dan itu dicapai setelah selang waktu cukup lama (secara teori ketika waktu menuju tak berhingga).

**Gambar 2.44** adalah contoh kurva pengisian kapasitor yang diamati dengan osiloskop. Tampak kurva naik secara transien menuju nilai saturasi. Juga tampak bahwa kurva yang ditunjukkan oleh osiloskop persis sama dengan kurva yang diperoleh dari hasil perhitungan.



**Gambar 2.44** Contoh kurva pengisian kapasitor yang diamati dengan osiloskop (YouTube)

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

---

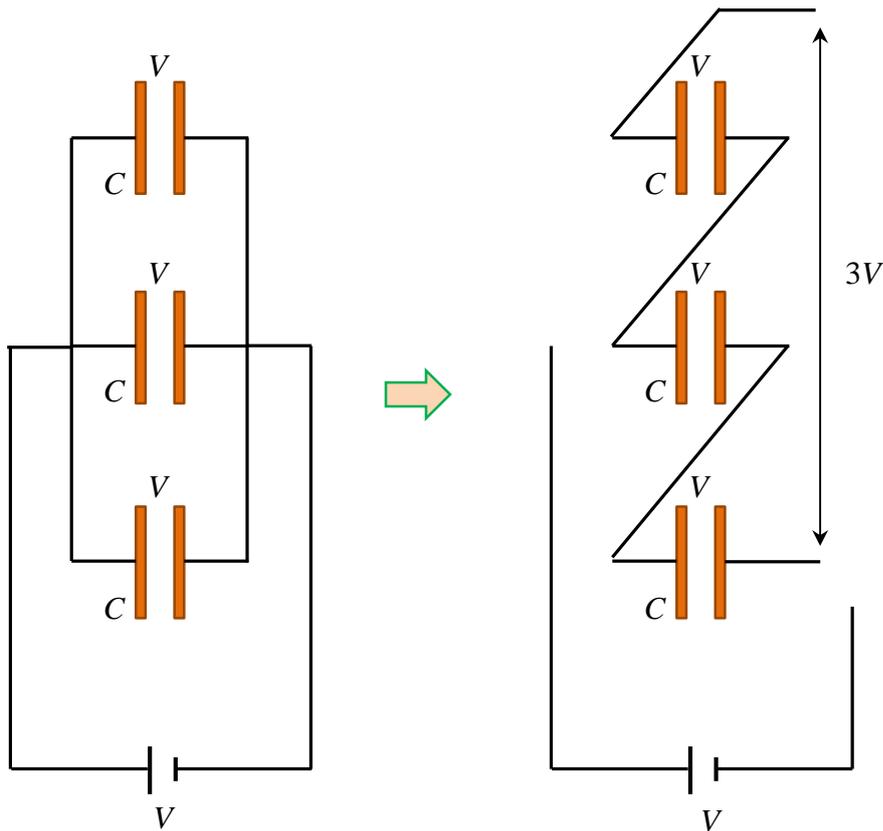
Juga menarik untuk melihat tegangan ketika  $t = RC$ , yaitu  $V = V_0(1 - e^{-1}) = V_0(1 - 0,368) = 0,632V_0$ . Perkalian  $RC$  juga merupakan waktu karakteristik pengisian kapasitor. Waktu karakteristik tersebut adalah waktu untuk mengisi kapasitor sehingga tegangannya sama dengan 63,2% dari tegangan maksimum yang akan dicapai. Untuk rangkaian yang sama maka waktu karakteristik pengisian dan pengosongan kapasitor sama besarnya.

Tampak bahwa waktu karakteristik makin besar jika hambatan yang dipasang makin besar. Mengapa demikian? Karena makin besar hambatan yang dipasang maka makin kecil arus yang mengalir. Dengan demikian jumlah muatan yang diisikan ke dalam kapasitor atau yang ditarik keluar dari kapasitor per satuan waktu makin kecil. Akibatnya diperlukan waktu lebih lama untuk mengisi atau mengosongkan kapasitor yang berimplikasi pada makin panjangnya waktu karakteristik pengisian dan pengosongan kapasitor.

### 2.23 Topik Khusus I: Pembangkit Marx

Perhatikan rangkaian parallel tiga kapasitor sejenis seperti pada Gambar 2.45. Rangkaian tiga kapasitor tersebut dihubungkan dengan sumber tegangan  $V$ . Akibatnya tiap kapasitor menyimpan muatan  $Q = CV$ . Kemudian hubungan masing-masing kapasitor dengan sumber tegangan diputus. Tiap kapasitor tidak dihubungkan dengan rangkaian lainnya sehingga muatan tetap bertahan dalam kapasitor. Akibatnya tegangan kapasitor tetap  $V$  (asumsi tidak ada muatan yang bocor). Pada kondisi ini, tiap kapasitor dapat dipandang sebagai sebuah sumber tegangan dengan tegangan  $V$ . Jika kemudian tiga kapasitor dihubungkan secara seri maka seolah-olah kita menghubungkan secara seri tiga buah baterai di mana satu baterai memiliki potensial  $V$ . Akibatnya potensial total yang dihasilkan menjadi  $3V$ . Jadi, tiga kapasitor yang semua dirangkaian secara parallel dan dihubungkan dengan sumber tegangan yang sama, lalu secara tiba-tiba hubungan dengan sumber tegangan diputus dan kapasitor dihubungkan secara seri maka kita akan dapatkan potensial baru yang nilainya beberapa kali potensial yang dihasilkan sumber semula. Inilah prinsip kerja Pembangkit Marx (*Marx generator*).

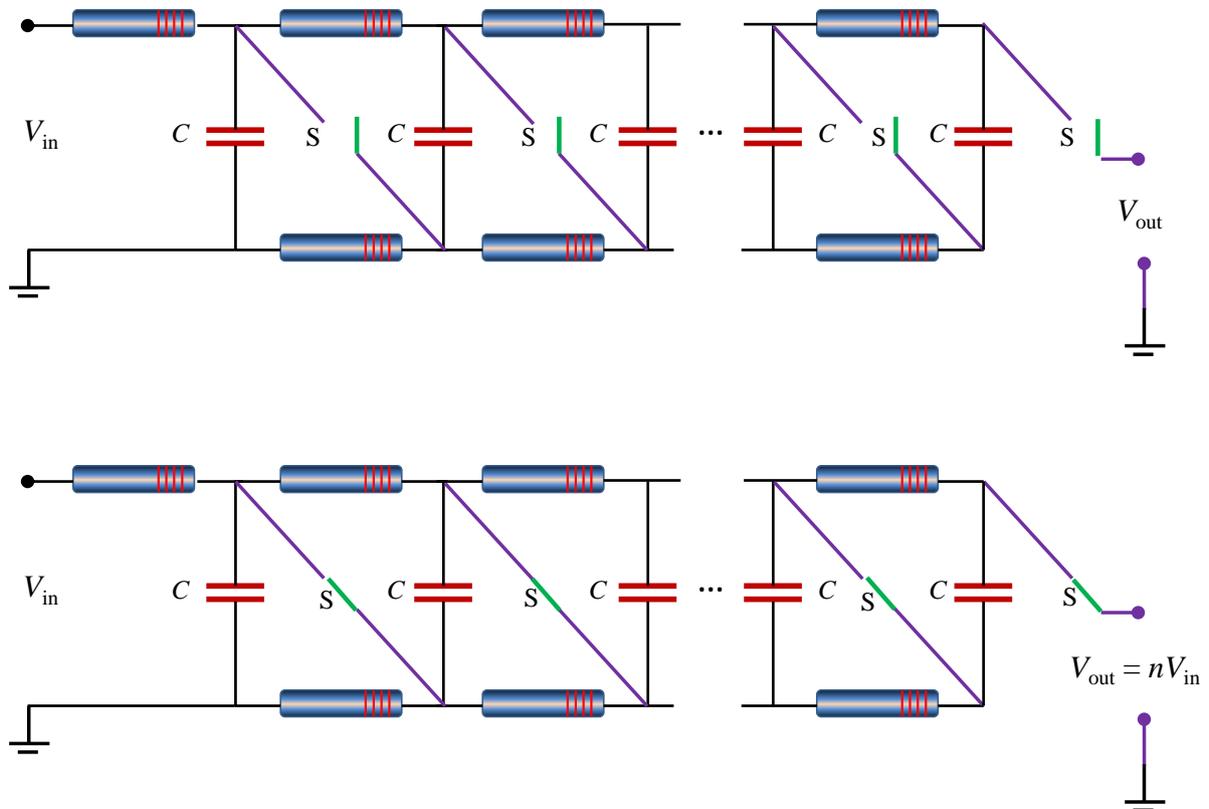
## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor



**Gambar 2.45** (kiri) Kapasitor dihubungkan secara paralel pada sebuah sumber tegangan. (b) Hubungan paralel kapasitor diputus secara bersamaan dan secara bersamaan pula dihubungkan secara seri. Akibatnya dihasilkan tegangan yang sangat tinggi yang nilainya sama dengan jumlah tegangan semua kapasitor saat dihubungkan secara paralel.

Pembangkit Marx adalah rangkaian yang menghasilkan pulsa potensial listrik sangat besar dari sumber potensial listrik yang kecil. Prinsipnya adalah memberi muatan kepada banyak kapasitor yang disusun secara paralel. Pemberian muatan tersebut dilakukan dengan menggunakan sumber tegangan yang kecil hingga kapasitor terisi penuh muatan sebesar  $Q = CV$ . Jika hubungan antara semua kapasitor dengan sumber tegangan tiba-tiba diputus maka tiap kapasitor mempertahankan muatannya sehingga satu kapasitor berperilaku sebagai sebuah sumber tegangan dengan tegangan  $V = Q/C$ . Kemudian semua kapasitor secara seri dihubungkan secara serentak. Akibatnya kita mendapatkan sumber tegangan secara seri di mana tiap sumber memiliki tegangan  $V$ . Jika terdapat  $n$  kapasitor maka tegangan yang kita dapatkan menjadi  $nV$ . Jadi, kita dapat memperbesar tegangan dengan menggunakan kapasitor sebanyak mungkin. **Gambar 2.46** adalah ilustrasi pembangkit Marx

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor



**Gambar 2.46** Rangkaian pembangkit Marx. (atas) switch diatur sehingga semua kapasitor berada dalam hubungan seri. (bawah) switch dipindahkan secara bersamaan sehingga semua kapasitor tersusun secara parallel.

Perhatikan **Gambar 2.46**. Gambar atas proses pengisian kapasitor. Semua saklar dibuka sehingga semua kapasitor terhubung secara parallel. Gambar bawah adalah ketika semua saklar tiba-tiba ditutup. Akibatnya semua resistor menjadi tidak berfungsi dan semua kapasitor tersusun secara seri. Pada output diperoleh tegangan yang sangat besar. Secara teori tegangan yang diperoleh di output adalah  $nV_{in}$ . Namun ini adalah kondisi ideal. Tegangan yang diperoleh lebih kecil dari itu, tetapi tetap jauh lebih besar daripada  $V_{in}$  jika  $n$  sangat besar.



**Gambar 2.47** Pembangkit Marx yang digunakan untuk mengetes komponen transmisi tegangan tinggi yang berada di TU Dresden, Jerman (en.wikipedia.org)

**Gambar 2.47** adalah contoh pembangkit Marx yang ada di TU Dresden, Jerman. Alat ini digunakan untuk mengetes peralatan yang akan dipasang pada saluran tegangan tinggi. Sebelum dipasang ke saluran tegangan tinggi maka kemampuan alat tersebut ditest dulu di laboratorium menggunakan sumber tegangan tinggi. Dan salah satu sumber tegangan tinggi yang digunakan untuk mengetes adalah pembangkit Marx.

### 2.24 Topik Khusus II: Nanokapasitor dan blokade Coulomb

Sekarang para peneliti sedang giat mengembangkan riset bidang nanoteknologi. Nanoteknologi merupakan teknologi masa depan yang diyakini akan membawa kesejahteraan lebih besar bagi umat manusia. Nanoteknologi akan menghasilkan kemajuan pesat di berbagai bidang: ICT, pengobatan, kedokteran, pertanian, lingkungan, material, transportasi, dan sebagainya. Nanoteknologi adalah teknologi yang memanfaatkan sifat-sifat material yang berukuran beberapa nanometer. Satu nanometer sama dengan seper satu miliar meter ( $1/1.000.000.000$  meter). Nanoteknologi adalah teknologi yang memanfaatkan sifat material dalam rentang 1 nanometer hingga 100 nanometer. Satu nanometer setara dengan jejeran 10 atom dan 100 nanometer setara dengan jejeran 1000 atom. Karena jumlah atom yang menyusun materi tersebut sangat sedikit maka material memperlihatkan sifat-sifat yang berbeda dengan material ukuran besar.

Contoh divais yang sedang dikaji adalah kapasitor ukuran nanometer. Bagaimana bentuk kapasitor tersebut? Kapasitor tersebut adalah sebuah bola logam dengan jari-jari dalam orde nanometer. Kita sudah turunkan persamaan kapasitansi sebuah bola konduktor. Berapa nilai kapasitansi jika jari-jari bola tersebut 1 nanometer? Nilainya adalah

$$\begin{aligned} C &= 4\pi \times (8,85 \times 10^{-12}) \times (10^{-9}) \\ &= 1,11 \times 10^{-19} \text{ F} \end{aligned}$$

Ini adalah nilai yang sangat kecil. Tetapi apa manfaatnya? Mari kita selidiki.

Misalkan mula-mula kapasitor tersebut netral. Jika satu elektron dikirim ke kapasitor tersebut maka elektron dengan mudah mengalir ke kapasitor. Muatan sebuah elektron adalah  $e = 1,602 \times 10^{-19}$  C. Dengan bertenggerinya satu elektron pada kapasitor tersebut maka potensial yang dimiliki kapasitor menjadi

$$V_1 = \frac{-1,6 \times 10^{-19}}{1,11 \times 10^{-19}} = -1,44 \text{ V}$$

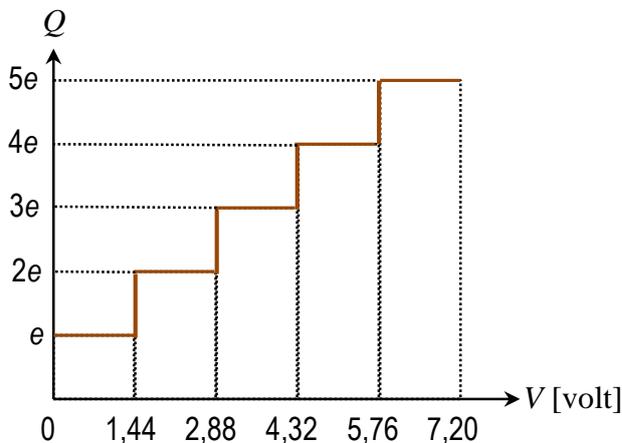
Jika elektron kedua akan ditempatkan di kapasitor tersebut maka elektron yang sudah ada di kapasitor akan menolaknya. Elektron kedua baru akan sanggup menempati kapasitor jika didorong dengan potensial

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

paling sedikit 1,44 V, yang digunakan untuk melawan potensial tolakan akibat kehadiran electron pertama. Jika potensial yang digunakan untuk mendorong electron kurang dari 1,44 V maka electron tidak sanggup menempati kapasitor. Setelah electron kedua berada pada kapasitor maka potensial kapasitor menjadi

$$V_2 = \frac{2 \times (-1,6 \times 10^{-19})}{1,11 \times 10^{-19}} = -2,88 \text{ V}$$

Kemudian untuk membawa electron ketiga maka diperlukan paling sedikit 2,88 V tegangan pendorong untuk mengatasi tolakan dua electron yang sudah ada pada kapasitor. Begitu seterusnya. Akhirnya kalau kita gambarkan kurva muatan kapasitor terhadap potensial maka diperoleh **Gambar 2.48**. Bentuk kurva seperti ini disebut *tangga Coulumb*. Sifat tolakan oleh elektron yang sudah ada pada kapasitor terhadap electron baru yang akan ditambahkan dinamakan *blockade Coulumb*.



**Gambar 2.48** Muatan kapasitor sebagai fungsi tegangan pendorong. Tampak bahwa hubungan antara muatan dan tegangan tidak lagi linier seperti pada kapasitor ukuran besar, tetapi berbentuk tangga yang dikenal dengan tangga coulumb.

Apa yang menarik dari sifat ini? Yang menarik adalah, perbedaan muatan kapasitor satu elektron saja sudah menghasilkan perubahan potensial 1,44 Volt. Sungguh luar biasa. Kapasitor ini bisa membedakan aliran masuk satu atau dua electron. Kapasitor semacam ini sering juga disebut kapasitor electron tunggal. Keberadaan satu electron pada kapasitor dapat dideteksi dengan baik karena menghasilkan perubahan potensial 1,44

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

---

V. Kapasitor semacam ini dapat digunakan sebagai memori electron tunggal. Tidak perlu menyimpan banyak muatan sebagai representasi data. Cukup satu elektron. Jika tidak ada electron pada kapitor maka potensial kapasitor nol dan identic dengan bit 0. Jika ada satu electron yang tersimpan di kapasitor maka potensial kapasitor 1,44 V dan identic dengan bit 1.

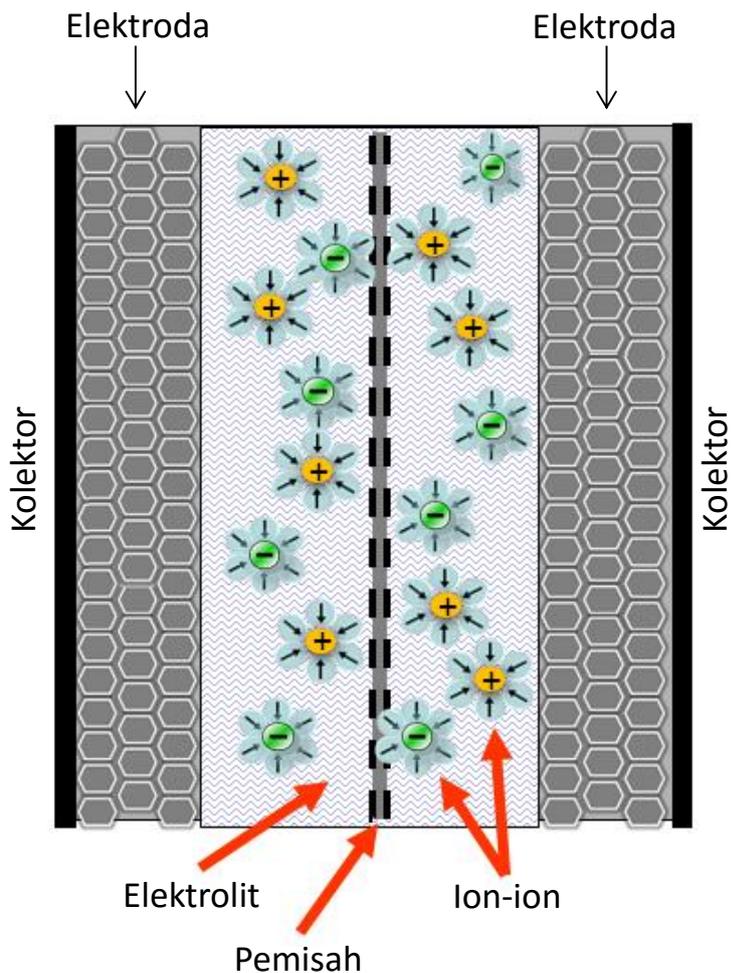
### 2.25 Topik Khusus III: Suparkapasitor

Superkapasitor adalah kapasitor dengan arsitektur yang berbeda dengan kapasitor konvensional. Pada kapasitor konvensional, muatan listrik disimpan dalam pelat konduktor yang telah ada dan tertentu. Kapasitansi yang diperoleh semata-mata ditentukan oleh geometri kapasitor, yaitu luas pelat dan jarak antar pelat. Secara teori, kapasitansi dapat diperbesar dengan memperbesar ukuran pelat atau mereduksi jarak antar pelat. Namun pembesaran ukuran pelat terlampaui jauh menyebabkan ukuran kapasitor sangat besar. Sebaliknya, reduksi jarak antara pelat yang terlalu tipis dapat menyebabkan perubahan sifat material dielektrin menjadi konduktif sehingga kapasitor menjadi bocor. Adakah pendekatan lain untuk menghasilkan kapasitor yang besar. Jawabnya ada, yaitu superkapasitor. Superkapasitor dapat menghasilkan kapasitansi ratusan kali kapasitor konvensional untuk ukuran yang sama. Luar biasa bukan?

Kalau pada kapasitor konvensional, material antara dua elektroda adalah isolator (dielektrin) yang berfungsi menghidanri pertemuan muatan pada elektroda positif dan negative. Namun, pada superkapasitor, material pemisah dua elektroda adalah elektrolit. Kok bisa, padahal elektrolit adalah konduktor dalam wujud cair. Sehingga dapat dialiri arus listrik. Apakah tidak menyebabkan muatan di elektroda positif dan negative bergabung? Mari kita coba analisis.

**Gambar 2.49** adalah skema superkapasitor ketika belum dihubungkan dengan tegangan luar. Komponen utama adalah dua elektroda, elektrolit, dan pemisah di tengah-tengah. Masing-masing elektroda dihubungkan dengan rangkaian luar melalui kolektor yang berupa pelat konduktor. Elektroda dibentuk dari material tertentu. Dalam keadaan tanpa tegangan listrik luar maka ion terdistribusi secara random dalam elektrolit dan di elektroda tidak terkumpul muatan. Dengan kata lain, kapasitor tidak menyimpan muatan.

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

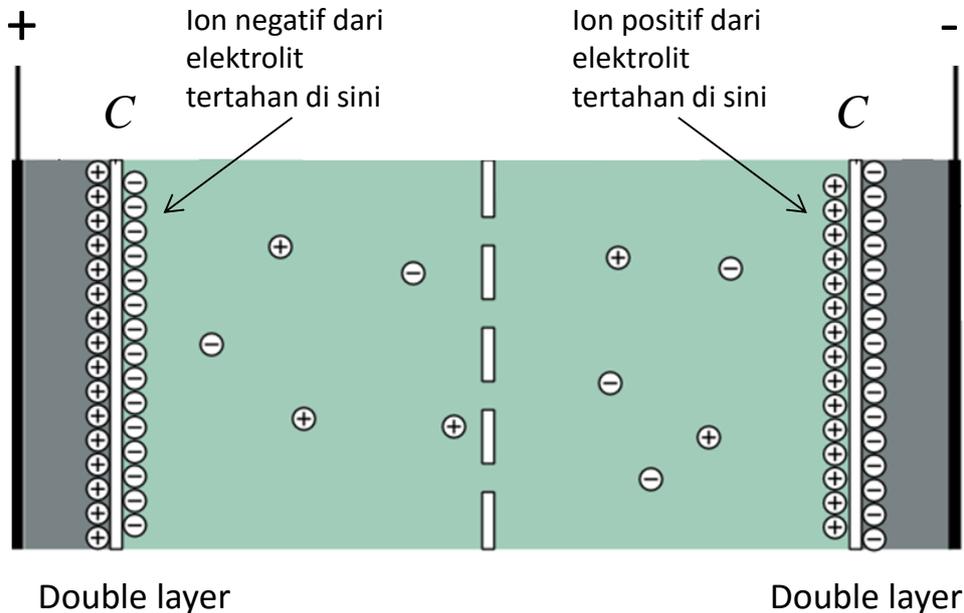


**Gambar 2.49** Arsitektur super kapasitor. Bagian utama adalah kolektor dan elektroda di dua sisi, elektrolit dan pemisah (separator di tengah)

Apa yang terjadi ketika superkapasitor dihubungkan dengan tegangan luar? Fenomena yang terjadi tampak seperti pada **Gambar 2.50**. Misalkan kolektor kiri diberi tegangan positif dan kolektor kanan diberi tegangan negative. Ion positif pada elektrolit akan berkerak ke elektroda negative (kiri) dan ion negative akan bergerak ke elektroda positif (kanan). Ion tidak dapat mengalir dalam elektroda atau konduktor. Yang dapat mengalir dalam konduktor hanya electron. Jadi, ion positif maupun negative dari elektrolit akan berhenti di permukaan elektroda (hanya menyentuh permukaan elektroda). Ion pada permukaan elektroda tersebut akan menarik muatan berlawanan dari elektroda sehingga bergerak mendekat ke elektroda. Material elektroda untuk superkapasitor adalah material yang tidak memungkinkan kedua ion pada dua sisi elektroda bercampur. Yang terjadi hanya penumpukan muatan pada dua sisi permukaan elektroda.

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

Jarak kedua muatan tersebut sangat berdekatan. Muatan berbeda jenis yang terkumpul sangat berdekatan dinamakan double layer (lapisan ganda).



**Gambar 2.50** Supercapasitor ketika dihubungkan dengan tegangan luar.

Kedua lapisan muatan yang berbeda tanda tersebut seolah-olah dipisahkan oleh isolator yang sangat tipis. Jadi tiap double layer berperan sebagai sebuah kapasitor. Karena jarak antara lapisan muatan sangat dekat (umumnya antara 3 - 8 angstrom) maka nilai kapasitansi yang dihasilkan sangat besar. Akhirnya, system yang ada berfungsi sebagai dua buah kapasitor yang disusun secara seri di mana kapasitansi masing-masing kapasitor sangat besar. Misalkan kapasitansi masing-masing double layer adalah  $C$  maka kapasitansi ekuivalen sebuah kapasitor (karena tersusun secara seri) adalah  $C/2$ . Karena  $C$  sangat besar (akibat jaran antara lapisan muatan sangat besar) maka kapasitansi ekuivalen superkapasitor juga sangat besar.

Karena kapasitansi yang sangat besar maka superkapasitor dapat menyimpan muatan yang sangat besar. Dengan demikian, superkapasitor dapat menggantikan fungsi baterai. Kelebihan superkapasitor dibandingkan dengan baterai adalah dapat diisi dan dikosongkan dalam waktu yang sangat cepat. Gambar 2.51 adalah contoh superkasitor. Nilai kapasitansinya adalah 3.000 farad!



**Gambar 2.51** Contoh superkapasitor yang memiliki kapasitansi 3.000 farad (Discover Circuits)

### Soal-soal

Jika dua titik berada pada potensial yang sama apakah ini berarti bahwa

- tidak ada kerja yang diperlukan untuk membawa muatan dari satu titik ke titik yang lain.
- Tidak ada gaya yang dikerjakan pada muatan saat dipindahkan?

Apakah ada titik antara dua muatan sejenis sehingga kuat medan listrik pada titik tersebut nol? Misalkan muatan tersebut adalah  $q_1$  dan  $q_2$ , di manakah letak titik tersebut?

Misalkan sebuah elektron dipercepat dalam beda potensial  $V_0$ . Akan menjadi berapa kalikan laju akhir elektron jika potensial pemercepat dijadikan  $n$  kali?

Jika potensial di suatu titik nol, apakah medan listrik juga nol?

Berapa energi yang diperlukan untuk memindahkan proton dari titik dengan potensial  $+100$  V ke titik dengan potensial  $-50$  V. Nyatakan jawabanmu

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

dalam joule dan elektronvolt

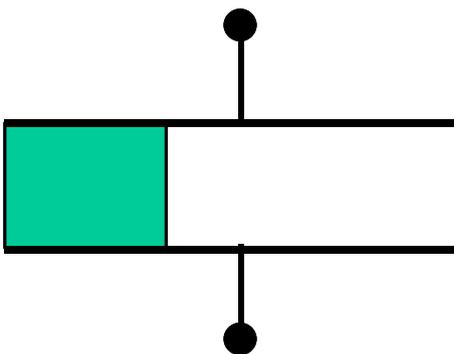
Berapa peningkatan energi kinetik yang akan dialami elektron ketika elektron melewati beda potensial 21.000 V pada tabung TV (nyatakan dalam joule dan elektronvolt)

Sebuah bola dibuat dari logam penghantar, di dalamnya berongga. Jari-jari dalam dan jari-jari luar bola tersebut masing-masing 9,8 dan 10 cm. Bola tersebut diberi potensial sebesar 1200 Volt. Hitunglah potensial di titik-titik:

- yang berjarak  $r = 12$  cm dari pusat bola
- yang berjarak  $r = 3$  cm dari pusat bola

Bahan dengan konstanta dielektrik  $\kappa = 50$  ditempatkan di antara dua pelat logam sejajar yang terpisah sejauh 0,1 mm. Luas masing-masing pelat adalah 5 cm<sup>2</sup>. Tentukan kapasitansi kapasitor yang dihasilkan. Dan berapa kapasitansi jika bahan dielektrik dikeluarkan dari posisi antara dua pelat?

Hitunglah kapasitansi kapasitor dengan susunan seperti pada **Gambar 2.52**. Diketahui lebar pelat adalah 3 cm dan panjangnya 20 cm. Jarak antar pelat adalah 0,01 mm. Sepertiga bagian lebar pelat diisi dengan bahan dielektrik dengan konstanta dielektrik  $\kappa = 200$  dan sisanya berisi udara. Berapa konstanta dielektrik kapasitor?



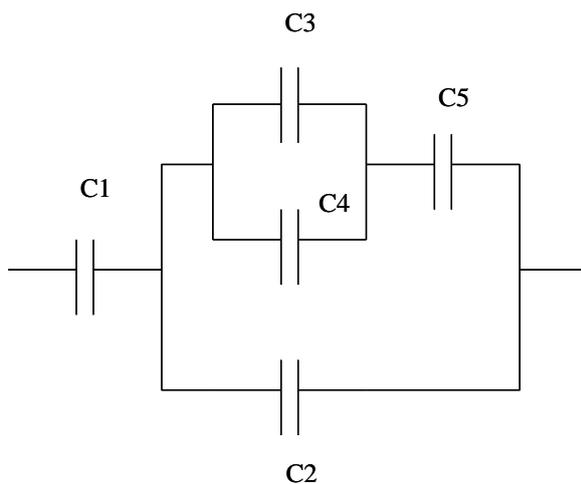
**Gambar 2.52** Gambar untuk Soal \*\*\*

Dua pelat sejajar dengan luas penampang masing-masing 0,05 m<sup>2</sup> dipisahkan sejauh 0,1 mm. Di antara dua pelat diselipkan dua bahan dielektrik dengan ketebalan sama masing-masing dengan konstanta dielektrik  $\kappa_1 = 100$  dan  $\kappa_2 = 150$ . Tentukan kapasitansi yang dihasilkan.

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

Sebanyak  $n$  buah kapasitor disusun secara parallel. Kapasitor pertama memiliki kapasitansi  $C_0$ , kapasitor kedua memiliki kapasitansi  $C_0/2$ , kapasitor ketiga memiliki kapasitansi  $C_0/4$ , kapasitor keempat memiliki kapasitansi  $C_0/8$ , dan seterusnya. Berapa kapasitansi total? Berapa kapasitansi total jika  $n \rightarrow \infty$  ?

Tentukan kapasitansi total dari rangkaian kapasitor pada **Gambar 2.53**



**Gambar 2.53** Gambar untuk soal \*\*

Nilai kapasitansi masing-masing kapasitor adalah  $C_1 = 1 \text{ nF}$ ,  $C_2 = 2 \text{ nF}$ ,  $C_3 = 4 \text{ nF}$ ,  $C_4 = 4 \text{ nF}$ , dan  $C_5 = 8 \text{ nF}$ .

Jika dimensi plat kapasitor dijadikan setengah dan jarak antar pelat juga dijadikan setengah juga, berapa nilai kapasitansi baru dibandingkan dengan kapasitansi lama?

Sebuah kapasitor diisi dengan baterai 6 V melalui sebuah hambatan  $100 \text{ k}\Omega$ . (a) Berapa arus mula-mula? (b) Setelah berlangsung beberapa lama, arus yang mengalir adalah  $30 \text{ }\mu\text{A}$ , berapa beda potensial antara dua ujung hambatan dan antara dua ujung kapasitor?

Medan listrik sebesar  $640 \text{ V/m}$  ingin dibangkitkan antara dua pelat sejajar yang terpisah sejauh  $11,0 \text{ mm}$ . Berapa besar beda potensial yang harus diterapkan antara dua pelat?

Dua pelat sejajar dihubungkan dengan sumber tegangan  $100 \text{ V}$  dan

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

---

dipisahkan oleh udara. Berapa jarak terkecil dua pelat agar udara tidak melampaui medan brekdown sebesar  $3 \times 10^6 \text{ V/m}$ ?

Berapa laju elektron yang memiliki energi a) 750 eV dan b) 4,5 keV?

Sebuah partikel alfa (yaitu inti atom helium dengan  $Q = 2e$  dan  $m = 6,64 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ) dipancarkan pada proses peluruhan radioaktif dengan energi kinetik 5,53 MeV. Berapa laju partikel tersebut?

Kerja yang dilakukan gaya luar untuk memindahkan partikel bermuatan  $-7,50 \mu\text{C}$  dari titik A ke titik B adalah  $2,5 \times 10^{-3} \text{ J}$ . Jika mula-mula muatan tersebut dalam keadaan diam dan akhirnya memiliki energi kinetik  $4,82 \times 10^{-4} \text{ J}$  ketika mencapai B, berapa beda potensial antara A dan B?

Berapa potensial listrik pada tempat yang berjarak 25,0 cm dari muatan titik  $6,00 \mu\text{C}$ ?

Gambarkan garis ekipotensial di sekitar dua titik muatan berlawanan tanda yang didekatkan. Besar muatan positif dua kali muatan negatif.

Tiga muatan positif ditempatkan pada titik-titik sudut segi tiga sama sisi. Besar muatan tersebut semuanya sama yaitu  $10 \mu\text{C}$ . Panjang sisi segitiga adalah 10 cm. (a) Tentukan kuat medan listrik dan potensial listrik di pusat segitiga. (b) Tentukan juga usaha yang diperlukan untuk membawa muatan  $-2\mu$  dari posisi tak berhingga ke titik di tengah-tengah segitiga.

Muatan titik masing-masing  $q$  disebar secara merata sepanjang lengkungan yang berupa keliling lingkaran dengan jari-jari  $a$  cm. Jumlah muatan yang disebar adalah  $N$ . (a) Berapakah potensial listrik pada titik di sumbu lingkaran yang lokasinya berjarak  $b$  dari pusat lingkaran? (b) Berapa potensial tersebut jika  $N$  menuju tak berhingga.

Sebuah elektron yang mula-mula diam dipercepat antara dua elektroda yang dipasang pada beda potensial  $V$ . Jika jarak antara dua elektroda diubah tetapi tetap mempertahankan beda potensialnya, apakah laju elektron ketika sampai anoda berubah? Jelaskan.

Sebuah elektron yang mula-mula diam dipercepat antara dua elektroda

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

---

yang dipasang pada beda potensial  $V$ . (a) Tentukan laju elektron sebagai fungsi jarak dari katoda (elektroda tempat elektron mulai bergerak). (b) berapa panjang minimum gelombang sinar-X yang dihasilkan elektron ketika menumbuk anoda?

Hitunglah kapasitansi pasangan pelat yang ukurannya  $0,1\text{ m}$  kali  $0,1\text{ m}$  dan dipisahkan sejauh  $5\text{ mm}$  oleh lapisan udara.

Dua pelat masing-masing menyimpan muatan  $+2500\text{ }\mu\text{C}$  dan  $-2500\text{ }\mu\text{C}$  jika diberi beda potensial  $900\text{ V}$ . Berapakah kapasitansi dua pelat tersebut?

Beda potensial antara dua kawat sejajar di udara adalah  $120\text{ V}$ . Kedua kawat menyimpan muatan yang sama besar tetapi berlawanan tanda sebesar  $96\text{ pC}$ . Berapakah kapasitansi dua kawat tersebut?

Kapasitor dengan kapasitansi  $7500\text{ pF}$  mengandung muatan  $16,5 \times 10^{-8}\text{ C}$ . Berapa beda tegangan antara dua ujung kapasitor?

Berapa jumlah muatan yang mengalir dari baterai  $12\text{ V}$  jika dihubungkan dengan kapasitor dengan kapasitansi  $9,0\text{ }\mu\text{F}$ ?

Temanmu ingin membuat kapsitor dengan kapasitansi  $0,2\text{ F}$ . Berapa luas masing-masing pelat jika kedua pelat tersebut jika terpisan sejauh  $2,2\text{ mm}$  oleh udara?

Berapa kapasitansi kapasitor yang mengandung pelat lingkaran jang berjari-jari  $5,0\text{ cm}$  dan dipisahkan sejauh  $3,2\text{ mm}$  oleh mika? Konstanta dielektrik mika adalah  $7$ .

Jika kapasitor pelat sejajar memiliki muatan  $4,2\text{ }\mu\text{C}$  dan medan listrik sebesar  $2,0\text{ kV/m}$  harus dihasilkan jika jarak antara dua pelat adalah  $4,0\text{ mm}$  dan mediaum antara dua pelat adalah udara, berapakah luas masing-masing pelat?

Berapa kuat medan listrik antara dua pelat kapasitor  $0,80\text{ }\mu\text{F}$  yang ruang antara dua pelat adalah udara setebal  $2,0\text{ mm}$  dan masing-masing pelat mengandung muatan  $72\text{ }\mu\text{C}$ ?

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

---

Kuat medan listrik antara dua pelat kapasitor yang dipisahkan oleh bahan dielektrin dengan  $\kappa = 3,75$  adalah  $9,21 \times 10^4$  V/m. Ke dua pelat terpisah sejauh 1,95 mm dan masing-masing mengandung muatan  $0,775 \mu\text{C}$ . Tentukan kapasitansi kapasitor ini dan luas masing-masing pelat

Kapasitor sebesar  $7,7 \mu\text{F}$  dihubungkan dengan tegangan 125 V hingga muatan terisi penuh. Sumber tegangan kemudian dihilangkan dan kapasitor tersebut dihubungkan dengan kapasitor lain yang masih kosong dan diamati tegangan pada kapasitor pertama turun menjadi 15 V. berapakah kapasitansi kapasitor kedua?

Kapasitor  $2,50 \mu\text{F}$  diberi muatan dengan tegangan 1000 V dan kapasitor  $6,80 \mu\text{F}$  diberi muatan dengan tegangan 650 V. Ke dua kapasitor kemudian masing-masing diputus hubungannya dengan baterai dan kutub positif masing-masing kapasitor dihubungkan dan kutub negatif masing-masing juga dihubungkan.

Tegangan 550 V dikenakan pada kapasitor 7200 pF. Berapa jumlah energi yang tersimpan?

Bagaimana perubahan energi yang tersimpan dalam kapasitor jika

- (a) beda potensial dijadikan dua kali
- (b) muatan pada masing-masing pelat dijadikan dua kali
- (c) jarak antar dua pelat dijadikan dua kali namun kapasitor tetap dihubungkan dengan baterai

Sebuah kapasitor pelat sejajar menyimpan muatan  $Q$ . Jika jarak antar dua pelat dijadikan setengah dan di antara dua pelat dimasukkan bahan dielektrik dengan konstanta  $\kappa$  sebagai pengganti udara, berapa kali energi yang tersimpan dalam kapasitor berubah? Bagaimana perbandingan medan listrik dalam kapasitor sebelum dan sesudah dimasukkan bahan dielektrik?

Kapasitor  $2,7 \mu\text{F}$  dihubungkan dengan baterai 45,0 V. Kapasitor kemudian dilepaskan dari baterai dan kemudian dihubungkan dengan kapasitor  $4,0 \mu\text{F}$  yang tidak bermuatan. Tentukan energi total yang tersimpan (a) sebelum kapasitor dihubungkan (b) setelah kapasitor dihubungkan.

Sebuah rantai ion mengandung ion dengan muatan yang sama besar tetapi

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

---

berselang-seling tanda. Ion bernomor ganjil memiliki muatan  $+q$  dan yang bernomor genap memiliki muatan  $-q$ . Jarak antar ion terdekat adalah  $a$  dan jumlah total ion adalah  $N$ .

Tentukan potensial yang dimiliki ion pertama jika  $N = 10$ ,  $N = 100$ ,  $N = 1000$ , dan  $N = 10000$  (kalian dapat menghitung dengan excel)

Tentukan potensial ion pertama jika  $N \rightarrow \infty$ .

Dalam atom hydrogen electron mengitari inti pada lintasan dengan jari-jari  $0,53$  angstrom. Hitung energy yang dibutuhkan untuk mengionisasi atom hydrogen (melepas electron dari atom hydrogen menjadi electron bebas).

Pada Kristal dengan struktur kubus sederhana ion-ion menempati sudut-sudut kubus. Misalkan satu sudut diisi satu ion maka total ion adalah delapan. Misalkan panjang sisi kubus adalah  $a$  dan muatan tiap ion adalah  $q$ . Hitung energy potensial yang dimiliki satu ion akibat pengaruh tujuh ion lainnya.

Kalian bermaksud melakukan percobaan menahan satu tetes air dengan menggunakan medan listrik. Misalkan sebuah tetesan air memiliki jari-jari  $0,1$  mm dan diberi muatan  $q$ . Massa jenis air adalah  $1000$  kg/m<sup>3</sup>. Ketika diberikan medan listrik sebesar  $100.000$  V/m tetes air tersebut diam. Gaya gravitasi tepat diimbangi oleh gaya listrik. Berapakah muatan listrik yang dikandung tetesan air tersebut?

Sebuah kapasitor dibuat dengan menggulung elektroda yang berbentuk lembaran dalam bentuk spiral. Kedua elektroda dipisahkan oleh bahan dielektrik setebal  $d$  dengan konstanta dielektrik  $\kappa$ . Misalkan gulungan dimulai dari  $r = 0$  sampai jari-jari terluar menjadi  $r = R$ . Panjang kapasitor adalah  $L$ . Perkirakan kapasitansi yang dihasilkan dengan asumsi bahwa gulungan yang dihasilkan adalah padat sempurna.

Tanah adalah bahan dielektrik. Konstanta dielektrik tanah sangat ditentukan oleh kandungan air yang meresap ke dalam tanah. Jika dalam tanah dimasukkan dua pelat konduktor sejajar dan sangat berdekatan maka terbentuk kapasitor di mana tanah menjadi bahan dielektrik kapasitor tersebut. Nilai kapasitansi sangat ditentukan oleh jumlah air yang meresap

## Bab 2 Potensial Listrik dan Kapasitor

---

pada tanah antara dua pelat. Dengan kata lain, dua pelat sejajar berdekatan tersebut dapat digunakan untuk memprediksi kandungan air dalam tanah. Atau dua pelat sejajar tersebut dapat menjadi sensor kandungan air tanah. Misalkan luas satu pelat adalah  $A$  dan jarak pisah antara dua pelat adalah  $d$ . Misalkan kebergantungan konstanta dielektrik tanah terhadap konsentrasi air yang meresap dalam tanah memenuhi  $\kappa = a + bn$  dengan  $a$  dan  $b$  konstanta dan  $n$  adalah konsentrasi air dalam tanah. Tentukan persamaan hubungan antara kapasitansi yang diukur dengan konsentrasi air dalam tanah. Kapasitansi sering ditentukan berdasarkan frekuensi resonansi sinyal AC yang dilewatkan pada kapasitor. Frekuensi resonansi memenuhi  $f_0 = k / \sqrt{C}$  dengan  $k$  adalah konstan. Turunkan rumus konsentrasi air tanah sebagai fungsi frekuensi resonansi.

Medan listrik yang sangat besar dapat mengionisasi atom-atom atau molekul-molekul. Elektron dapat lepas dari atom atau molekul dan meninggalkan ion positif. Jika atom atau molekul yang terkandung dalam sel hidup diionisasi maka sel tersebut dapat mati. Dengan demikian potensial listrik yang besar dapat digunakan untuk membunuh sel-sel yang tidak dibutuhkan dalam makanan.