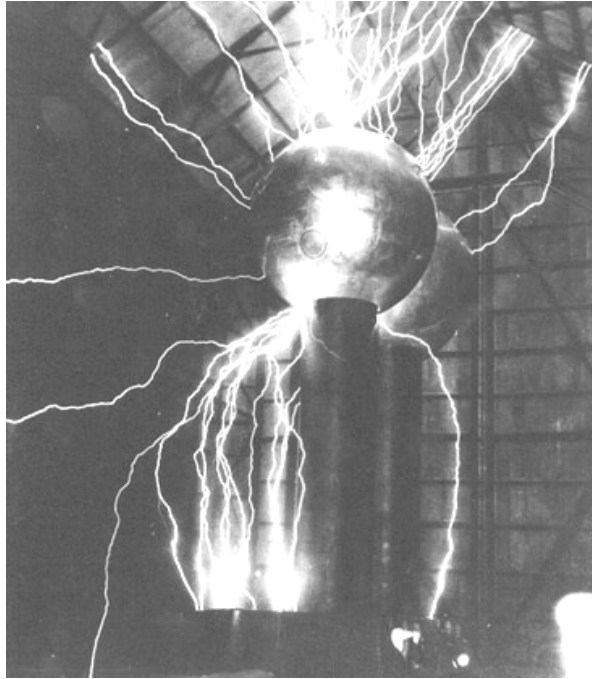




**LISTRIK STATIS**  
*Hukum Coulomb*  
*Dan Medan Listrik Pada Muatan Titik*

**BAB 1**  
Fisika Dasar II

## 1. PENDAHULUAN :KRONOLOGI PENEMUAN MUATAN LISTRIK



**Gb 1.1 Petir  
Merupakan Loncatan  
Muatan Listrik Statis**

Sesungguhnya fenomena elektrostatik merupakan pemandangan yang sering sekali kita lihat sehari-hari. Beberapa dari kita mungkin pernah *iseng* menggosokkan penggaris plastik pada tangan kita kemudian mendekatkannya ke rambut teman kita hingga nampak beberapa helai rambut berdiri karenanya. Atau coba gunakanlah dengan menggunakan balon, gosokkan ke rambut kita kemudian tempelkanlah pada dinding, lihatlah apa yang terjadi ? balon akan menempel pada dinding. Atau dalam skala yang besar fenomena elektrostatik sering anda lihat pada timbulnya petir akibat loncatan muatan listrik statis di ionosfir.



**Gb 1.2 Batu Ambar  
Merupakan Batuan  
Yang Mengandung  
Litrsik Statik**

Beberapa contoh di atas adalah salah satu dari sekian banyak fenomena elektrostatik yang sudah menjadi perhatian manusia sejak ribuan tahun lalu. Sejak zaman Yunani kira-kira 2600 tahun yang lalu, Thales of Miletus telah memperhatikan fenomena sebuah benda fosil mirip kaca atau resin yang digosokkan dapat menarik benda-benda tertentu secara “ajaib”, misalnya pakaian yang terbuat dari bulu binatang. Fenomena ini telah menjadi perhatian banyak kalangan sampai berabad-abad kemudian, saat itu fosil tersebut dalam bahasa Yunani dinamai *electron*, dalam bahasa Inggris ini dikenal sebagai batu ambar (amber) berasal dari bahasa Arab *anbar*. Kejadian alam ini belum dapat dijelaskan secara ilmiah kecuali menganggapnya sebagai sebuah “sihir” semata



**Gilbert**

Pada tahun 1600-an, seorang dokter istana Inggris, William Gilbert meneliti “keajaiban” batu ambar tersebut secara ilmiah dan membedakannya dari fenomena kemagnetan. Gilbert menamai gejala batu ambar ini dan gejala apapun yang serupa sebagai *Electric* (dalam bahasa Yunani batu ambar disebut *electron*) atau dalam bahasa Indonesia disebut listrik (bukan elektron). Sekarang istilah *electric* atau listrik dipakai untuk menamai semua gejala yang berhubungan dengan ion (elektron dan proton) serta dinamikanya



**Du Fay**

Tahun 1700-an, seorang Ilmuan bernama Du Fay menunjukkan bahwa ada dua jenis gejala kelistrikan statik. Pertama bahwa gejala listrik ini dapat menimbulkan efek tarik-menarik pada benda tertentu dan yang kedua dapat menyebabkan tolak-menolak. Dari dua gejala ini disimpulkan terdapat dua

jenis sumber listrik (yang kemudian disebut muatan listrik). Du Fay menamakan gejala ini dengan istilah *resinous*(-) dan *vitreous*(+).



Franklin

Seorang ilmuwan, sastrawan, politisi dan terutama salah seorang penggagas deklarasi kemerdekaan Amerika, Benjamin Franklin pada tahun 1752 kemudian menyatakan bahwa fenomena kilat dan batu ambar merupakan gejala yang sama dan menamakan (memberi tanda) kedua jenis listrik (muatan listrik) ini sebagai positif (+) dan negatif (-). Penamaan ini dipakai hingga saat ini dan amat membantu dalam menjelaskan gaya elektrostatik

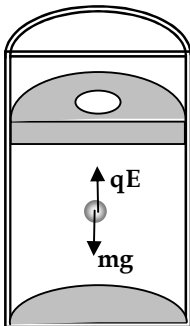


Millikan

Robert A. Millikan (1869-1953) kemudian melakukan eksperimen yang bertujuan mencari harga muatan yang paling kecil yang bisa didapatkan.

Percobaan Millikan dikenal sebagai percobaan tetes-minyak (oil-drop). Percobaan ini dilakukan dengan meneteskan minyak dengan tetesan kecil melalui dua pelat logam dengan beda potensial yang dapat diatur. Medan listrik yang dihasilkan dari kedua pelat akan menarik muatan listrik dari tetesan minyak tadi pada pelat bagian atas, dan jika beda tegangan diatur agar cukup bisa mengimbangi gaya gravitasi pada tetes minyak, maka partikel-partikel minyak yang mengandung muatan tadi akan melayang karena keseimbangan gaya ini. Pada keadaan ini gaya gravitasi (yang dapat kita hitung) sama dengan gaya elektrostatik, sehingga muatan dapat diketahui besarnya. Melalui banyak percobaan dengan tetes minyak yang beragam massanya, maka secara umum bisa muatan bisa diperoleh melalui :

$$\begin{aligned} F_{\text{listrik}} &= W \\ qE &= mg \\ q &= \frac{mg}{E} \end{aligned}$$



Gb 1.3 Ilustrasi percobaan Millikan. Tetes minyak mengalami dua arah gaya, ke atas gaya listrik dan ke bawah gaya berat

Nilai  $g$  dan  $E$  dapat diketahui sedangkan  $m$  diukur melalui kecepatan terminal. Millikan mengamati bahwa hasil dari muatan listrik yang diperoleh selalu kelipatan dari  $1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$ .

Hasil “percobaan tetes minyak” nya didapatkan harga muatan terkecil sebesar  $1,6 \times 10^{-19}$ . Harga muatan ini dimiliki oleh partikel terkecil elektron, sehingga bilangan tersebut disebut  $e$  (muatan elektron).

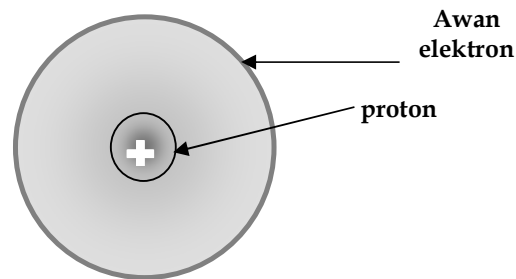
$$e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

Artinya benda apapun yang bermuatan listrik, muatannya adalah kelipatan bilangan bulat dari harga  $e$  ( $1e$ ,  $2e$ ,  $3e...$ ). Atas percobaan ini Millikan menerima hadiah Nobel bidang Fisika.

Fenomena bahwa muatan listrik merupakan bilangan bulat dari  $e$  dikenal sebagai kuantisasi muatan. Kuantisasi artinya dapat "dihitung" menjadi bagian-bagian terkecil. Karena muatan elektron sedemikian kecil, maka untuk menghasilkan  $1\text{ C}$  saja diperlukan sekitar  $6.242.197.253.433.208.489$  buah elektron !!

Apa yang sesungguhnya terjadi dengan fenomena elektrostatik ini ? Ilustrasi berikut akan membantu anda.

Sebagaimana kita ketahui bahwa benda-benda non-konduktor memiliki muatan yang netral. Ini berarti bahwa jumlah muatan positif dan negatif di dalamnya sama. Dan karena setiap benda terdiri dari atom, maka dengan demikian jumlah muatan elektron akan sama dengan inti atom yang notabene bermuatan positif.



**Gb 1.4 Sebuah Atom Bermuatan Netral Memiliki Muatan Negatif dan Positif yang Sama Besar**

Jika karena sesuatu hal, elektron dalam atom atau benda berpindah, maka benda atau atom akan kekurangan elektron, dan dengan demikian menjadi bermuatan positif. Benda/atom yang bermuatan positif ini cenderung menetralkan diri sebagai sifat dasarnya, dan ketika bertemu dengan benda lain yang kelebihan elektron, maka benda yang bermuatan positif akan mendekat.

Meskipun terdapat dua jenis muatan (positif dan negatif), namun sesungguhnya kita tidak dapat membedakan benda yang mana yang bermuatan negatif atau positif. Dua jenis muatan ini tidaklah seperti jenis laki-laki dan perempuan yang mudah dibedakan dengan kasat mata. Namun, menurut tradisi, gelas/kaca yang digosok dengan kain sutra merupakan benda bermuatan positif, sedangkan jika digosok dengan kain wol maka akan

bermuatan negatif. Dengan demikian benda apapun yang ditolak oleh kaca yang telah digosok oleh kain sutra, maka ia kita sebut bermuatan positif. Demikian juga sebaliknya.

Ketika batang gelas digosok dengan kain sutra, sejumlah elektron dari batang gelas berpindah ke kain sutra sehingga batang gelas kekurangan elektron dan bermuatan positif. Batang gelas yang bermuatan positif akan menarik konduktor yang memiliki elektron bebas, misalnya kertas logam.

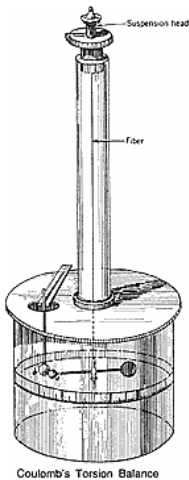
Mekanisme sebaliknya terjadi ketika kita menggosokkan wol pada batang gelas, sejumlah elektron justru berpindah dari wol ke batang gelas sehingga batang gelas memiliki muatan negatif berlebih.

## HUKUM COULOMB

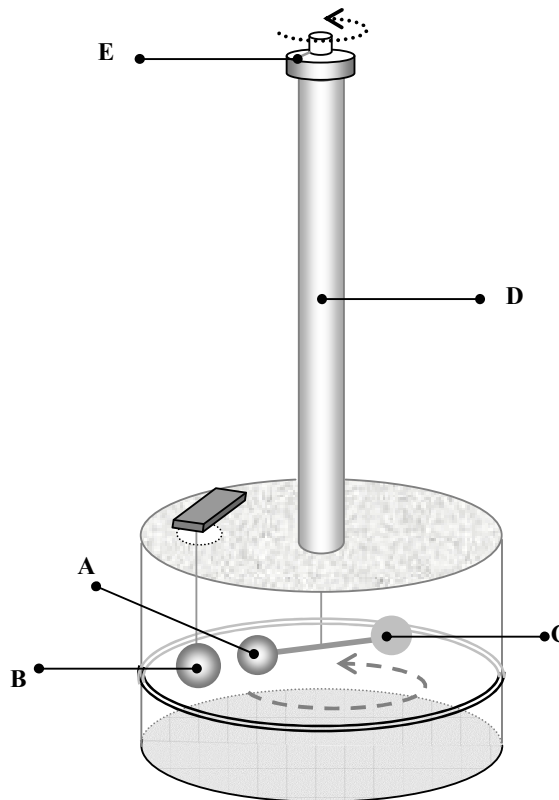
Pada tahun 1768, melalui sebuah percobaan, Coulomb mendapatkan bahwa muatan-muatan sejenis akan menimbulkan efek tarik-menarik (atraktif) dan benda yang berlainan jenis akan saling menolak (repulsif). Gaya tarik/tolak ini berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antar benda/muatan dan sebanding dengan besarnya muatan benda tersebut.



Coulomb



Perangkat  
Percobaan Coulomb



Gb 1.5 Struktur Torsion Balance yang Digunakan Coulomb Untuk Menghitung hubungan Gaya Elektrostatik dengan jarak dan besarnya muatan

Perangkat yang digunakan Coulomb disebut "*Torsion Balance*" yang terdiri dari dua bola bermuatan A dan B. Bola dapat berputar dan memuntir benang serat. Dan bola B merupakan bola yang tidak bisa bergerak sedangkan C merupakan pengimbang bola A. Gaya elektrostatis timbul ketika bola bermuatan B seperti pada gambar 1.4 di bawah mendekati muatan A. Jika muatannya sejenis muncul gaya elektrostatis sehingga batang A-C berputar. Besarnya gaya elektrostatis sebanding dengan putaran dari pasangan bola A-C. Putaran ini, melalui serat (fiber) ringan D yang terukur melalui semacam busur E.

Ketika besarnya muatan B diperbesar dengan diberi muatan tambahan atau diperkecil dengan cara mengalirkan muatannya ke tanah, Coulomb mengamati bahwa (dengan melihat skala di E) puntiran menjadi besar ketika muatan ditambah dan menjadi kecil ketika muatan dikurangi. Hal ini menunjukkan bahwa gaya elektrostatis sebanding dengan besar masing-masing muatan. Sehingga Coulomb merumuskan bahwa :

$$F \propto Q_A Q_B$$

Selanjutnya ketika Coulomb mengatur jarak antar muatan A atau B, mengamati bahwa puntiran menjadi besar ketika jaraknya dekat dan menjadi kecil ketika jaraknya lebih jauh dan menyimpulkan bahwa gaya elektrostatis ini berbanding terbalik dengan kuadrat jarak :

$$F \propto \frac{1}{r^2}$$

Dari percobaan Coulomb dapatlah disimpulkan bahwa :

$$F \propto \frac{Q_A Q_B}{r_{AB}^2}$$



**Cavendish**

yang berarti gaya elektrostatis sebanding dengan masing-masing muatan dan berbanding terbalik dengan kuadrat jaraknya. Untuk membuat rumusan ini menjadi eksak, artinya mengubah tanda sebanding ( $\propto$ ) dengan tanda =, maka diperlukan sebuah konstanta, katakanlah k di mana :

$$F = k \frac{Q_A Q_B}{r_{AB}^2} \quad (1)$$

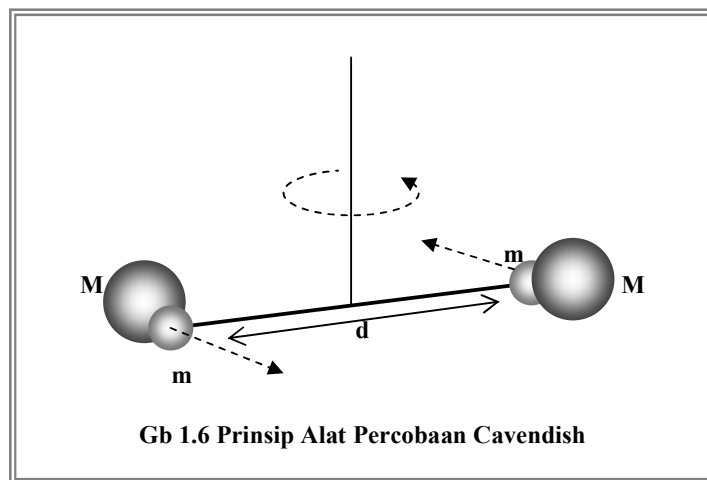
nilai k dikenal sebagai konstanta Coulomb. Namun berapakah besarnya konstanta k ini ? Sebelum Coulomb, Cavendish sesungguhnya telah terlebih dahulu menggunakan prinsip yang sama ketika ia menghitung konstanta G pada gaya gravitasi universal. Namun ia tidak mempublikasikannya dan

terlambat dikenali orang dibandingkan Coulomb yang mempublikasikan karya-karyanya melalui *Mémoires de l'Académie Royale* antara tahun 1775 hingga 1779.

Nilai dari  $k$  diukur melalui percobaan menggunakan prinsip Cavendish ketika menghitung nilai  $G$  pada konstanta gravitasi universal, yang bentuk persamaannya sangat mirip dengan gaya elektrostatik :

$$\mathbf{F} = G \frac{Mm}{r^2} \longleftrightarrow \mathbf{F} = k \frac{Q_A Q_B}{r_{AB}}$$

Prinsip percobaan Cavendish sebetulnya sederhana. Terdiri dari dua bola bermuatan masing-masing  $m$  dan jari-jari  $r$  yang dihubungkan dengan batang ringan yang disebut dengan "dumbbell". Dumbbel ini dapat berputar bolak-balik karena ditolak gaya elektrostatik dari dua bola lain bermassa  $M$ .



Gaya tolak ini sebanding dengan torsi dengan  $\tau = F \cdot (d/2)$ , sehingga jika torsi bisa diukur maka gaya bisa diukur dan jika muatan serta jarak diketahui nilai  $k$  bisa diperoleh dari hubungan persamaan (1) :

$$k = \frac{\mathbf{F} \cdot \mathbf{r}_{AB}}{Q_A Q_B}$$

Untuk mengukur torsi, digunakan hubungan Hooke di mana :

$$\tau = c \cdot \theta$$

$c$  ini adalah modulus elastik dari kawat yang dapat diukur dari dengan menghitung peroda osilasi dumbell dengan :

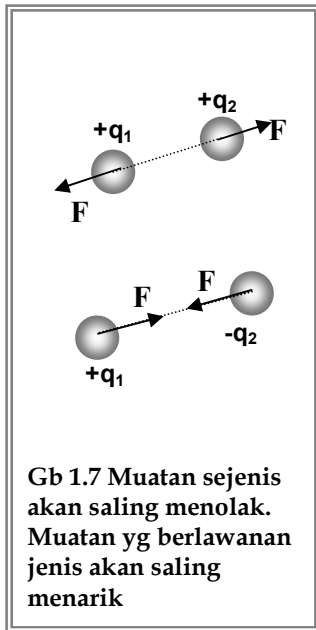
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{c}}$$

$$c = \frac{4\pi^2}{T^2} I$$

I adalah momen inersia, untuk dumbell nilainya  $I=2m(d^2+2r^2/5)$ . Maka jika  $d, r, m$  dan  $T$  bisa dihitung maka secara prinsip kita bisa memperoleh nilai  $k$ . Nilai  $k$  dari pengukuran diperoleh sekitar  $9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ , nilai ini untuk medium udara atau vakum.

Dari persamaan (1) di atas maka hukum Coulomb dirumuskan secara formalsebagai berikut : Misalkan terdapat dua partikel bermuatan listrik  $q$  dan  $q'$  berjarak  $r_{12}$  dalam hampa udara. Jika  $q$  dan  $q'$  maka akan timbul gaya interaksi yang disebut gaya Coulomb yang didefinisikan sebagai :

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q \cdot q'}{r_{12}^2} \hat{\mathbf{r}}_{12} \quad (2)$$



dengan

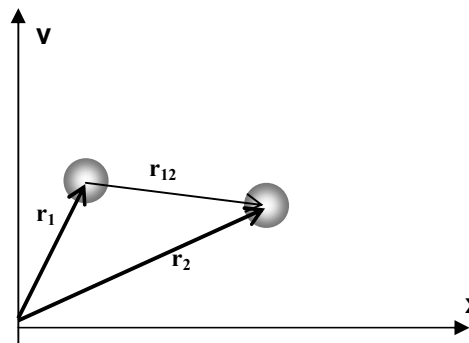
$$k = 1/(4\pi\epsilon_0) \approx 9 \times 10^9$$

$\mathbf{F}$  = Gaya Coulomb (Newton)

$q_1$  = Muatan pertama (coulomb)

$q_2$  = Muatan kedua (coulomb)

$r_{12}$  = jarak antar muatan 1 dan 2 (meter)



**Gb 1.8 Vektor posisi : Interaksi dua muatan**

Anda tidak perlu merasa bingung dengan simbol  $\hat{\mathbf{r}}_{12}$  pada hukum Coulomb di atas, ia hanya menunjukkan arah gaya coulomb dan tidak mempengaruhi besarnya nilai  $F$  karena merupakan vektor satuan yang nilainya satu. Dalam buku lain anda mungkin menemukan penulisan hukum Coulomb seperti ini :

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q \cdot q'}{r_{12}^3} \vec{r}_{12}$$

Di mana arahnya dinyatakan tidak dalam vektor satuan keduanya identik karena :

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q \cdot q'}{r_{12}^3} \vec{r}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q \cdot q'}{r_{12}^3} \cancel{r_{12}} \hat{\mathbf{r}}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q \cdot q'}{r_{12}^2} \hat{\mathbf{r}}_{12}$$

Beberapa catatan penting tentang persamaan ini adalah bahwa persamaan tersebut :

1. Hanya berlaku untuk muatan titik (artinya dimensi volume tidak diperhatikan)
2. nilai  $k \approx 9 \times 10^9$  hanya berlaku untuk muatan dalam vakum atau udara, untuk medium lain harganya akan berbeda.
3. Bila  $q$  dan  $q'$  bertanda sama maka  $F$  akan bertanda positif. Tanda  $F$  positif menunjukkan bahwa kedua muatan tolak menolak. Sebaliknya tanda negatif menunjukkan gaya yang saling menarik
4. Gaya elektrostatik  $F$  merupakan besaran vektor, sehingga operasi padanya harus memenuhi ketentuan operasi pada besaran vektor. Artinya jika terdapat beberapa muatan, maka gaya total yang dialami satu muatan merupakan resultan dari superposisi gaya-gaya oleh muatan-muatan lain.

Contoh :

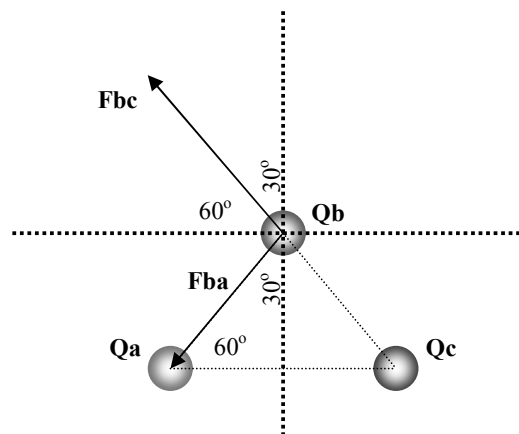
Misalkan tiga buah muatan listrik sebagai berikut :

$$Q_a = -1 \mu C$$

$$Q_b = 2 \mu C$$

$$Q_c = 4 \mu C$$

dengan konfigurasi posisi sebagai berikut :



Hitunglah gaya elektrostatik total di  $Q_b$  !

Jawab :

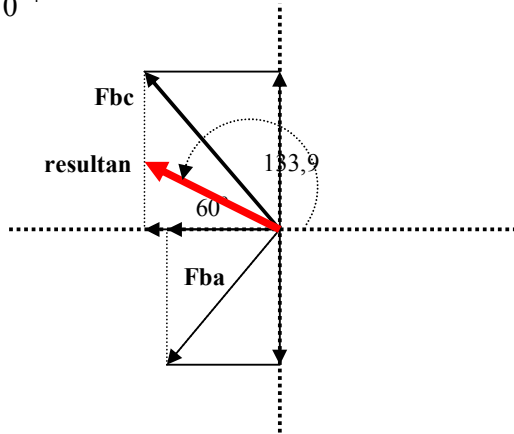
Gaya elektrostatik antara  $Q_b$  dan  $Q_c$  merupakan muatan sejenis sehingga menghasilkan gaya tolak-menolak ( $F_{bc}$ ) yang arahnya seperti pada gambar. Gaya elektrostatik akibat muatan  $Q_a$  terhadap  $Q_b$  merupakan gaya tarik-

menarik sehingga arahnya menuju Qa ( $F_{ba}$ ). Untuk mendapatkan gaya total kita harus menjumlahkan vektor  $F_{ba}$  dan  $F_{bc}$  secara vektor pula. Sehingga persoalan kita adalah bagaimana menjumlahkan vektor kedua vektor tersebut.

Kita hitung terlebih dahulu besar gayanya :

$$F_{bc} = 9 \times 10^9 \frac{8 \times 10^{-12}}{10^{-4}} = 720 \text{ N}$$

$$F_{ba} = 9 \times 10^9 \frac{2 \times 10^{-12}}{10^{-4}} = 180 \text{ N}$$



arah gayanya dapat anda lihat pada gambar. Dengan cara analitik kita akan menjumlahkan gaya-gaya yang terlibat sebagai berikut :

|          | Komponen-X                               | Komponen-Y                                      |
|----------|------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| $F_{bc}$ | $(720)(\cos 120^\circ) = -360 \text{ N}$ | $(720)(\sin 120^\circ) = 360\sqrt{3} \text{ N}$ |
| $F_{ba}$ | $(180)(\cos 240^\circ) = -90 \text{ N}$  | $(180)(\sin 240^\circ) = -90\sqrt{3} \text{ N}$ |
| $\Sigma$ | $R_x = -450 \text{ N}$                   | $R_y = 270\sqrt{3} \text{ N}$                   |

Gaya total :

$$F = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} = \sqrt{(-450)^2 + (270\sqrt{3})^2} \approx 450,52 \text{ N}$$

arahnya :

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{R_y}{R_x} = \tan^{-1} \frac{270\sqrt{3}}{-450} \approx -46,10^\circ$$

namun dari gambar kita lihat bahwa sudut yang benar adalah  $(180^\circ + (-46,10^\circ)) = 133,90^\circ$

karena sifat kesamaan trigonometri :  $\tan(180^\circ + \theta) = \tan(\theta)$

Arah dan besar vektor gaya elektrostatis resultan, anda dapat lihat pada gambar di atas.

## 2. MEDAN LISTRIK

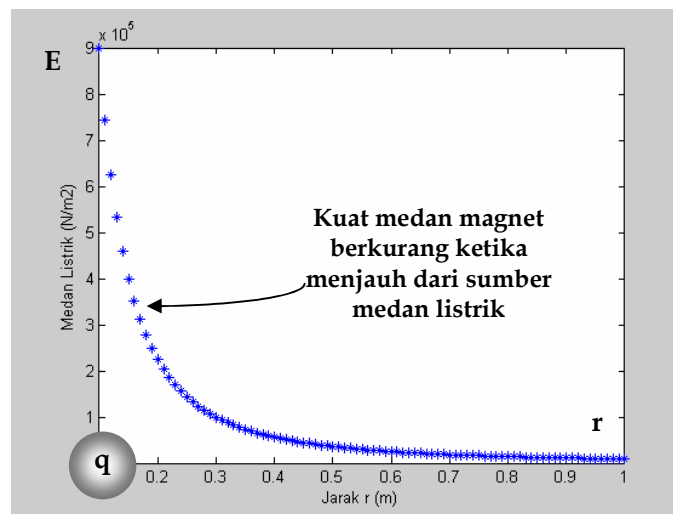
### 2.1 Hubungan Medan Listrik Dengan Gaya Coulomb

Fenomena elektrostatik dapat dijelaskan melalui interaksi gaya Coulomb seperti di atas, yaitu dari sudut pandang pengaruh sebuah muatan listrik terhadap muatan lainnya. Cara lain untuk menjelaskan gejala elektrostatik ini adalah dengan konsep medan. Seringkali, dalam aplikasi medan listrik lebih penting dan lebih mudah diukur. Dengan konsep medan, kita memandang sebuah muatan listrik  $q$  sebagai sumber yang memancarkan pengaruh listrik ke segala arah. Pengaruh listrik ini dinamakan medan (field). Medan listrik ini akan mempengaruhi muatan listrik lain  $q'$  yang berada di sekitarnya, sehingga akan tertarik atau tertolak, bergantung dari jenis muatannya. Atau dengan kata lain muatan  $q'$  akan mengalami gaya Coulomb.

Medan listrik adalah daerah di sekitar muatan di mana pengaruh listrik masih berpengaruh pada muatan lain. Medan listrik di suatu titik sejauh  $r$  dari muatan  $q$  adalah :

$$E(\vec{r}) = k \frac{q}{r^2} \hat{r} \quad (3)$$

Dari persamaan ini kita perhatikan bahwa makin jauh dari muatan listrik, medan listrik makin kecil secara kuadratik, perhatikan gambar 1.8 di bawah.

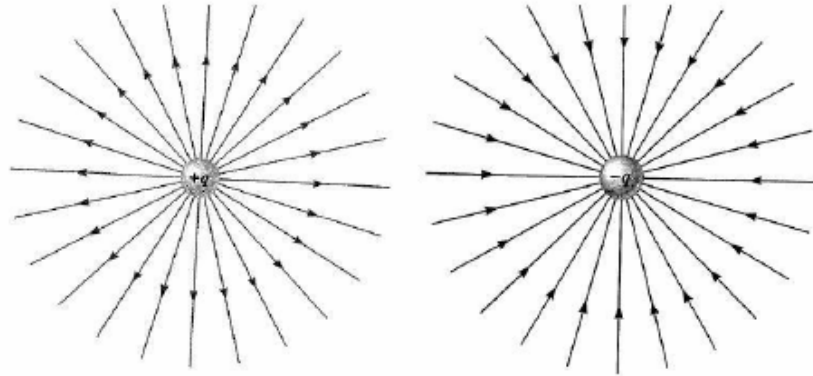


GB 1.9 Penurunan Kuat Medan Listrik Terhadap Jarak Dari Sumbernya

Untuk muatan  $q$  positif, medan listrik digambarkan sebagai garis-garis yang keluar dari muatan sumber sebagaimana ditunjukkan pada gambar 1.10 .

Beberapa catatan penting mengenai medan listrik adalah :

1. Persamaan (2) hanya berlaku untuk muatan titik
2. Pusat sistem koordinat ada pada muatan sumber  $q$
3. Satuan yang dipakai adalah dalam sistem MKS
4. Hanya berlaku untuk muatan dalam medium vakum atau udara



**GB 1.10 Arah Garis Medan Listrik Muatan Positif Menjauhi Muatan Listrik dan Negatif Mendekati muatan listrik**

Contoh :

Hitunglah medan listrik dari sebuah muatan titik dengan besar muatan  $4 \mu\text{C}$  pada radius  $1 \text{ cm}$ ,  $2 \text{ cm}$  dan  $3 \text{ cm}$

Jawab :

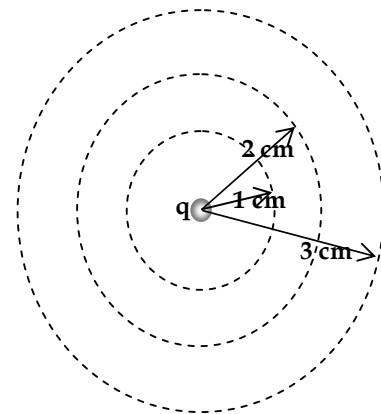
Dengan menggunakan persamaan (3), maka kita peroleh kuat medan listrik pada masing-masing titik :

$$E_1 = k \frac{q}{r_1^2} = 9 \times 10^9 \frac{4 \times 10^{-6}}{(10^{-2})^2} = 3,6 \times 10^8 \text{ N/C}$$

$$E_2 = k \frac{q}{r_2^2} = 9 \times 10^9 \frac{4 \times 10^{-6}}{(2 \times 10^{-2})^2} = 0,9 \times 10^8 \text{ N/C}$$

$$E_3 = k \frac{q}{r_3^2} = 9 \times 10^9 \frac{4 \times 10^{-6}}{(3 \times 10^{-2})^2} = 0,4 \times 10^8 \text{ N/C}$$

kita lihat dari hasil perhitungan ini bahwa semakin jauh jarak dari sumber medan listrik maka kuat medan listrik semakin kecil.



Dari persamaan (3) bisa kita dapatkan hubungan antara gaya Coulomb  $F$  dengan medan listrik  $E$  :

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq'}{r^2} = q \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q'}{r^2} \right)$$

$$F = q \cdot E \quad (4)$$

Contoh :

*Sebuah muatan titik sebesar  $2\mu C$  mengalami gaya  $20\text{ N}$  dari sebuah sumber muatan listrik lain. Berpakah kuat medan listrik yang dialami muatan titik tersebut ?*

Jawab :

Dari persamaan (4) :

$$E = \frac{F}{q} = \frac{20}{2 \times 10^{-6}} = 10^7 \text{ N/C}$$

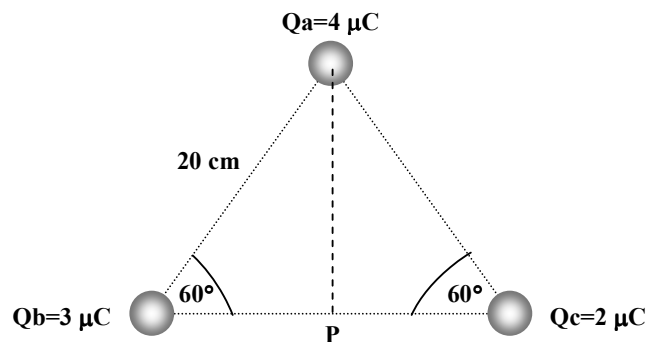
Jika sumber medan listrik terdiri dari banyak muatan, maka yang harus dilakukan adalah melakukan superposisi (penjumlahan) vektor-vektor medan (ingat bahwa menjumlah vektor tidak sama dengan menjumlah besaran skalar)

## 2.2 Prinsip Superposisi Medan Listrik

Seperti halnya gaya Coulomb, medan listrik juga memenuhi prinsip superposisi, artinya jika terdapat lebih dari satu muatan titik, maka kuat medan listrik pada suatu titik merupakan jumlah vektor dari seluruh muatan listrik tersebut

Contoh :

*Perhatikan muatan-muatan di bawah ini, hitunglah medan listrik total pada titik P oleh muatan-muatan lain*



Jawab :

Kita hitung terlebih dahulu kuat medan magnet yang diakibatkan ketiga muatan yang terlibat :

**Medan di P akibat muatan  $Q_a$  :**

Jarak muatan a ke P ( $r_a$ ) adalah :

$$r_a = \sqrt{20^2 - 10^2} = 10\sqrt{3} \text{ cm}$$

melalui persamaan (3) medan listrik dapat dihitung :

$$E_a = k \frac{Q_a}{r_a^2} = 9 \times 10^9 \frac{4 \times 10^{-6}}{(10\sqrt{3} \times 10^{-2})^2} = 1,2 \times 10^6 \text{ N/C}$$

**Medan di P akibat muatan  $Q_b$  :**

Jarak muatan b ke P ( $r_b$ ) adalah 10 cm

melalui persamaan (3) medan listrik dapat dihitung :

$$E_b = k \frac{Q_b}{r_b^2} = 9 \times 10^9 \frac{3 \times 10^{-6}}{(10 \times 10^{-2})^2} = 2,7 \times 10^6 \text{ N/C}$$

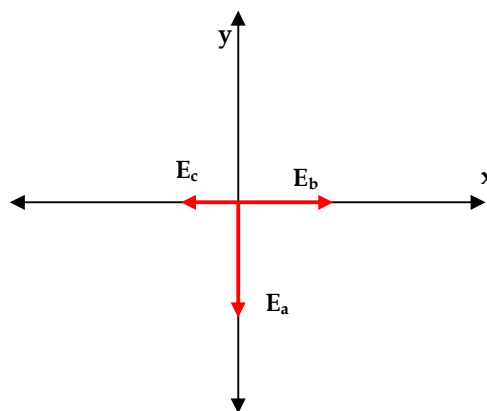
**Medan di P akibat muatan  $Q_c$  :**

Jarak muatan c ke P ( $r_c$ ) adalah 10 cm

melalui persamaan (3) medan listrik dapat dihitung :

$$E_c = k \frac{Q_c}{r_c^2} = 9 \times 10^9 \frac{2 \times 10^{-6}}{(10 \times 10^{-2})^2} = 1,8 \times 10^6 \text{ N/C}$$

Dengan titik P kita letakkan pada pusat koordinat (0,0) arah dari masing-masing medan dapat dilihat pada gambar berikut :



Dengan menggunakan cara penjumlahan vektor secara analitik :

|          | Komponen-X ( $10^6$ N/C)       | Komponen-Y ( $10^6$ N/C)       |
|----------|--------------------------------|--------------------------------|
| $E_a$    | $(1,6)(\cos 270^\circ) = 0$    | $(1,2)(\sin 270^\circ) = -1,2$ |
| $E_b$    | $(2,7)(\cos 0^\circ) = 2,7$    | $(2,7)(\sin 0^\circ) = 0$      |
| $E_c$    | $(1,8)(\cos 180^\circ) = -1,8$ | $(1,8)(\sin 180^\circ) = 0$    |
| $\Sigma$ | $E_x = 0,9$                    | $E_y = -1,2$                   |

Medan total :

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} = \sqrt{(0,9)^2 + (-1,2)^2} = 1,5 \text{ N/C}$$

arahnya :

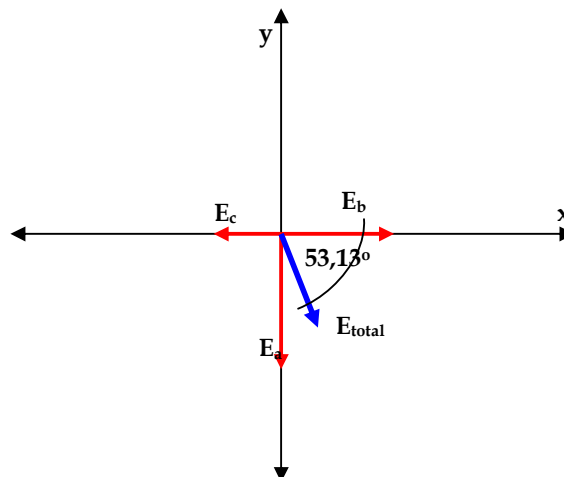
$$\alpha = \tan^{-1} \frac{E_y}{E_x} = \tan^{-1} \frac{-1,2}{0,9} \approx -53,13^\circ$$

dari sifat :  $\tan(180^\circ + \theta) = \tan(\theta)$

secara matematis sudut mungkin juga bernilai :

$$\alpha = 180^\circ - 53,13 = 126,87^\circ$$

namun sudut yang pertamalah yang benar secara fisikal ini dapat di lihat pada gambar berikut :



Bagaimana jika muatan sumber bukan berupa muatan titik ? Misalnya sumber muatan listrik berupa materi yang kontinu atau bongkahan bervolume. Cara apakah yang harus dilakukan untuk menghitung medan listrik pada suatu titik sejauh  $r$  dari muatan sumber yang bukan merupakan muatan titik. Sebuah teknik menghitung akan diperkenalkan pada bab berikutnya, teknik ini dinamakan Hukum Gauss.

### 2.3 Muatan Listrik Dalam Pengaruh Medan Listrik

Jika sebuah muatan  $q$  berada dalam pengaruh medan magnet  $E$  seperti yang telah kita ketahui, muatan akan mengalami gaya elektrostatik atau gaya Coulomb  $F$  yang besarnya sesuai dengan persamaan (4) :

$$F = qE$$

Jika dianggap gaya gravitasi sangat kecil (karena massa yang kecil), maka menurut hukum Newton, muatan akan mengalami percepatan sebesar :

$$\Sigma F = m \cdot a$$

$$qE = m \cdot a$$

$$a = \frac{q}{m} E \quad (5)$$

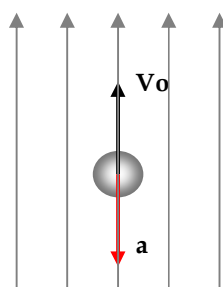
artinya dalam pengaruh medan magnet, muatan listrik akan mengalami perubahan kecepatan.

Untuk muatan positif percepatan (atau gaya) ini searah dengan medan listrik yang mempengaruhinya, namun untuk muatan negatif berlawanan dengan medan listrik.

Contoh :

*Sebuah elektron bergerak dengan kecepatan awal  $10^5$  m/s pada arah y positif dalam pengaruh medan magnet sebesar  $10^4$  N/C dalam arah yang sama. Apakah elektron akan makin dipercepat akibat medan listrik ini ? atau diperlambat ? Jika diperlambat, berapakah jarak yang ditempuh sampai akhirnya berhenti ?*

Jawab :



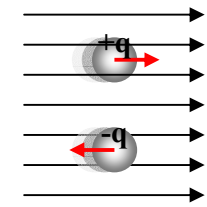
Karena muatan adalah negatif maka arah gaya (atau percepatan) yang ditimbulkan oleh medan listrik berlawanan dengan medan atau berlawanan dengan kecepatan awal, sehingga elektron akan diperlambat sampai akhirnya berhenti.

Besarnya percepatan (atau lebih tepat disebut perlambatan) adalah sebagaimana persamaan (5) :

$$a = \frac{q}{m} E = \frac{1,6 \times 10^{-19}}{9,1 \times 10^{-31}} 10^4 \approx 1,76 \times 10^{15} \text{ m/s}^2 \text{ (arah y negatif)}$$

Untuk menghitung jarak tempuh elektron sampai akhirnya berhenti, kita bisa gunakan persamaan kinematika berikut :

$$v^2 = v_o^2 + 2ax$$



Gb 1.11 Muatan positif dalam pengaruh  $E$  akan bergerak searah sedangkan muatan negatif sebaliknya

dengan  $v = 0$ ,  $v_0 = 105 \text{ m/s}$  dan  $a = -1,76 \times 10^{15} \text{ m/s}^2$ , maka :

$$v^2 = v_0^2 + 2ax$$

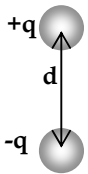
$$0 = (10^5)^2 + 2(-1,76 \times 10^{15})x$$

$$x = \frac{10^{10}}{3,52 \times 10^{15}} \approx 2,84 \times 10^{-6} \text{ m}$$

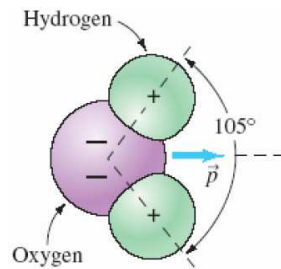
### 3. DIPOL LISTRIK

Jika dua buah muatan berlawanan "diposisikan" sejauh  $d$  seperti pada gambar maka terbentuk sebuah sistem sumber listrik statis yang disebut dipol listrik (Yunani : *dyo* = dua, *polos* = sumbu/pasak).

Dipol listrik ini menarik, karena meskipun secara total besar muatannya nol (karena  $q + (-q) = 0$ ), namun dapat kita lihat bahwa sistem dipol masih memiliki medan listrik di sekitarnya. Di alam dipol listrik ditemukan dalam molekul  $\text{H}_2\text{O}$  di mana hidrogen memiliki muatan positif, sedangkan oksigen bermuatan negatif.



Gb 1.12.  
Dipol listrik



Gb 1.13 Dipol listrik ditemukan pada molekul  $\text{H}_2\text{O}$



Microwave Oven pertama kali ditemukan Percy Spencer secara tak sengaja ketika "peanut bar" nya meleleh dalam saku ketika berdiri di depan magnetron dalam radar tempat ia bekerja di US Navy

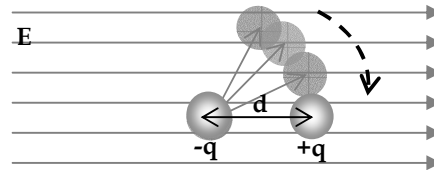
Dalam medan listrik dipol yang dibentuk oleh molekul  $\text{H}_2\text{O}$  bergerak menyearahkan diri dengan medan yang mempengaruhinya, dan jika medan ini dibuat bolak-balik, maka molekul  $\text{H}_2\text{O}$  ikut berosilasi bolak-balik sehingga menaikkan temperaturnya. Teknik inilah yang dimanfaatkan oleh Percy Lebaron Spencer secara tidak sengaja dalam "menemukan" pemanggang microwave pertama kali pada tahun 1946-an.

Dalam pemanggang microwave, medan listrik dengan frekuensi 2,45 GHz (atau dengan panjang gelombang 12.2 cm) di dalamnya dibuat bolak-balik sehingga membuat molekul  $\text{H}_2\text{O}$  yang ada di dalam makanan bergerak bolak-balik juga, akibat gerak bolak-balik ini makanan yang dipanggang menjadi panas dan dalam waktu yang cukup dapat mematangkan makanan.

Dipol listrik ini diukur oleh sebuah besaran bernama momen dipol  $\mathbf{p}$  yang didefinisikan sebagai perkalian muatan  $q$  dengan jarak antar muatannya ( $\mathbf{d}$ ) :

$$\mathbf{p} = q\mathbf{d} \quad (6)$$

jika berada dalam medan magnet  $\mathbf{E}$ , momen dipol ini akan berputar hingga sejajar dengan medan megnetnya seperti pada gambar 1.14 :



**Gb 1.14 Dipol listrik menyejajarkan diri terhadap medan listrik yang mempengaruhinya**

Torsi dari putaran ini dapat dihitung melalui :

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{p} \times \mathbf{E} \quad (7)$$

Contoh :

*Sebuah dipol listrik memiliki momen dipol sebesar 1 e-nm dikenakan padanya medan listrik  $5 \times 10^3$  N/C dengan arah  $30^\circ$  terhadap dipol. Hitunglah besarnya torsi yang timbul*

Jawab :

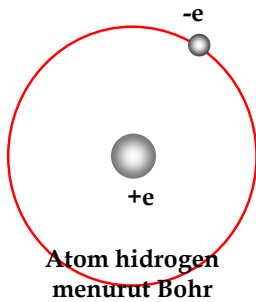
$$\text{Momen dipol } 1 \text{ e-nm} = 1(1,6 \times 10^{-19} \text{ C})(10^{-9} \text{ m}) = 1,6 \times 10^{-28} \text{ Cm}$$

Torsi dapat dihitung melalui persamaan (7) :

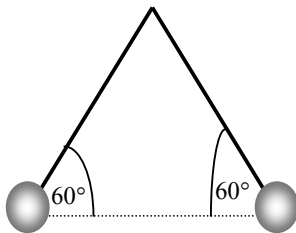
$$\begin{aligned} \tau &= |\mathbf{p} \times \mathbf{E}| \\ &= pE \sin \theta \\ &= (1,6 \times 10^{-28})(5 \times 10^3 \text{ N/C}) \sin 30^\circ = 4 \times 10^{-23} \text{ Nm} \end{aligned}$$

# SOAL-SOAL

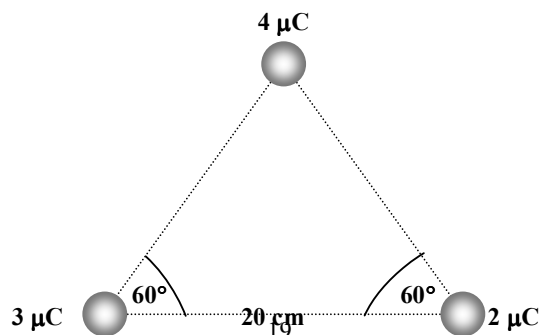
## GAYA COULOMB



1. Dua partikel titik dengan muatan yang sama. Berapakah muatan di setiap partikel jika diketahui gaya Coulomb yang timbul adalah 2,0 N. Jarak kedua partikel adalah 1,5 m
2. Muatan dari inti helium adalah  $+2e$  dan muatan inti neon  $+10e$ , dimana  $e$  adalah muatan dasar yang besarnya  $1,6 \times 10^{-19} \text{C}$ . Hitunglah gaya elektrostatik antara kedua inti tersebut seandainya jarak antara keduanya 3 nanometer.
3. Pada model atom Bohr, elektron ( $q = -e$ ) mengelilingi proton ( $q = +e$ ) dengan jari-jari  $5,3 \times 10^{-11}$ . Gaya tarik antara proton dan elektron inilah yang menyebabkan gaya sentripetal pada elektron, hingga elektron dapat tetap mengorbit. Hitunglah :
  - a. Gaya tarik menarik antara kedua partikel tersebut
  - b. Kecepatan elektron berputar mengelilingi proton
4. Tiga buah muatan titik ditempatkan pada sumbu x seperti pada gambar berpakah jumlah gaya total yang bekerja pada muatan  $-5 \mu\text{C}$  ?



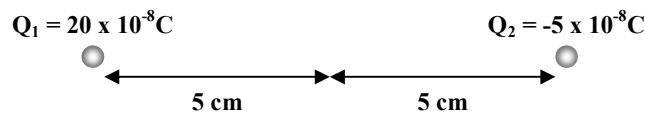
5. Gambar di samping menunjukkan perangkat untuk menghitung muatan listrik yang terdiri dari dua bola identik ( $m = 0,10 \text{ g}$ ) bermuatan sama menggantung di ujung tali yang sama panjangnya. Pada posisi yang tampak pada gambar di bawah, kedua bola itu ternyata mengalami kesetimbangan. Berapakah muatan bola ?
6. Perhatikan muatan-muatan di bawah ini, hitunglah gaya Coulomb total pada muatan  $4 \mu\text{C}$  oleh muatan-muatan lain



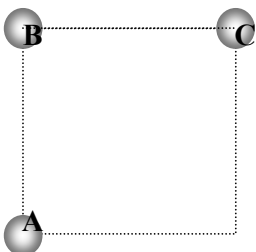
7. Dua buah muatan berada pada sumbu x yaitu  $3 \mu\text{C}$  di  $x = 0$  dan  $-5 \mu\text{C}$  di  $x = 40 \text{ cm}$ . Di mana muatan ketiga  $q$  harus ditempatkan agar resultan gaya padanya akan sama dengan nol

### MEDAN LISTRIK

8. Dengan hukum Gauss, turunkan kuat medan listrik pada benda konduktor berbentuk bola berrongga (kopong) berjari-jari  $a$  bermuatan  $Q$  pada :
- $r$ , di mana  $r < a$  (di dalam bola)
  - $r$ , di mana  $r > a$  (di luar bola)
9. Dengan hukum Gauss, turunkan kuat medan listrik pada benda berbentuk kawat dengan muatan persatuan panjang  $\lambda$  sejauh  $r$  dari kawat.
10. Hitunglah intensitas medan listrik dari sebuah muatan titik  $6 \times 10^{-9} \text{ C}$  pada jarak  $30 \text{ cm}$
11. (Dari soal no 8) Berapa gaya Coulomb yang dialami sebuah muatan titik lain sebesar  $4 \times 10^{-10} \text{ C}$  pada jarak tersebut
12. Perhatikan skema di bawah ini



- Berapakah kuat medan total di titik P
- Gaya yang dialami muatan sebesar  $-4 \times 10^{-8} \text{ C}$
- Di mana intensitas medan listrik sama dengan nol



13. Tiga buah muatan listrik A, B, dan C masing-masing  $-4 \mu\text{C}$ ,  $8 \mu\text{C}$ ,  $-5 \mu\text{C}$ , ditempatkan dalam suatu posisi sehingga membentuk bujursangkar bersisi  $30 \text{ cm}$  dengan satu sudut tanpa muatan. Berapakah medan total pada sudut tanpa muatan tersebut