

BAB – 16 **L I S T R I K**

Listrik merupakan salah satu gaya pokok di alam, di analogikan dengan gaya gravitasi. Jika gaya gravitasi terbentuk antara dua objek yang bergantung pada massa objek tersebut, sedangkan gaya listrik diantara dua yang bergantung pada muatannya. Muatan adalah properti dasar dari dua partikel elementer (electron dan proton) yang biasanya menjadi penyusun nyaris semua bahan yang ada di alam. Pada kenyataannya, hal itu adalah gaya listrik yang dibentuk oleh protan dan elektron dalam atom.

Aplikasi dari kegunaan dari listrik adalah dibuat berdasar kemampuan untuk menghasilkan dan mengolah aliran muatan partikel. Pada bagian ini kita akan membahas prinsip-prinsip listrik untuk memahami peralatan seperti radiasi sinar-x dan sinar katoda.

1.1 Gaya Fundamental

Semua gaya yang telah dibahas dalam buku ini, seperti gaya gesek, daya, dan tegangan permukaan yang merupakan hasil pengamatan dari terapan gaya antara dua atom. Pengamatan terhadap gaya ini tidak berdasarkan penyebab dasarnya, pada prinsipnya mereka dapat di analisis dari gaya yang pada atom. Meskipun gaya antara atom bukan merupakan gaya fundamental, tetapi dapat dianalisis lebih lanjut dengan gaya antara partikel yang menyusun atom.

Terdapat tiga jenis partikel penyusun atom yaitu proton, neutron dan elektron. Proton dan neutron tepat berada pada pusat atom atau inti (nucleus) atom. Pada nucleus terkandung 99.95% massa atom, tetapi hanya menempati sebagian kecil volume dari atom. Elektron mengelilingi nucleus pada orbitnya, yang hanya mengandung 0.05% dari massa atom namun nyaris menempati keseluruhan volume atom.

Karena proton, neutron dan elektron tidak memiliki komposisi selagi masih berupa partikel kecil, mereka disebut partikel elementer dan dengan gaya yang terbentuk berupa gaya fundamental di alam. Seluruh bahan yang ada di alam ini

biasanya tersusun dari partikel elementer, dan demikian pula dengan gayanya dapat dimengerti dengan memahami gaya elemental antar partikel-partikel tersebut. Sekarang ini terdapat 4 gaya fundamental yang kita ketahui:

1. Gaya gravitasi
2. Gaya elektromagnetik
3. Gaya nuklir
4. Gaya lemah

Gaya gravitasi adalah gaya yang paling lemah diantara empat gaya fundamental karena jangkauan dari gravitasi antara dua partikel lebih kecil daripada jangkauan gaya fundamental yang lain. Gaya gravitasi antara partikel elementer sangat lemah, buktinya tidak dapat diukur efek dari kelakuan partikel dalam atom ini. Hanya pada objek dengan ukuran amstrung dengan massa yang cukup dapat menimbulkan gaya gravitasi dalam atom. Karena gaya ini bersifat menarik, seperti partikel menarik atom pada wilayah sekitarnya. Pertumbuhan atom menimbulkan peningkatan massa partikel, maka gaya gravitasi dapat terbentuk akibat partum,buhan. Sebagai konsekuensinya partikel akan menarik lagi atom dan mengakibatkan jumlahnya terus bertambah. Hal ini menjelaskan betapa besar sekali jumlah suatu material, seperti bintang dalam galaxinya, layaknya debu dengan atom berhamburan sekitarnya. Gaya gravitasi merupakan hal yang penting dalam bidang astronomi, sebagai gaya yang mengontrol struktur dari bentuk astronomi.

Gaya elektromagnetik adalah gaya yang mendasar untuk menggambarkan struktur atom. Elektron berada pada orbit disekeliling inti dengan gaya listrik, seperti planet berada pada orbitnya mengelilingi matahari dengan gaya gravitasi. Elektron-elektron biasanya mengalami gaya listrik satu sama lain, dan gaya yang timbul antara dua atom yang saling berdekatan merupakan gaya yang timbul antara elektronnya. Semua gaya yang dibahas lebih lanjut pada pembahasan ini, dengan mengabaikan gaya gravitasi, adalah jumlah gaya listrik. Oleh karena itu semua gaya yang terjadi dalam kehidupan sehari-hari,kecuali gravitasi, murni gaya elektromagnetik.

Proton dan neutron dalam inti akibat adanya gaya nuklir. Gaya ini sangat kuat ketika dua partikel sangat dekat , tapi akan menurun drastic jika ada jarak. Contohnya , gaya nuklir antara dua buah neutron akan nol jika lebih dari 10^{-14} m.

Artinya gaya nuklir tidak dapat diperpanjang sampai ke elektron dalam atom, yang berjarak 10^{-10} m dari inti. Oleh karena itu meskipun gaya nuklir sangat penting mengikat inti, gaya ini tidak berperan dalam interaksi antar atom.

Gaya lemah adalah gaya yang bekerja pada wilayah yang sangat kecil, sangat terbatas ke inti. Gaya ini dapat merespon untuk beberapa bentuk radioaktivitas, yang secara langsung mengubah inti atom suatu atom menjadi inti atom seperti atom lain.

Gaya elektromagnetik adalah gaya yang penting dalam penyusunan bahan atau material fisika dan kimia. Gaya ini merupakan hal yang penting pada prakteknya, seperti seluruh peradaban industri tergantung pada generator tenaga listrik dan peralatan pada motor, penyinaran dan pemanasan.

1.2 Hukum Coulomb

Meskipun gaya gravitasi dan gaya listrik merupakan gaya fundamental yang berbeda, keduanya memiliki beberapa kesamaan. Dengan tujuan memahami gaya listrik, sebelumnya, akan sangat membantu jika kita membahas sekilas mengenai gaya gravitasi.

Gravitasi adalah gaya yang muncul antara dua partikel dengan massa m_1 dan m_2 . Artinya bahwa gaya F_1 yang muncul pada m_2 akibat m_1 . Menurut hukum III Newton, reaksi F_1 adalah F_2 pada m_1 akibat m_2 . Gaya F_1 dan F_2 memiliki nilai yang sama namun arahnya berlawanan.

Gravitasi adalah gaya yang bekerja pada suatu jarak, misalnya dua partikel saling berinteraksi pada ruangan kosong, tanpa ada interaksi mekanik. Nilai F_g pada gaya gravitasi pada dua objek yang bermassa m_1 dan m_2 terpisah dengan jarak r , menurut hukum Newton,

$$F_g = G (m_1 \cdot m_2 / r^2)$$

dimana G adalah konstanta universal gravitasi ($G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{Kg}^2$).

Nilai inilah yang membedakan gaya tarik dan gaya tolak yang ditandai oleh nilai yang didapat. Gaya tarik memiliki tanda negatif dan gaya tolak memiliki tanda positif. Berdasarkan kesepakatan tersebut maka persamaan gaya gravitasi menjadi:

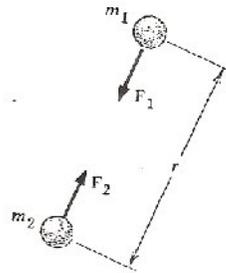


FIGURE 16.2
Gravitational attraction of two masses.

$$F_g = - G (m_1 \cdot m_2 / r^2) \quad 16.1$$

untuk menandakan gaya tarik menarik.

Gaya listrik adalah gaya yang bekerja pada dua buah partikel yang terpisah yang bermuatan q_1 dan q_2 . Muatan, seperti massa yang merupakan dasar dari sebuah materi. Dimensi dari muatan sangat fundamental, seperti massa, panjang, waktu dan derajat (pada temperature). Dimensi dari beberapa satuan fisika dapat di nyatakan dalam 5 dimensi. Satuan dari muatan adalah coulomb (C).

Gaya listrik antara dua partikel yang bermuatan q_1 dan q_2 yang terpisah sejauh r menurut hukum coulomb dapat ditulis :

$$F = + K (q_1 \cdot q_2 / r^2) \quad 16.2$$

dimana K merupakan konstanta listrik universal ($K = 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$).

Tersirat adanya kesamaan antara persamaan gaya gravitasi dengan gaya listrik. Gaya listrik tergantung pada hasil perkalian dari muatan dari kedua partikel, seperti pada gaya gravitasi tergantung pada massanya. Begitupun dengan keterbalikan dengan nilai kuadrat dari jarak antara kedua partikel.

Hal penting yang membedakan gaya gravitasi dengan gaya listrik adalah bahwa gaya gravitasi selalu tarik menarik, gaya listrik dapat tarik menarik dan tolak menolak karena terdapat dua jenis muatan yaitu positif dan negatif. Partikel yang memiliki muatan yang sama akan tolak menolak, dan partikel yang berbeda muatannya akan saling tarik menarik. Keadaan ini ditandai oleh tanda positif pada persamaan gaya listrik. Jika q_1 dan q_2 memiliki nilai yang sama, keduanya positif atau dua duanya negatif hasil kali $q_1 q_2$ akan positif, maka gayanya pun bernilai positif, menandakan gaya saling tolak-menolak. Pada sisi lain, Jika q_1 dan q_2

memiliki nilai berbeda hasil kali q_1q_2 negatif, gaya yang diperoleh pun akan bernilai negatif maka gaya yang bekerja bersifat tarik-menarik.

Partikel elementer adalah pembawa muatan. Proton memiliki nilai positif $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$, dan elektron bermuatan negatif $-e$ dengan nilai yang tepat sama. (neutron bermuatan nol.) Muatan dari suatu partikel merupakan jumlah dari muatan proton dan elektron yang ada di dalamnya. Oleh karena itu partikel yang memiliki jumlah proton dan elektron sama akan bermuatan nol yang biasa disebut partikel tak bermuatan atau netral.

Partikel netral bisa bermuatan dengan menangkap atau melepaskan elektron. Singkatnya, ketika sebuah batang kaca digosok oleh sutera, elektron akan berpindah dari batang kaca ke kain sutera. Jika kaca kehilangan sebanyak N elektron maka ia akan kelebihan sebanyak N proton. Maka kaca tersebut akan bermuatan Ne . sama halnya dengan sutera akan memiliki kelebihan sebanyak N elektron disbanding proton maka muatan totalnya $-Ne$. total muatan pada kaca dan batang kaca adalah

$$Ne + (-Ne) = 0$$

bernilai sama seperti sebelum digosokan.

Hal ini merupakan contoh dari hukum kekekalan muatan, dimana dikatakan bahwa pada setiap proses fisika, jumlah total muatan tidak berubah. Hukum ini secara jelas benar untuk proses yang hanya meliputi perpindahan elektron dari satu partikel ke partikel lain. Bagaimanapun, hukum ini lebih umum disbanding proses-proses ini, seperti peluruhan inti, dimana proton dan elektron akan terbentuk dan hilang.

Merupakan hal yang membandingkan antara gaya gravitasi dengan gaya listrik yang terbentuk diantara dua partikel elementer. Table 16.1 memperlihatkan massa dan muatan dari proton, neutron dan elektron. Dengan menggunakan table tersebut kita dapat menghitung besarnya gaya gravitasi antara proton dan elektron yang terpisah sejauh r , adalah:

$$F_g = -G \frac{m_p m_e}{r^2}$$

$$F_g = - \frac{(9.87 \times 10^{-24} \text{ N-m}^2/\text{kg}^2) (1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}) (9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})}{r^2}$$

$$F_g = \frac{1.01 \times 10^{-67} \text{ N-m}^2}{r^2}$$

Table 16.1 massa dan muatan dari partikel elementer.

Partikel	Massa (kg)	Muatan (C)
Proton	1.673×10^{-27}	1.602×10^{-19}
Neutron	1.675×10^{-27}	0
Elektron	9.110×10^{-31}	$- 1.602 \times 10^{-19}$

Selain itu kita pun dapat mencari besarnya gaya listrik antara elektron dan proton adalah

$$F_e = +K \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

$$F_e = \frac{(9.0 \times 10^9 \text{ N-m}^2/\text{C}^2) (1.60 \times 10^{-19} \text{ C}) (-1.60 \times 10^{-19} \text{ C})}{r^2}$$

$$F_e = - \frac{2.30 \times 10^{-28} \text{ N-m}^2}{r^2}$$

Perbandingan antara kedua gaya tersebut adalah

$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{2.30 \times 10^{-28}}{1.01 \times 10^{-67}} = 2.28 \times 10^{39}$$

Karena gaya listrik jauh lebih besar daripada gaya gravitasinya, maka gaya gravitasi dapat dihilangkan ketika menjumlahkan gaya antara dua partikel elementer. Tetapi, pada skala yang besar seperti system astronomi didominasi oleh gaya gravitasi karena objeknya bermuatan neutral.

Induksi

Sebuah batang kaca yang bermuatan positif akigbat digosok oleh sutra akan menarik gabus-gabus kecil. Meskipun gabus tidak bermuatan. Gabus tersusun dari

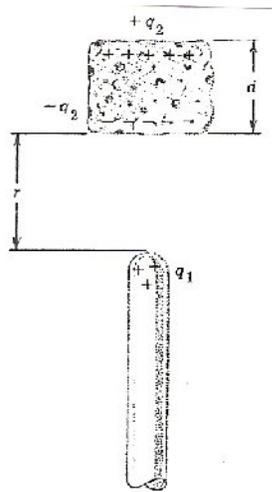


FIGURE 16.5 Induction of charge on a piece of cork. The cork is attracted to the inducing charge q_1 because the attraction between q_1 and the negative induced charge is greater than the repulsion between q_1 and the positive induced charge.

proton dan elektron yang berbeda muatan, yang secara alami terdistribusi uniform, maka jumlah muatannya nol untuk setiap bagian gabus. Ketika objek yang bermuatan, seperti batang kaca didekatkan dengan gabus, muatan positif pada kaca akan berinteraksi dengan elektron-elektron (menarik) dan menolak proton pada gabus pada gabus, hal inilah yang menyebabkan perubahan kecil dari posisi alaminya. Hasilnya muatan negatif akan terakumulasi pada sisi dekat kaca dan muatan positif akan terakumulasi pada sisi lainnya. Proses tersebut dinamakan induksi. Berdasarkan hukum kekekalan muatan, total muatan gabus

harus nol, karena tidak ada muatan yang ditambahkan ataupun dipindahkan. Karena disini muatan negatif terinduksi ke satu sisi dan muatan positif terinduksi ke sisi lainnya.

Seandainya batang kaca memiliki muatan q_1 dan jaraknya r dari sisi depan gabus. Jika muatan induksi pada sisi depan gabus adalah $-q_2$, batang akan menarik dengan gaya sebesar:

$$F_g = +K \frac{q_1(-q_2)}{r^2} = -K \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

pada waktu yang sama, batang akan menolak muatan $+q_2$ yang terinduksi ke sisi belakang. Muatan tersebut terletak sejauh d dari batang, dimana d adalah diameter sebuah serpihan gabus. Oleh karena itu gaya tolak yang dialami muatan positif itu adalah

$$F_g = K \frac{q_1 q_2}{(r + d)^2}$$

dengan nilai jauh lebih kecil dari F_e . Nilai F pada total jumlah gaya pada gabus adalah jumlah dari F_e dan F_e' atau

$$F = F_e + F_e' = -K \frac{q_1 q_2}{r^2} + K \frac{q_1 q_2}{(r+d)^2}$$

$$F = K q_1 q_2 \left[\frac{1}{r^2} - \frac{1}{(r+d)^2} \right]$$

$$F = -K q_1 q_2 \frac{2rd + d^2}{r^2(r+d)^2}$$

nilai di atas memperlihatkan kaca akan menarik muatan negatif pada gabus.

Catatan penting : jika batangnya bermuatan negatif maka muatan positif akan terinduksi ke sisi gabus yang dekat dengan batang dan muatan negatif akan terinduksi ke sisi yang lainnya. Maka gabus masih akan tertarik oleh batang. Oleh karena itu objek bermuatan, baik positif ataupun negatif akan menarik objek tidak bermuatan.

Isolator dan konduktor

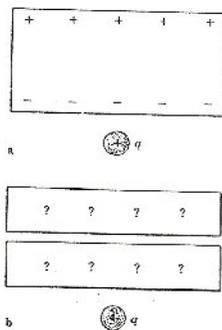


FIGURE 16.6
(a) Induction of charge on an object by an external charge q . (b) Object cut to try to isolate the induced charge.

Perbedaan bahan adalah pada kebebasan relative dengan muatan yang dapat bergerak yang dimilikinya. Bahan yang memiliki muatan yang dapat bergerak dengan sangat bebas disebut konduktor, dan bahan yang muatannya dapat bergerak hanya sedikit disebut isolator (atau dielektrik). Logam merupakan konduktor yang baik, sedangkan kaca, karet, dan gabus adalah contoh isolator yang baik.

Perbedaan diantara isolator dengan konduktor digambarkan dengan eksperimen berikut. Sebuah muatan q didekatkan dengan bahan yang tidak bermuatan, maka akan terjadi induksi muatan. Objek itu lalu dipotong menjadi dua, dan muatan q dijauhkan. Apakah setengah bagian dari objek tersebut mengalami induksi? Jawabannya ya jika objeknya berbahan konduktor dan tidak jika bahannya isolator. Untuk memahami hal tersebut kita harus membandingkan antara struktur atom konduktor dan isolator.

Pada bahan isolator, setiap elektron terikat pada atom dan tidak dapat bebas berpindah. Atom-atom pada bahan isolator digambarkan pada gambar 16.7 a

seperti unit yang netral komposisi proton dan elektron berlapis-lapis satu dengan lainnya. Muatan positif q didekatkan dengan isolator menarik muatan negatif pada elektron dan menolak muatan positif pada inti. Hal tersebut menyebabkan muatan positif dan negatif sedikit terpisah. Atom yang seharusnya bermuatan netral, muatan positif, tetapi akhirnya menjadi bermuatan positif dan sebagian lagi bermuatan negatif. Sebagai hasilnya terdapat kelebihan muatan negatif pada satu sisi dan kelebihan muatan positif pada sisi yang lainnya. Tentu saja bukan muatan bebas, muatan itu hanyalah akhir dari atom netral. Gambar 16.7 c memperlihatkan gambaran jika bahan isolator dipotong menjadi dua. Induksi muatan muncul pada permukaan potongan tetapi total muatannya nol.

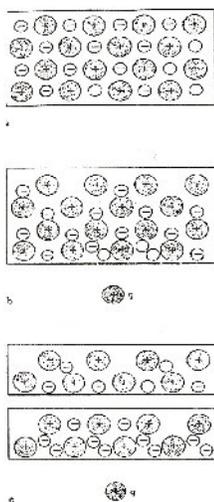


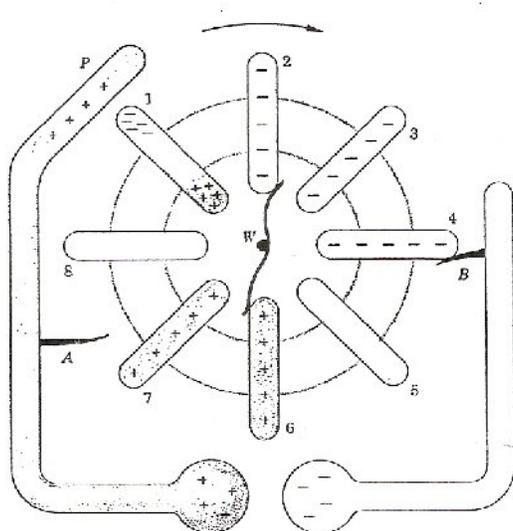
FIGURE 16.8
 (a) A conductor. The positive charges are the ions, which have fixed positions, and the negative charges are the electrons, which are free to move around. (b) Induction of charge on an insulator. The external charge q causes the free electrons to move toward one side of the insulator. (c) When the insulator is cut in half, an excess of electrons is trapped on one half and a deficit of electrons is trapped on the other half.

Pada konduktor logam, sedikitnya terdapat satu buah elektron terpisah dari atom dan bebas dalam konduktor. Atom yang kehilangan elektron disebut ion. Pada logam muatan positif berada pada tempat yang tetap. Bahan logam terdiri dari muatan positif yang tetap posisinya dengan dikelilingi muatan negatif di sekitarnya. Secara normal ion dan elektron terdistribusi pada sisi yang dekat dengan q dengan uniform, maka total muatannya nol di setiap daerah pada logam. Tetapi, objek yang bermuatan yang didekatkan pada bahan ini akan mengubah distribusi tersebut. Muatan positif akan menarik elektron dan akan menolak ion. Karena elektron bebas bergerak, mereka terakumulasi pada sisi dekat q , dan menjadi bermuatan negatif. Pada sisi berlawanan, akan kekurangan elektron dan menjadi bermuatan positif. Jika konduktor dipotong di tengah-tengahnya, kelebihan elektron

terjebak pada sisi yang dekat dengan q , meninggalkan sisi lain yang kekurangan elektron. Maka setengah bagian itu tetap bermuatan meskipun muatannya telah diijauhkan.

Untuk membuat bahan konduktor menjadi tidak bermuatan hanya dengan menghubungkan bahan konduktor dengan kabel. Konduktor yang kelebihan muatan negatif ditarik oleh konduktor yang bermuatan positif, mengalir sepanjang kabel, sampai kedua konduktor kembali netral.

Mesin penginduksi



Gambar disamping memperlihatkan satu dari banyak mesin penginduksi yang menggunakan induksi untuk memisahkan muatan. Seperti mesin utama yang digunakan untuk menunjukkan demonstrasi fisika sekarang ini, tetapi pada abad 90an digunakan untuk penelitian mengenai kelistrikan. Pada mesin diperlihatkan batang logam dibuat radial membentuk sebuah roda

yang diputar dengan sebuah engkol secara langsung. Plat yang dinamai P memiliki muatan muatan positif yang kecil. Maka muatan tersebut akan menginduksi pada posisi 1. Ketika roda di putar ke titik 2, akan membuat kontak sesaat dengan kabel W, yang secara simultan terhubung dengan batang pada posisi 6. Muatan negatif mengalir dari batang di posisi 6, maka ketika terhubung akan mengalami kerusakan, roda ini, sekarang ada di posisi 7, meninggalkan muatan positif. Demikian juga, roda pada posisi 3 mengangkat muatan negatif. Batangan ini menyimpan muatannya pada dua bola yang dinamakan A dan B.

Beberapa muatan positif yang disimpan pada A akan terakumulasi pada plat P. karena muatan pada P meningkat maka jumlah muatan induksi ke posisi 2 pun meningkat. Hal ini akan tambah meningkatkan lagi jumlah muatan di P. karena itu mesin menggunakan umpan balik positif untuk mempercepat terbentuknya muatan yang besar pada dua bola konduktor. Ketika muatan sudah cukup besar, udara diantara dua bola konduktor akan terkonduksi dan dapat mengalirkan elektron dari bola negatif ke bola positif. Akan terlihat seperti pecikan antara kedua bola.

1.3 Medan listrik

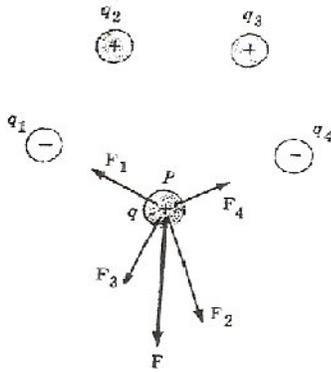


FIGURE 16.10
The force on a test charge q due to four source charges, q_1, q_2, q_3, q_4 .

Gambar 16.10 memperlihatkan perubahan konfigurasi muatan (q_1, q_2, \dots, q_n). Gaya F mengatur muatan terhadap q pada titik P merupakan jumlah vector dari gaya-gaya F_1, F_2, \dots, F_n dimana mengatur masing-masing muatan terhadap q . Semua gaya ini tergantung pada muatan uji q dan pada muatan sumber q_1, q_2, \dots, q_n pada konfigurasi aslinya. Hal ini sangat penting untuk menggambarkan gaya sebagai hasil perkalian yang tergantung hanya

pada muatan uji dan muatan sumber. Hal ini memudahkan karena F proporsional terhadap q , maka rasionya adalah

$$E = \frac{F}{q} \tag{16.3}$$

Tidak bergantung pada q , vector E merupakan medan magnet di titik P yang dibentuk oleh muatan sumber. Hal tersebut sama untuk gaya pada muatan yang bekerja pada muatan positif 1-C pada P . satuan untuk E adalah Newton per Coloumb (N/C). Dalam bahasan E , gaya pada muatan sumber bekerja pada perubahan muatan q di titik P dapat ditulis

$$F = qE \tag{16.4}$$

Persamaan di atas menggambarkan vector F sebagai hasil perkalian sejumlah q yang hanya tergantung pada muatan uji dan vector E hanya tergantung pada muatan sumber. Hasil perkalian dari sejumlah muatan positif dan vector E adalah vector F yang searah dengan E dan memiliki nilai qE . Jika q negatif, arah F akan berlawanan dengan E .

Medan listrik merupakan konsep yang penting karena membiarkan kita untuk memikirkan mengenai gaya yang merupakan konfigurasi dari muatan akan bekerja pada muatan meskipun tidak ada bmuatan di sekitarnya. Karemna gaya yang bekerja pada muatan uji tergantung pada titik posisinya, medan listrik bervariasi ndari satu titik ka titik lainnya. Akibat dari konfigurasi muatan dapat digambarkan

oleh medan magnet dari berbagai titik. Sebagai contoh pada gambar 16.11 memperlihatkan medan magnet pada beberapa titik yang berbeda yang dibentuk oleh titik muatan positif. Panah-panah menggambarkan medan arahnya berasal dari muatan karena arah dari medan adalah arah dari gaya yang bekerja pada muatan uji positif. Panjang dari garis menurun sesuai jarak dari muatan karena gaya pada muatan uji menurun akibat jarak, seperti yang dikatakan pada hukum Coloumb.

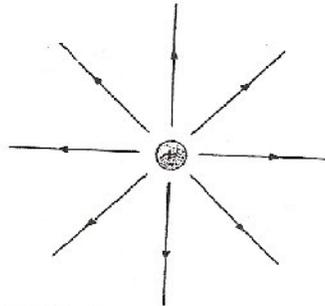


FIGURE 16.12
The lines of force of a positive point charge.

muatan uji menurun akibat jarak, seperti yang dikatakan pada hukum Coloumb.

Gambar 16.12 memperlihatkan gambaran lain dari medan magnet pada muatan positif. Garis, yang disebut dengan garis gaya magnet, digambarkan parallel terhadap medan pada setiap titik, memberikan gambaran yang baik mengenai arah dari medan magnet dimanapun. Bandingkan gambar

16.11 dengan 16.12 kita lihat bahwa garis dari gaya berdekatan jika medannya besar dan akan lebih berjauhan jika medannya kecil. Oleh karena itu jarak antara garis gaya menunjukkan nilai relative medan.

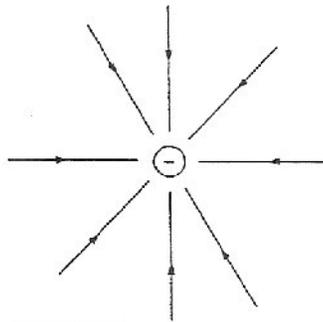


FIGURE 16.13
The lines of force of a negative point charge.

Gambar 16.13 memperlihatkan garis gaya pada muatan negatif. Garis-garis itu menyerupai garis gaya pada muatan positif hanya berbeda arahnya menuju ke muatan. Hal itu karena muatan positif menarik muatan negatif. Gambar 16.14 memperlihatkan garis gaya yang dibentuk oleh dua muatan yang sama besar berbeda jenis yang diletakan sejauh d . semua garis berawal dari titik positif dan berakhir di titik negatif. Medan listrik

pada titik P adalah garis singgung dari garis gaya di titik P dan sama nilainya dengan jumlah vector dari medan listrik akibat muatan yang terpisah.

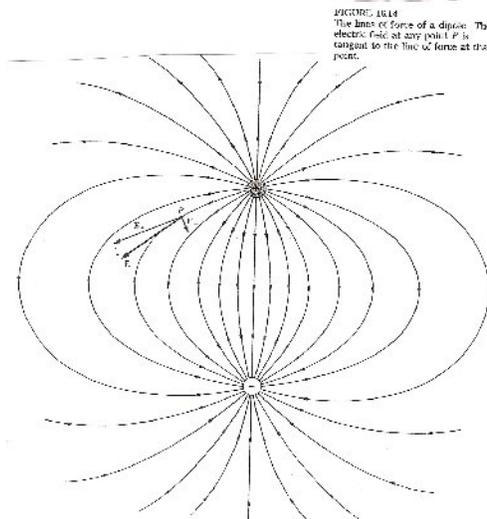


FIGURE 16.14
The lines of force of a dipole. The electric field at any point P is tangent to the line of force at that point.

Konfigurasi muatan pada gambar 16.14 disebut dengan dipole. Meskipun total muatan pada konfigurasi adalah nol, akan terbentuk gaya terhadap muatan lain. Keadaannya sama halnya positif dan negatif pad sisi yang

berbeda pada gabus. Hal tersebut menginduksi muatan dari dipole yang gayanya bekerja terhadap muatan.

Medan listrik yang dihasilkan oleh dipole dapat dikalkulasikan pada beberapa titik dari hukum coulomb. Penjumlahan dari partikel sederhana untuk kasus khusus pada titik P pada sumbu dipole. Misalkan q_1 dan $q_2 = -q_1$ menjadi muatan dipol, dan andaikan ada muatan uji q pada penampang dipole sejauh r dari pusat dipole. Total gaya F pada q adalah jumlah gaya F_1 dan F_2 dari muatan q_1 dan q_2 . Karena gayanya paralel maka nilai F adalah :

$$F = F_1 + F_2$$

$$F = K \frac{q_1 q_2}{\left(r + \frac{d}{2}\right)^2} + K \frac{q_1 q_2}{\left(r - \frac{d}{2}\right)^2}$$

$$F = K q_1 q_2 \left[\frac{1}{\left(r + \frac{d}{2}\right)^2} + \frac{1}{\left(r - \frac{d}{2}\right)^2} \right]$$

$$F = K q_1 q_2 \frac{-2rd}{\left(r + \frac{d}{2}\right)^2 \left(r - \frac{d}{2}\right)^2}$$

Ketika r sangat besar dibanding d , katakanlah setengah d dapat diabaikan. Gaya diberikan dengan persamaan:

$$F = -K q_1 q_2 \frac{2rd}{r^4} = F = -K q_1 q_2 \frac{2d}{r^3}$$

Hal itu menunjukkan gaya yang dilakukan oleh dipole menurun terbalik dengan nilai pangkat tiga jarak dari dipole, berbeda dengan gaya yang bekerja pada muatan tunggal, yang menurun sebagai fungsi kuadrat dari jaraknya. Pada jarak yang sangat jauh, gaya dipole akan lebih lemah dibandingkan gaya yang dihasilkan masing-masing oleh q_1 dan q_2 karena gaya masing-masing muatan akan menggagalkan pada jarak jauh (meski tidak semuanya). Nilai dari medan listrik yang dibentuk oleh dipole di titik P adalah:

$$E = \frac{F}{q} = -K \frac{2dq_2}{r^3}$$

1.4 Potensial listrik

Dengan menganggap massa m dan muatan q dari q_1 tetap. Jika keduanya bermuatan positif q_1 melakukan gaya tolak

$$F = -K \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

Pada objek. Jika objek awalnya ada di titik A akan dipercepat keluar sepanjang garis gaya. Pada titik B sksn memiliki kecepatan V_B dengan energi kinetik $K_B = \frac{1}{2} m v_B^2$. Berdasarkan teorema usaha-energi. Usaha W_{AB} bekerja pada q dengan gaya F pada perpindahan objek dari A ke B sebanding dengan perubahan energi kinetiknya.

$$W_{AB} = K_A - K_B \quad 16.5$$

Karena objek berawal dari diam maka nilai K_A adalah nol pada kasus ini

Usaha W_{AB} dilakukan oleh gaya listrik, seperti usaha yang dilakukan oleh gaya gravitasi, dapat ditulis sebagai perbedaan energi potensial U dari objek pada titik A dan B,

$$W_{AB} = U_A - U_B \quad 16.6$$

Maka suatau U dapat ditandai untuk setiap titik seperti usaha yang dilakukan gaya listrik dalam memindahkan object pada dua titik diberikan pad persamaan diatas. Jelasnya, jika jumlah yang sama ditambahkan pada nilai U di setiap titik, persamaan diatas tidak akan berubah nilainya.kebebasan dalam mendefinisikan U digunakan untuk membuat U mendekati Nol untuk beberapa situasi pada titik yang tepat.

$$U_A - U_B = K_B - K_A$$

Atau

$$U_A + K_A = U_B + K_B \quad 16.7$$

Hal itu mengatakan bahwa jumlah dari energi kinetik dan energi potensial pada titik A sama dengan jumlah energi kinetik dan energi potensial pada titik B. Karena A dan B berada pada titik yang dapat berubah, jumlah energinya tetap sama pada setiap titik, dengan kata lain konstan.

Hal itu dapat memperlihatkan bahwa energi potensial pada muatan titik q_1 akibat muatan titik q_2 diberikan dengan

$$U = K \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad 16.8$$

Hal ini sangat menyerupai energi potensial gravitasi, kecuali untuk perbedaan tanda, yang hanya menggambarkan perbedaan tanda pada hukum gaya. Jika q dan q_1 memiliki kesamaan tanda, akan terjadi tolak-menolak satu sama lain dan U bernilai positif. Jika q dan q_1 memiliki tanda yang berbeda maka akan tarik-menarik dan U negatif. Karena gaya gravitasi selalu tarik menarik maka persamaan 5.18 harus bertanda negatif. Energi potensial diberikan dengan persamaan 16.8 tidak pernah bernilai nol, tapi akan semakin kecil semakin kecil seiring dengan semakin besarnya r . Maka dapat dikatakan energi potensial akan nol jika jaraknya tak hingga.

Sebagai contoh, anggaplah elektron berada pada titik A, jarak $r_A = 0.53 \times 10^{-10}$ m dari sebuah proton. Dengan menggunakan tabel 16.1 dan persamaan 16.8 kita dapat memperoleh nilai potensial elektron pada titik A adalah

$$U_A = K \frac{q_e q_p}{r_A}$$

$$U_A = \frac{(9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2) (1.60 \times 10^{-19} \text{ C}) (-1.60 \times 10^{-19} \text{ C})}{5.3 \times 10^{-11} \text{ m}}$$

Nilai energinya negatif karena elektron ditarik oleh proton. Persamaan 16.7 dapat digunakan untuk menghitung kecepatan V_A dimana elektron harus ada pada A untuk terbebas dari proton. Elektron dengan kecepatan pembebasan minimum dapat pindah sampai tak hingga dari proton, tapi kecepatannya nol. Maka ketika

elektron berada pada jarak tak hingga dari proton, energi potensial dan energi kinetiknya nol. Oleh karena itu, dari persamaan 16.7 didapat

$$K_A + U_A = K_\infty$$

$$K_A = \frac{1}{2} m v_A^2 = -U_A = 4.3 \times 10^{-18} \text{ J}$$

dimana m adalah massa elektron. Maka penyelesaian untuk V_A adalah

$$v_A = \frac{4.3 \times 10^{-18} \text{ J}}{\frac{1}{2} m}$$

$$v_A = \frac{4.3 \times 10^{-18} \text{ J}}{\frac{1}{2} (9.1 \times 10^{-31} \text{ kg})}$$

$$v_A = 9.4 \times 10^{12} \text{ J/kg}$$

maka

$$V_A = 3.1 \times 10^6 \text{ m/s}$$

Catatan penting: hasil perhitungan ini bisa dibandingkan dengan hasil perhitungan pada bagian 5.4 mengenai kecepatan yang dibutuhkan untuk membebaskan diri dari bumi. Terdapat prinsip yang sama dalam kedua perhitungan itu. Tetapi, kecepatan pembebasan gravitasi tidak tergantung pada massa objek, sedangkan pada kasus listrik tergantung massa. Kenapa?

Energi potensial pada muatan uji akibat konfigurasi dari muatan sumber (q_1 , q_2 , ..., q_n) adalah jumlah dari energi yang disebabkan oleh masing-masing muatan. Energi potensial tergantung pada kebersamaan dari muatan uji dengan muatan sumber q_1 , q_2 , ..., q_n . hal itu sangat berguna untuk menyatakan energi potensial, seperti gaya listrik, hasil kali dari factor yang tergantung pada muatan uji

dengan factor yang bergantung pada muatan sumber. Karena U sebanding dengan q, dengan rasio

$$V = U/q \quad 16.9$$

Dengan nilai q bebas. Jumlah V, disebut dengan potensial listrik, hanya bergantung pada nilai muatan sumber. Energi potensial U pada muatan uji adalah gambaran sederhana dari pembahasan potensial V,

$$U = q V \quad 16.10$$

Satuan dari potensial adalah joule per coulomb (J/C), yang biasa juga disebut Volt (V):

$$1V = 1 J/C$$

Dari persamaan 16.8 dan 16.9 nilai potensial akibat muatan titik q_1 dinyatakan

$$V = \frac{U}{q} = K \frac{q}{r} \quad 16.11$$

Sebagai contoh, besarnya potensial pada jarak $r = 5.3 \times 10^{-11}$ dari proton adalah

$$V = \frac{(9.0 \times 10^9 \text{ N-m}^2/\text{C}^2)(1.60 \times 10^{-19} \text{ C})}{5.3 \times 10^{-11} \text{ m}}$$

$$V = 27.2 \text{ N-m/C} = 27.2 \text{ J/kg} = 27.2 \text{ V}$$

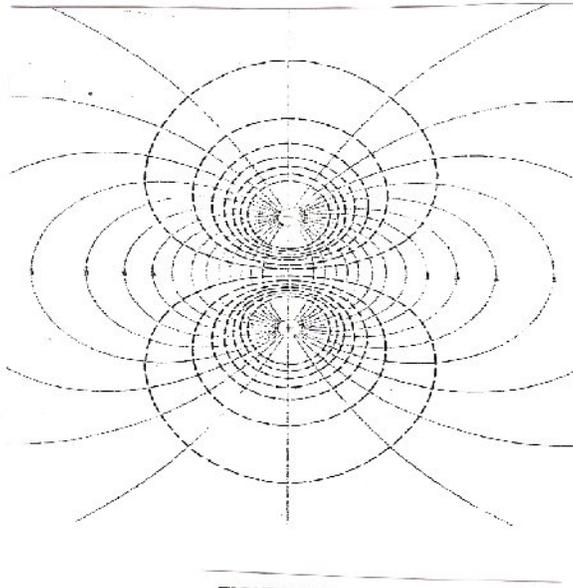


FIGURE 16.17
Equipotentials and lines of force of
a dipole. The lines of force are
everywhere perpendicular to the
equipotentials.

Potensial pada semua titik pada konfigurasi muatan dapat digambarkan dengan ekipotensial, garis yang potensialnya tetap sepanjang garis. Gambar 16.17 menggambarkan ekipotensial (garis putus-putus) dan garis gaya (garis penuh) pada dipole (dua muatan sama besar berbeda jenis.). medan listrik tidak bekerja pada muatan uji yang berpindah sepanjang garis ekipotensial, karena

energi potensialnya tidak berubah. Hal ini menandakan bahwa garis gaya harus tegak lurus dengan garis equipotensial, seperti diperlihatkan pada gambar 16.17 jika untuk kasus lain, gaya listrik akan memiliki komponen paralel dengan equipotensial dan beberapa usaha akan dikenakan terhadap muatan uji yang bergerak disekitarnya. Gaya pada muatan uji positif akan selalu terjadi dari potensial tinggi ke potensial rendah, tegak lurus dengan equipotensial. Sedangkan untuk muatan uji negatif, sebaliknya, akan terjadi dari potensial rendah ke potensial tinggi.

Ketika logam konduktor ditempatkan pada medan listrik statis, bagian yang berbeda dari konduktor akan berada pada potensial yang berbeda dalam waktu sesaat. Jika pada kasus ini, muatan negatif elektron yang bebas bergerak dalam logam, akan mengalir dari potensial yang rendah ke potensial yang tinggi. Elektron akan kembali terdistribusi oleh sendirinya, sedikitnya satu juta elektron per detik, potensial akan sama nilainya pada tiap titik pada logam. Maka ketika tidak terjadi aliran muatan listrik di dalamnya logam dengan objek konduktor lainnya berada pada keadaan equipotensial. selanjutnya karena terdapat banyak medan listrik pada konduktor akan menyebabkan elektron bebas berpindah, medan listrik konduktor harus nol ketika tidak terjadi aliran muatan.

Konduktor terhubung dengan baik dengan bumi dinamakan ground. Permukaan bumi sendiri merupakan konduktor yang baik, maka bumi dan seluruh konduktor ground bersama-sama membentuk sebuah konduktor yang sangat besar,

semuanya memiliki potensial yang sama, disebut bumi. Pada penerapannya potensial dalam bumi adalah nol.

Contoh, listrik yang digunakan rumah pada umumnya 120 v. artinya satu sisi mengandung potensial 120 v relative terhadap sisi lainnya, yang di groundkan. Ketika sebuah alat dinyalakan pada keluar, muatan positif mengalir akibat sisi dengan potensial tinggi, begitupun dengan alat, dan kembali ground. Usaha yang dilakukan adalah

$$\begin{aligned}
 W &= U_{120} - U_0 \\
 &= q \times 120 \text{ v} - 0 \\
 &= q \times 120 \text{ v}
 \end{aligned}$$

Untuk lebih mudah, usaha dilakukan pada muatan 10 C adalah

$$W = 10 \text{ C} \times 120 \text{ V} = 1200 \text{ J}$$

Usaha ini di udah menjadi panas, cahaya, atau energi mekanik, tergantung pada alat yang dihubungkan.

1.5 Berkas elektron

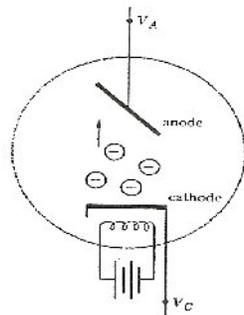


FIGURE 16.18
A vacuum tube. Electrons that evaporate from the heated cathode are accelerated toward the anode, which is maintained at a positive potential with respect to the cathode.

Sejumlah perangkat penting , seperti osiloskop, televisi, mesin sinar-X, mikroskop elektron, dan tabung vacuum elektron yang dipercepat dengan menggunakan medan listrik. Pada semua kasus mengenai berkas terkandung pemindahan tabung, seperti pada gambar 16.18. Piringan logam, atau elektroda, terkumpul di satu sisi tabung, dan kabel mendorong elektron untuk mencapai dinding tabung.

Satu elektroda, disebut katoda, yang dipanaskan dengan kabel filament dengan arus yang mengalir padanya. Ketika temperatur cukup tinggi, beberapa elektron bebas memiliki energi yang cukup untuk lepas dari

logam, seperti penguapan pada cairan. Penguapan elektron ini berasal dari katoda; jika terlalu rapat, maka penguapan akan terhambat.

Jika elektroda yang satunya lain disebut anoda, terbangun dari potensial positive yang jauh dibanding katoda, elektron bisa tertarik ke plat tersebut. karena tidak ada udara dalam tabung, elektron bergerak bebas sampai ke anoda tanpa bertabrakan molekul udara. Seperti gerakan elektron dalam awan elektron, mereka akan terganti dari elektron yang menguap dari katoda.

Misalkan V_A adalah potensial di anoda, dan V_C adalah potensial di katoda. Energi potensial dari elektron yang bermuatan $q = -e$ pada anoda dan katoda adalah

$$U_A = -e V_A$$

dan

$$U_C = -e V_C$$

Energi listrik hanya yang mempengaruhi elektron, maka ketika elektron bergerak dari katoda ke anoda, dengan jumlah energi kinetic dan energi potensialnya konstan.

$$K_C + U_C = K_A + U_A$$

penyelesaian dari energi kinetic K_A pada anoda, kita peroleh

$$\begin{aligned} K_A &= K_C + (U_C - U_A) \\ &= K_C + e(V_A - V_C) \end{aligned}$$

energi kinetic K_C pada elektron seperti pada katoda mendekati nol, maka perkiraan paling baik yang diperoleh,

$$K_A = \frac{1}{2} m v^2 = e (V_A - V_C)$$

$$V_A^2 = \frac{2e(V_A - V_C)}{m}$$

16.13

dimana m adalah massa elektron.

Sebagai contoh, jika potensial anoda 5000 V terhadap katoda, kecepatan elektron yang diperoleh

$$\begin{aligned} v^2 &= \frac{2(1.60 \times 10^{-19} \text{ C})(5000 \text{ V})}{9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}} \\ &= 17.6 \times 10^{14} \text{ J/kg} \\ &= 4.2 \times 10^7 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Catatan penting, kecepatan elektron pada hasil perhitungan di atas mendekati kecepatan cahaya ($c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$) ketika $V_A - V_C$ lebih besar daripada 256.000 V. tetapi menurut teori relativitas, sebuah objek tidak dapat bergerak lebih cepat dari kecepatan cahaya. Oleh karena itu persamaan 16. 13 tidak sepenuhnya tepat. Diperbaiki pada kecepatan yang benar yakni lebih kecil dari kecepatan cahaya, namun akan menjadi lebih akurat jika kecepatan bernilai lebih besar daripada $\frac{1}{2} c$. kesalahan itu terjadi karena penggunaan $\frac{1}{2} mv^2$ untuk menghitung energi kinetic. Untuk kecepatan yang mendekati kecepatan cahaya, energi kinetic diperoleh dengan

$$K = mc^2 \left[\frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}} - 1 \right]$$

16.14

Persamaan ini sebanding atau sama dengan $\frac{1}{2} mv^2$ ketika nilai v lebih kecil dengan c, tapi sangat jauh berbedda untuk v dekat dengan c. (berdasarkan persamaan 16.14 energi kinetek akan semakin besar jika nilai v lebih mendekati c, ketika $v = c$ maka nilai energi kinetiknya tak terhingga.). Untungnya tidak disarankan untuk menggunakan persamaan diatas karena energi kinetic elektron jauh lebih penting daripada kecepatannya, dan hubungan antara K dan V diberikan pada prsamaan 16.12, adalah sah digunakan untuk setiap energi.

Sinar – X

Pada tabung sinar X elektron bertabrakan dengan anoda, seperti diperlihatkan pada gambar 16.18. Perlambatan secara tiba-tiba dapat menghasilkan sinar-X, yang menggunakan gelombang elektromagnetik yang gelombangnya sangat pendek. Panjang gelombang sinar-X akan lebih pendek jika beda potensial $V_A - V_C$ semakin besar. Karena sinar-X dengan panjang gelombang yang pendek lebih besar energinya daripada yang panjang gelombangnya panjang, mesin sinar-X yang digunakan saat ini adalah mesin yang memiliki beda potensial yang besar.

Dengan beda potensial 8000V, energy kinetic elektron yang menumbuk anoda adalah

$$K_A = e (V_A - V_C)$$

$$K_A = 1.60 \times 10^{-19} C \times 8000 V = 12.8 \times 10^{-16}$$

Nilai ini lebih sering dinyatakan dalam satuan *elektron volt (eV)*. Elektron volt adalah energi yang diperoleh oleh elektron atas beda potensial 1 Volt. Maka hubungan antara elektron volt dengan joule adalah :

$$1 eV = e \times 1 V = 1.60 \times 10^{-19} J$$

$$1 J = 6.25 \times 10^{18} eV$$

Dan

Dengan cepat diperoleh energi kinetik dalam elektron volt adalah

$$K_A = (12.8 \times 10^{-16} J) (6.25 \times 10^{18} eV/J) = 8000 eV$$

Maka disimpulkan energy pada elektron sebanding dengan beda potensial.

Tabung Katoda

Tabung sinar katoda digunakan dalam osiloskop dan televise untuk menyediakan atau menghasilkan gambar yang dikendalikan oleh listrik. Elektron dipancarkan dari katoda dan dipercepat menuju anoda, seperti pada tabung sinar-X. oleh karena itu, akan terdapat hole pada anoda akibat terjadinya sinar katodayang menghilangkan sejumlah elektron. Elektron ini akan lalu akan tepat jatuh pada sisi permukaan plat di ujung tabung. Permukaan ini dilapisi oleh meteri yang mengandung fluor, yang membentuk bagian yang bercahaya ketika berkas menumbuknya.

Posisi ini diatur oleh dua pasang plat pemantul, yang berada pada sudut yang tepat satu sama lain. Tepat ketika elektron hilang diantara kedua plat akan

dibelokan menuju plat yang potensialnya lebih tinggi. Jumlah pembelokan diatur oleh perbedaan potensial antara kedua plat. Sepasang plat menghasilkan pembelokan horizontal, dan pasangan lainnya menghasilkan pembelokan ke arah vertikal. Dan kedua plat itu bersama-sama dapat berpindah kemanapun pada layar.

Osiloskop digunakan untuk menampilkan potensial beda fase, yang terbentuk dari impuls akson pada sel syaraf. Dengan menganggap bahwa elektroda ditanam dalam sel, potensial terbaca akan di masukan ke dalam plat vertikal pada osiloskop, menyebabkan pembelokan pertikan pada tempat tersebut. Untuk menampilkan pulsa variasi waktu, akan menyapu secara spontan pada bidang horizontal dari sisi kiri ke kanan dengan kecepatan konstan. Pada ujung penrambatn secara cepat akan berbalik ke kiri lagi dan akan kembali lagi. Perambatan mengharuskan masukan potensial menghasilkan bentuk gelombang

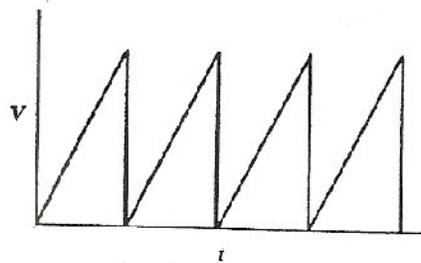


FIGURE 16.20
Time variation of the sweep
potential applied to the horizontal
de.

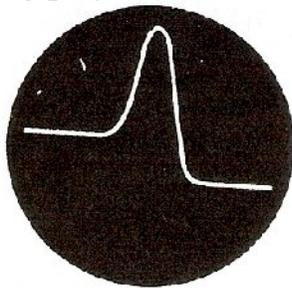


FIGURE 16.21
Action potential of the giant axon
of a squid as displayed on an
oscilloscope.

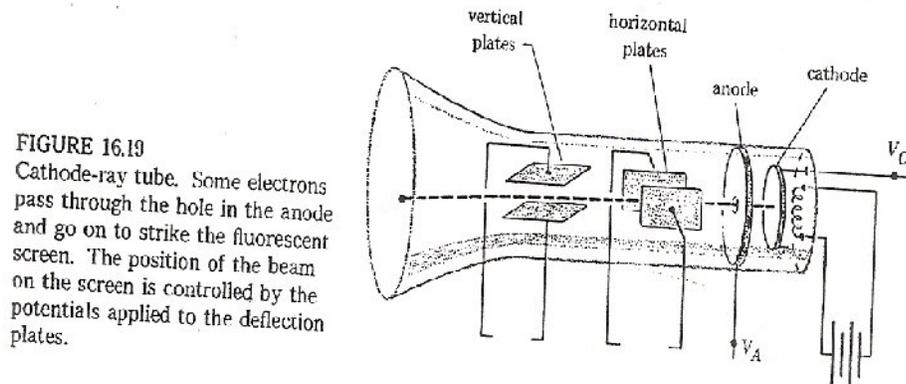
gigi gergaji seperti pada gambar 16.20. perambatan gelombang dihasilkan oleh rangkaian elektronik pada osiloskop, dan yang mengatur variasinya adalah frekuensi perambatan.

Pada operasinya, frekuensi perambatan disamakan dengan frekuensi sampainya pulsa ke plat vertikal. Kemudian, pada rmbatan horizontal, pulsa yang baru ditampilkan sama dengan pulsa sebelumnya, seolah-olah gambarnya posisi tunggal. Pada gambar 16.21 memperlihatkan potensial pada akson yang besar pada cumi-cumi, seperti terlihat pada layar osiloskop.

cumi, seperti terlihat pada layar osiloskop.

Tabung Televisi

Gambar pada televisi sama dengan tabung sinar katoda, kecuali pembelokannya yang lebih banyak menggunakan medan magnet dibanding medan listrik. Gambar terbentuk dari 525 garis horizontal, dan berganti 30 kali tiap sekon. Berarti bahwa berkas yang merambat di bidang horizontal pada layar $525 \times 30 = 15,750$ kali per sekon. Sama seperti perambatan pada bidang horizontal, pada bidang vertikalpun terjadi perambatan yang sama dengan perambatan rata-rata 60 kali per sekon. Ada dua perambatan secara vertikal untuk membentuk sebuah gambar karena hanya setengah gambar yang Nampak pada



perambatan ini. Perambatan arah vertikal dan horizontal dihasilkan dari rangkaian listrik dalam alat ini, tetapi di sesuaikan dengan sinyal yang ditransmisikan dari pemancar. Sinyal yang ada mengatur intensitas berkas elektron dan dan sebab itu kecerahan yang dihasilkan sebagai berkas merambat ke layar. Hal ini merupakan variasi dari intensitas dari berkas seperti berkas balik dan lintangnya akan membentuk partikel gambar